

Kunnallinen ekosysteemitilinpito

Tekninen ohjeistus

**Fyysinen ja rahamääräinen
ekosysteemipalvelutili
Kaupunkien lämpösaarekeilmiön
hillintä**

Pinja-Liina Jalkanen, Tin-Yu Lai

25.11.2025

Ohjetta on täydennetty erillisen jatkohankeen tuloksilla 25.3.2026

Ekosysteemitilin kuvaus

Tämän teknisen ohjeen avulla voidaan tuottaa kaupunkien lämpösaarekeilmiön hillinnän fyysinen ekosysteemipalvelutili sekä arvioida tämän ekosysteemipalvelun rahamääräinen kokonaisarvo. Lämpösaarekeilmiön hillinnällä on useita rinnakkaisia termejä, esimerkiksi paikallisilmaston säätelypalvelu tai yksinkertaisesti ilman lämpötilan viilennyspalvelu. Näillä kaikilla tarkoitetaan kaupunkialueiden kasvillisuuden kykyä alentaa ilman lämpötilaa. Tämä tapahtuu pääasiassa varjostuksen ja haihtumisen (evapotranspiraatio) kautta (Babi Almenar ym. 2023). Vaikka määritelmässä on mukana lähinnä elollisen luonnon aikaansaama viilennys, on huomattava, että myös eloton luonto vaikuttaa ilman lämpötilaan, esimerkiksi erilaiset vesistöt.

Ilman lämpötilan viilennyspalvelun hyödyt ovat äärimmäisen tärkeitä kaupunkialueille, koska Euroopassa on yhä useammin ja intensiivisemmin esiintyviä pitkiä helleaalloja. Nämä helleaallot aiheuttavat Euroopassa eniten kuolemia sää- ja ilmastotapahtumiin liittyen, heikentävät työtehokkuutta ja aiheuttavat erilaisia terveysongelmia (European Environment Agency 2022). Suomessakin on viime aikoina rikottu useita lämpöennätyksiä vuosittain¹. Tämä osoittaa, kuinka tärkeää lämpötilaa lieventävän ekosysteemipalvelun arviointi ja seuranta on Suomen kunnissa.

Ekosysteemipalvelutilin tarkoitus on kuvata ekosysteemipalveluiden käytön tasoa ja siinä tapahtuvia muutoksia (La Notte ym. 2017; UN 2021). Lämpösaarekeilmiön hillintä on SEEA EA -ekosysteemitilinpitostandardin² mukainen paikallisten ilmastoekosysteemipalveluiden tilaa kuvaava tili. Fyysisiä tilejä kuvataan standardin mukaisesti tarjontaa ja käyttöä kuvaavina taulukkoina (UN 2021), mutta tässä ohjeistuksessa käydään läpi vain viilennysvaikutuksen mallintamista ja laaditaan tili sen potentiaalisesta tarjonnasta. Käytön selvittäminen edellyttää tietoa palvelun käyttäjistä, toisin sanoen väestöstä, ja siihen annetaan vain yleisluontoinen opastus tässä ohjeessa.

Rahamääräisen arvon laskennassa on huomioitu väestömäärä ekosysteemitilin laskemisen ajankohtana, joten arvioitu arvo edustaa ilman lämpötilan viilennyspalvelun kokonaistarjonnan ja -käytön todellisia virtoja ekosysteemeistä ihmisille. Arvonmääritys kattaa tässä laskennassa vain sen palvelun arvon, joka syntyy äärimmäisen kuumuuden aiheuttamien kuolemantapausten estämisestä. Näin ollen on huomattava, että tämä laskelma ei sisällä säästöjä, jotka syntyvät terveydenhuoltokustannusten välttämistä tai menetetyt työteho (tuottavuuden) estämisestä. Ilman lämpötilalla on näihin tutkimusten mukaan suuri vaikutus.

Ekosysteemitilinpitoalueen rajaus

Kunnallisessa ekosysteemitilinpitodossa lähtökohtana on normaalisti kuntarajojen käyttäminen ekosysteemitilinpitoalueen rajauksena. Tässä ohjeistuksessa tästä kuitenkin poiketaan siltä osin, että pilottikuntien alueista on rajattu ulos sellaisia alueita, joissa rakennetun ympäristön ekosysteemit eivät ole vallitsevia ekosysteemityyppejä, ja joissa lämpösaarekeilmiötä ei sen vuoksi voi

¹ YLE News 2025: <https://yle.fi/a/74-20174549>; YLE news 2024: <https://yle.fi/a/74-20109657>, <https://yle.fi/a/74-20090753>; FMI press release, revealing the heat records in 2023 and 2024: <https://en.ilmatiiteenlaitos.fi/press-release/40XB6ul2Rh7XTr2BtBR4Aj>

² Yleiskuvaus ekosysteemitilinpitodosta YK:n verkkosivuilla, kts. <https://seea.un.org/ecosystem-accounting>

merkittävässä mittakaavassa esiintyä, ja joissa viilennyspalvelusta hyötyvää väestöä on vähän: kaupunkien lämpösaarekeilmiö on nimensä mukaisesti kaupunki-ilmiö (Oke 1982, Taha 1997). Näin tehdään tässä ohjeessa osin myös teknisistä syistä, koska suurimittakaavaisten maanpeiteaineistojen koko kasvaa nopeasti hyvin suureksi alueen pinta-alan kasvaessa.

Pilottikuntina toimivat Espoo ja Tampere. Espoon osalta alkuperäinen tarkoitus oli tarkastella koko kuntaa, mutta mallinnuksen helpottamiseksi tarkastelu rajattiin lopulta vain niihin tilastoalueisiin, jotka sijoittuvat kokonaisuudessaan Kehä III -tien eteläpuolelle. Lisäksi Suvisaaristo jätettiin rajauksen ulkopuolelle. Tampereella aluerajauksena toimi niin kutsuttu kantakaupunki, mikä ei tarkoita yksinomaan tiivistä ydinkaupunkia, vaan siihen kuuluvat käytännössä kaikki muut kaupungin tilastoalueet paitsi Nurmi-Sorilan, Kämmenniemen ja Teiskon suunnittelualueisiin lukeutuvat tilastoalueet, sekä joitakin Olkahisen ja Ojalan suunnittelualueisiin lukeutuvia metsäisiä ja maaseutumaisia osia. Kunta toimitti tarkoitusta varten erillisen kantakaupungin aluerajauksen. Jatkossa on tärkeää, että käytetään samoja ekosysteemitilinpitoalueita, jotta ekosysteemitilit ovat keskenään verrannollisia ja voidaan saada uusia avaus- ja sulkeutumistilien aikasarjoja.

Espoon osalta tilikausi käsitti vuodet 2022 ja 2024 ja Tampereen osalta vuodet 2020 ja 2022. Tampereen osalta alkuperäisessä hankkeessa saatuja tuloksia tarkennettiin vuonna 2026 erillisessä jatkohankkeessa. Espoon osalta tässä ohjeessa raportoidut tulokset vastaavat alkuperäisiä tuloksia.

Menetelmät

Valittu mallinnustapa (fyysinen tili)

Lämpösaarekeilmiön mallintamiseen on yleisesti ottaen kaksi lähestymistapaa. Toinen niistä perustuu tyypillisesti satelliitteihin asennetuilla sensoreilla mitattuihin maan pintalämpötiloihin. Toinen perustuu luokitellun maanpeiteaineiston luokille annettaviin painoarvoihin.

Pintalämpötiloihin perustuva mittaaminen kuulostaa nopeasti ajateltuna loogiselta valinnalta. On kuitenkin syytä muistaa, että pintalämpötilan ja ilman lämpötilan suhde ei todellisuudessa ole lainkaan suoraviivainen: vaikka nämä lämpötilat saattavat käyttäytyä samaan tapaan, niiden välisen tarkemman suhteen selvittäminen edellyttää usein monimutkaista mallintamista (Tomlinson ym. 2011). Arkielämässä näiden lämpötilojen eroavaisuus on helppo todeta vertaamalla auringossa lämmentyneen kuuman uuden asfaltin lämpötilaa saman alueen ilman lämpötilaan. Pintalämpötilamittauksiin pohjautuvia lämpösaarekeilmiön mallinnustapoja on monenlaisia, alkaen melko yksinkertaisista (esimerkiksi Marando ym. 2022) päätyen melko monimutkaisiin (esimerkiksi Broadbent ym. 2019). Pintalämpötilapohjaisten mallien rajoite on tyypillisesti se, etteivät ne huomioi ilman sekoittumisen vaikutusta lämpötiloihin millään tavalla.

Tähän mallinnukseen valittiin maankäyttöluokituksen painoihin perustuva lähestymistapa. Toisin kuin pintalämpötilapohjaisessa mallinnuksessa, maankäyttöluokituksen perustuvan lähestymistavan soveltamiseen on olemassa käytännössä vain yksi malli: Stanfordin yliopiston kehittämän INVEST-nimisen ekosysteemipalveluiden mallinnustyökalun kaupunkiviilennyspalvelumalli (englanniksi Urban Cooling Model, lyhyemmin UCM). Tässä mallissa tarvitaan maankäyttötiedon lisäksi referenssitieto alueen kokonaishaidunnasta eli niin kutsutusta evapotranspiraatiosta (ET).

Mallissa arvioidaan etukäteen karkeasti lämpösaarekeilmion suurin mahdollinen vaikutus etukäteen esimerkiksi sääasematietojen perusteella sekä annetaan eri maankäyttöluokille seuraavat kertoimet:

- paljonko maankäyttöluokan haihdunta poikkeaa alueen kokonaishaidunnasta
- lukeutuuko maankäyttöluokka viheralueisiin vai ei
- mikä on maankäyttöluokan maanpintaa varjostavan kasvillisuuden osuus
- mikä on maankäyttöluokan maanpinnan heijastavuus

Lisäksi mallille annetaan seuraavat yleiset painokertoimet:

- varjostuskerroin (oletus 0.6)
- heijastuskerroin (oletus 0.2)
- haihduntakerroin (oletus 0.2)
- viheralueiden viilennysvaikutuksen etäisyysarvio (oletus 100 m)
- ilman sekoittumisen etäisyysarvio (oletus 500 m)

Malli laskee varjostus-, heijastus- ja haihduntatiedoista jokaiselle maanpeiteluokalle viilennyskykyindeksi (englanniksi Cooling Capacity Index, lyhyemmin CC_i). Näistä tiedoista lasketaan oletusarvoinen viheralueiden viilennysvaikutus, josta saadaan edelleen lämpömitigaatioindeksi (englanniksi Heat Mitigation Index, lyhyemmin HM_i). Siitä lasketaan ilman sekoittumisen etäisyysarvion perusteella edelleen arvio ilman lämpötilasta. Mallin tarkempi matemaattinen toiminta on dokumentoitu erikseen mallin varsinaisessa käyttöohjeessa³, eikä sitä siksi käydy läpi tässä. Esimerkkejä mallin soveltamisesta löytyy tieteellisestä kirjallisuudesta (mm. Bosch ym. 2021; Hamel ym. 2024; Hu ym. 2024). Mallinnuksen yksinkertaistamiseksi tässä tutkimuksessa maankäyttöluokkia ei painotettu rakentamisen intensiteetillä – mikä käytännössä tarkoittaa rakennusten keskimääräistä kerrosalan suhdetta maapinta-alaan – joten mallilla ennustettiin tässä vain päivälämpötiloja.

Mallin heikkoutena on tulosten riippuvuus mallin monista painokertoimista, minkä vuoksi mallille on kehitetty kalibrointityökalu, jonka tarkoitus on helpottaa parametrien asettamista (Bosch ym. 2021). Hamel ym. (2024) on kuitenkin todennut, että malli tuottaa kalibroimattakin hyviä tuloksia, jos mallin laskemia ilman lämpötila-arvioita ei oteta absoluuttisina, vaan niitä sen sijaan vain verrataan tilanteeseen, jossa kasvillisuutta ei olisi lainkaan. Hamelin ym. (2024) mukaan kalibroituakaan mallin arviot ilman absoluuttisista päivälämpötiloista eivät ole riittävän luotettavia käytettäväksi sellaisinaan.

Tässä pilottitutkimuksessa pyrittiin sekä kalibroimaan mallin parametrit että testaamaan itse mallinnusta.

Typologia (fyysinen tili)

Yksinkertaisuuden vuoksi tilin ekosysteemitypologiana käytettiin suoraan maanpeiteaineiston maankäyttöluokkia. Luokitus ei vastaa EU:n ekosysteemitypologiaa, mutta koska kunnallisesta ekosysteemitilinpäädöstä ei ole säädetty laissa, sen käyttäminen ei ole välttämätöntä. Käytetyt

³ Mallin dokumentaatio: http://releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/en/urban_cooling_model.html

maanpeiteaineistot eivät myöskään luokituksensa puolesta ole yhteensopivia EU:n typologian kanssa. Vaihtoehtoiset, EU:n typologian kanssa yhteensopivat aineistot, kuten CORINE-maanpeiteaineisto, eivät mahdollista yhtä lyhyttä tilikautta (CORINE-aineiston julkaisuväli on noin kuusi vuotta) ja ovat spatiaaliselta tarkkuudeltaan merkittävästi heikompia, jolloin pienten viheralueiden merkitys jäisi huomiotta.

Taulukko 1. Pilotissa käytetty ekosysteemitypologia. Tampereen vuoden 2022 aineiston kahta matalinta puustoluokkaa kohdeltiin yhtenä luokkana, jotta säilytettiin yhteensopivuus vuoden 2020 aineiston kanssa. Tiestön osalta päällysteeltään tuntemattomat tiet oletettiin päällystetyiksi. Päällystämättömien teiden osuus vuoden 2022 aineistossa oli vähäinen. (Taulukossa molemmat = Tampere ja Espoo.)

Ekosysteemin tyyppi (maankäyttöluokka)	Vuosi / vuodet	Kunta / kunnat
Tie (päällyste tuntematon)	2020	Tampere
Tie (päällystetty)	2022, 2024	Molemmat
Tie (päällystämätön)	2022, 2024	Molemmat
Rakennus	Kaikki	Molemmat
Muu vettä läpäisemätön pinta	Kaikki	Molemmat
Pelto	Kaikki	Molemmat
Muu matala kasvillisuus	Kaikki	Molemmat
Puusto, 2–10 m	2020	Tampere
Puusto, 2–4 m ja 4–10 m	2022	Tampere
Puusto, 2–10 m	2022, 2024	Espoo
Puusto, 10–15 m	Kaikki	Molemmat
Puusto, 15–20 m	Kaikki	Molemmat
Puusto, yli 20 m	Kaikki	Molemmat
Avokallio	Kaikki	Molemmat
Paljas maa	Kaikki	Molemmat
Vesialue	Kaikki	Molemmat
Merialue	2022, 2024	Espoo

Mallinnuksen ohjelmistoympäristö (fyysinen tili)

InVEST-mallinnustyökalu (Natural Capital Alliance 2025) on Pythonilla kirjoitettu ohjelmisto, joka on ladattavissa työpöytäohjelmistona Windowsille ja Macintoshille Stanfordin yliopiston verkkosivuilta⁴. Tässä työssä käytettiin ohjelmiston versiota 3.15.1. Komentorivipohjaisesti työkalu kuitenkin toimii millä tahansa Python-koodia suorittavalla alustalla, joten prosessi on tältä osin varsin käyttöjärjestelmäriippumaton.

Mallin kalibrointia pyrittiin testaamaan Boschin ym. (2021) kehittämällä, niin ikään Python-pohjaisella InVEST UCM Calibration -työkalulla (jäljempänä vain kalibrointityökalu). Sekä itse InVEST että

⁴ Työpöytäohjelmiston lataussivu: <https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest/invest-downloads-data>

kalibrointityökalu asennettiin conda-forge-jakelun⁵ avulla miniconda-asennusympäristöön seuraavankaltaista ympäristötiedostoa (.env) käyttäen:

```
channels:  
- conda-forge  
dependencies:  
- invest-ucm-calibration  
- natcap.invest
```

Miniconda ja conda-forge ovat data-analyysikäytössä tavanomainen asennusympäristö, joiden yksityiskohtaista asentamista ja käyttöä ei kuvata tässä. Ympäristö on saatavilla ainakin Windowsille, Macintoshille ja Linuxille.

Haihduntarastereiden luonnissa käytettiin apuna PostGIS-paikkatietolaajennuksin varustettua PostgreSQL-tietokantaa, ja vektorimuotoiset tietolähteet säilytettiin pääosin kantaan tallennettuna, joten esimerkkikomennossa oletetaan, että PostgreSQL-kannan käyttöön on mahdollisuus. Jos sellaista ei haluta käyttää, komennot on mahdollista muuttaa sellaisiksi, että käytetään vain Geopackage-muotoisia tiedostotietokantoja. Tämä saattaa hidastaa joitakin prosesseja, mutta toisaalta myös yksinkertaistaa esimerkiksi käytettyjä komentoja. Varsinaiset kalibrointi- ja mallinnusprosessit edellyttävät, että lähtöaineistot ovat tallennettuina tiedostoihin.

Mallinnuksen vaatimat laitteistoresurssit (fyysinen tili)

Mikäli InVEST-mallin kanssa käytetään spatiaaliselta tarkkuudeltaan hyvin tarkkaa maanpeiteaineistoa, kuten tässä pilottihankkeessa käytettiin (aineistojen pistekoko oli 0,5 m × 0,5 m), analyysityökalut kasvattavat prosessinaikaiset väliaikaistiedostot nopeasti erittäin suuriksi. Tämän vuoksi analyysia varten on syytä varata käyttöön minimissäänkin useita teratavuja vapaata levytilaa. Analyysit suoritettiin Tieteen tietotekniikan keskus CSC:n supertietokone Puhdilla, mutta ne olisi yhtä hyvin voinut suorittaa toteuttaa tehokkaalla pöytäkoneella tai palvelimella, jossa on useita teratavuja vapaata levytilaa tilapäisille tiedostoille (supertietokoneen laskentakapasiteettia tässä ei varsinaisesti tarvita). Puhdilta saatiin nopeasti varattua projektitiimin käyttöön kaksikymmentä tebitavua⁶ (TiB) levytilaa, mikä riitti hyvin kahden kunnan mallinnuksen tiedoille ja kalibrointi-datalle. Yhden kunnan tiedoille kymmenen tebitavua olisi riittänyt hyvin. Puhdin laskentaresursseista käytettiin Tampereen tietojen mallinnukseen kuutta suoritinydintä – Puhdin yksittäiset suorittimet ovat 20-ytimisiä Intel Xeon Cascade Lake -suorittimia, kellotaajuudeltaan 2,1 GHz – ja 48 gibitavua muistia, mutta mallin valmistuttua suorittimien käyttötehokkuus oli vain 26,3 % ja keskusmuistin käyttötehokkuus 61,7 %, minkä vuoksi Espoon mallinnuksia varten resurssit pienennettiin neljään ytimeen ja 40 gibitavuun muistia. Neljällä ytimellä suorittimen käyttötehokkuus oli noin 40 %.

Laskennan voi siis tarkoillakin aineistoilla hyvin suorittaa yksittäisellä pilvipalvelimella, tavallisella pöytäkoneella tai jopa tehokannettavalla, jos siinä vain on runsaasti keskusmuistia, mielellään vähintään 32 GiB. Jos käytetään hyvin tarkkoja, pistekooltaan kahden metrin tai tarkempia maanpeitesterasteita, niin levytilaa kuitenkin tarvitaan erityisen runsaasti. Tämän vuoksi käytettäessä

⁵ Jakelun lataussivu ja linkit ohjeisiin: <https://conda-forge.org/download/>

⁶ Nimityksistä: yksi teratavu (TB) = 1 000⁴ tavua, yksi tebitavu (TiB) = 1 024⁴ tavua. Teratavulla tarkoitetaan arkikielessä usein myös jälkimmäistä, mutta nimitys on epätarkka. Gigatavu ja gibitavu (GiB) vastaavasti 1 000³ ja 1 024³.

tavallista tietokonetta koneeseen on syytä hankkia analyysia varten erillinen, suurikokoinen levy. Pilviympäristöissä tallennustilan suuri tarve saattaa ympäristön hinnoittelumallista riippuen kasvattaa kustannuksia suuresti. On syytä muistaa, että laskennan vaatima levytila on luonteeltaan tilapäistä, eikä esimerkiksi sen varmuuskopiointi ole siksi tarpeen. Levyn mahdollistaman luku- ja kirjoitusnopeuden ei myöskään tarvitse olla erityisen suuri, joten halvin riittävän suuri mekaaninen levy täyttää edellä mainitut tarpeet hyvin. Levyn koossa ei ole syytä pihistellä, koska levytilan mahdollinen loppuminen kesken analyysiajon kaataa ajon, mikä pakottaa aloittamaan prosessin alusta, ja kasvattaa siten analyysin vaatimaa kokonaisaikaa suuresti.

Yksittäisen mallinnusajon laskenta kestää useita päiviä, ja sitä suorittavaa konetta ei ole syytä käyttää mihinkään muuhun työskentelyyn samalla. Tampereen osalta vuoden 2022 tietojen mallinnus kesti edellä mainituin resurssein noin viisi ja puoli vuorokautta. Koska luotettavat tulokset vaativat vertailun hypoteettiseen tilanteeseen, jossa kasvillisuutta ei ole (Hamel ym. 2024), kaksinkertaistuu mallinnukseen tarvittava aika, jos mallintava tietokone ei ole tarpeeksi tehokas suorittaakseen useita mallinnuksia samanaikaisesti. Tehokkaan ympäristön suurin hyöty saadaan siis usean samanaikaisen mallinnusajon mahdollistamisesta.

Arvottamismenetelmät (rahamääräinen tili)

Ilman lämpötilan viilennyspalvelun arvon laskeminen kuolleisuuden ehkäisemiseen perustuen suoritetaan kolmessa vaiheessa:

1. Arvioidaan liiallisen kuumuuden aiheuttama ylimääräinen kuolleisuus käyttämällä hellepäivän keskilämpötilaa (tulos saadaan InVEST-mallista). Tämä arvio tehdään kahdella vaihtoehdolla:
 - a. Oikeaa maankäyttöä ja ekosysteemityyppiluokkia vastaavassa tilanteessa.
 - b. Tilanteessa, jossa viheralueita ei ole.

Ylimääräinen kuolleisuus arvioitiin käyttämällä lämpötila–kuolleisuus altistus–vastesuhteita (Exposure–Response Functions, ERF:t), joka kuvaa päivittäiseen keskilämpötilaan liittyvää kuolleisuuden suhteellista riskiä (Relative Risk, RR) (Massetot ym., 2023). RR on suhdeluku, jota käytetään ilmaisemaan kuolleisuusriskin suuruus tietyssä lämpötilassa suhteessa kuolleisuusriskiin lämpötilassa, jossa kuolleisuus on pienimmillään (Massetot ym. 2023, Gasparini ja Leone, 2014, Huang ym., 2023). Tässä projektissa käytetään Masselot ym. (2023) julkaisemaa ERF-funktiota, koska se tarjoaa ERF-parametrit sekä kansallisella tasolla että kaupunki- ja ikäryhmätasolla. Se kattaa yhdeksän suomalaista kaupunkia (Helsinki, Tampere, Turku, Oulu, Espoo, Vantaa, Lahti, Kuopio, Jyväskylä). Vaihtoehtoisesti jos kunnalla on resursseja tehdä yhteistyötä Ilmatieteen laitoksen (FMI) kanssa paikallisen ERF:n arvioimiseksi (esimerkiksi Ruuhelan ym. (2021) mallin kaltaisesti), voidaan käyttää myös paikallista mallia.

2. Verrataan näiden kahden tilanteen välistä ylimääräisen kuolleisuuden eroa, jotta voidaan laskea viilennysekosysteemipalvelun pelastamien ihmishenkien määrä.
3. Arvotetaan säästetyt ihmishenget käyttämällä ihmishengen tilastollisen arvon (Value of Statistical Life, VSL) lähestymistapaa.

Kuolleisuuskustannusten arviointi VSL-lähestymistavalla noudattaa Huangin ym. (2025) ohjeita ja hyödyntää OECD:n (2012) EU-27-maille asettamaa menetetyin ihmishengen arvoa. Menetetyin ihmishengen arvo on siirretty Suomen tasolle vuosille 2020, 2022 ja 2024 noudattaen Huangin ym. (2025) ja OECD:n (2012) ohjeita. OECD:n odotetaan päivittävän menetetyin ihmishengen arvon vuoden 2025 lopussa käyttämällä meta-analyysia ja uudempaa (vuoden 2012 jälkeistä) ilmoitettuihin preferensseihin perustuvaa tutkimustietoa [1].
Suositus: Jos päivitetty VSL on saatavilla, sitä on suositeltavaa käyttää.

Ohjelmistot arvon määrittämiseen (rahamääräinen tili)

ERF-parametrien poimiminen Masselot ym. (2023) julkaisusta ja RR-arvon määrittäminen Suomen kaupungeissa voidaan suorittaa R-ohjelmistolla. Kun RR-arvot tietyissä lämpötiloissa on arvioitu, ylimääräisen kuolleisuuden kaupunkikeskiarvon ja ilman viilennyspalvelun arvon laskenta voidaan tehdä R-ohjelmistolla tai Excel-tiedostossa.

Huomioita ekosysteemitilistä ja aineistoista

Kaikki käytetyt lähdeaineistot on listattu taulukossa Taulukko 2.

Koska haihduntadata ei sisällä merialueen haihduntaa, oletettiin merialueen haihdunnan Ilmatieteen laitoksen verkkosivujen (2025b) tietoihin perustuen olevan yhtä suurta kuin sadannan. Sadantatiedot saatiin ottamalla pilottikunnan lähinnä rannikkoa sijaitsevan Espoon Tapiolan sääaseman kuukausittaiset sadesummat heinäkuulta 2022 (35,3 mm) ja 2024 (51,2 mm) ja jakamalla arvot heinäkuun päivien lukumäärällä, saaden tuloksiksi 1,14 mm (2022) ja 1,65 mm (2024). Edellä mainitut arvot poltettiin merialueen haihdunnaksi haihduntarastereihin. Maa-alueen haihduntatiedot kerättiin myös vuodelta 2023 heinäkuun 11. päivän ja elokuun 10. päivän väliseltä ajalta, koska mallin kalibrointiin käytettiin Tampereella vuonna 2023 tuona ajanjaksona mitattua lämpötiladataa.

Tietolähteet

Taulukko 2. Ekosysteemien viilennysvaikutusta mallinnettaessa käytetyt lähdeaineistot.

Aineisto	Käyttö	Datan tyyppi	Tarkkuus / mittakaava	Alueellinen laajuus	Ajallinen kattavuus	Päivityssykli	Lähde	Meta-data
Hallinnolliset rajat	tilinpidon aluerajaus (osittain)	polygoni	1:100 000	koko maa	2023	tarvittaessa	MML, Syke, TK	linkki
Taustakartta	viilennyspalvelu (kartta)	rasteri	1:5 000– 1:8 000 000	koko maa	2024	jatkuva	MML	linkki
Tampereen maanpeiteaineisto 2020	typologia (Tampere)	rasteri	0,5 × 0,5 m	Tampereen nk. kantakaupunki	2020	uusi aineisto kahden vuoden välein	Kunta	linkki
Tampereen maanpeiteaineisto 2022	typologia (Tampere)	rasteri	0,5 × 0,5 m	Tampereen nk. kantakaupunki	2022	uusi aineisto kahden vuoden välein	Kunta	linkki
Helsingin seudun maanpeiteaineisto 2022	typologia (Espoo)	rasteri	0,5 × 0,5 m (saatavana myös 0,25 × 0,25 m)	Espoo, Järvenpää, Helsinki, Kauniainen, Kirkkonummi, Vantaa	2022	uusi aineisto kahden vuoden välein	HSY	linkki
Helsingin seudun maanpeiteaineisto 2024	typologia (Espoo)	rasteri	0,5 × 0,5 m	Espoo, Järvenpää, Helsinki, Kauniainen, Kerava, Kirkkonummi, Nurmijärvi, Tuusula, Vantaa	2024	uusi aineisto kahden vuoden välein	HSY	linkki
Valuma-aluejako 1990	haihdunta-rasteri	vektori	lähdeaineiston tarkkuus 1:50 000	koko maa	1990	ei päivitys	Syke	linkki

Vesistömallijärjestelmän haihduntadata	haihduntarasteri	välilyönnin eroteltu tekstitiedosto	valuma-alueiden päiväkohtaiset tiedot	vuoden 1990 valuma-aluejaon 3. jakovaiheen mukainen	1.1.1962 alkaen	jatkuva	Syke	linkki
Global Evaporation Database	vaihtoehtoinen haihduntarasteri, ei käytetty	rasteri	n. 0,5 × 0,5 kulmaminuuttia (1/120)°	maailmanlaajuinen	ennuste vuosille 2021–2040	myös ennuste vuosille 2041–2060	EK, NBSDC	linkki
Säähavainnot	referenssilämpötilat	Excel worksheet (xlsx)	yksittäisten havaintoasemien tiedot	koko maa	riippuu havaintoasemasta	riippuu havaintoasemasta, yleensä minuutteja	FMI	linkki
TAPSI-hankkeen lämpötilahavainnot	mallin kalibrointi	välilyönnin eroteltu tekstitiedosto	yksittäisten havaintoasemien tiedot	Tampereen nk. kantakaupunki	useimmat havaintoasemat 11.7.2023 alkaen	yleensä 12 mitausta tunnissa	FMI	linkki
Tampereen kaupungin lämpötilahavainnot	mallin kalibrointi	viikottaiset CSV-tekstitiedostot	yksittäisten havaintoasemien minimi- ja maksimiarvot	Tampereen nk. kantakaupunki	useimmat havaintoasemat 10.7.2023 alkaen	päivittäin	Kunta	linkki
Parametrit ja historiallinen kaupungin lämpötilatieto EFR:lle	kaupunki-EFR	numeerinen, Excel-taulukko (xlsx)	Kuntataso ja viisi ikäryhmää 20-44 v. 45-65 v. 65-74 v. 75-84 v. 85+ v.	Kunnat (Helsinki, Tampere, Turku, Oulu, Espoo, Vantaa, Lahti, Kuopio, Jyväskylä) ja kansallinen keskiarvo	Julkaistu v. 2023. Arvioitu perustuen v. 2000-2019 tietoihin	ei päivity	Masselot and Gasparrini (2023)	linkki

Väestötieto	ylimääräisen kuolleisuuden arviointi	numeerinen, Excel- taulukko (xlsx)	Kuntatasolla ikä- ja sukupuoliryhmittäin	koko maa	1972-2024	vuosittain	Tilastokeskus	linkki
Kuolleiden määrä	ylimääräisen kuolleisuuden arviointi	numeerinen, Excel- taulukko (xlsx)	Kuntatasolla ikä- ja sukupuoliryhmittäin	koko maa	1990-2024	vuosittain	Tilastokeskus	linkki
CPI	VSL:n kohdistamiseksi tarkasteltavalle vuodelle	numeerinen, Excel- taulukko (xlsx)	Kansallinen	Kaikki OECD- maat	2005-2024	vuosittain	OECD	linkki
Bruttokansantuote henkeä kohden ostovoimastandardissa (BKT per hlö - ostovoimastandardi)	VSL:n kohdistamiseksi Suomen tasolle	numeerinen, Excel- taulukko (xlsx)	Kansallinen	Kaikki EU-maat ja EU-taso	2013-2024	vuosittain	Eurostat	linkki
Ostovoima-pariteetti (va-luutan todellinen ostovoima eri maissa) (PPP)	VSL:n kohdistamiseksi euroiksi (ei tehty tässä analyysissä, mutta hyödyllinen, jos uusi VSL julkaistaan)	numeerinen, Excel- taulukko (xlsx)	Kansallinen	Kaikki OECD-maat	2020-2024	vuosittain	OECD	linkki

Organisaatioiden lyhenteet:

EK = Euroopan komissio

FMI = Ilmatieteen laitos

HSY = Helsingin seudun ympäristöpalvelut

MML = Maanmittauslaitos

NBSDC = National Basic Science Data Center (Kiina)

TK = Tilastokeskus

Analyysin kulku: fyysinen ekosysteemipalvelutili

Johdanto

Lähdeaineistojen valmistelu analyysikäyttöön käsitti kolme työlästä työvaihetta:

1. Maanpeiteaineistojen esikäsittelyyn
2. Haihduntarastereiden luonnin
3. Biofysikaalisten taulujen rakentamisen

Näistä maanpeiteaineistojen esikäsittely oli datamäärällisesti työläin: suuritarkkuuksiset, tarkkuudeltaan 0,5 m × 0,5 m maanpeiteaineistot ovat suurikokoisia tiedostoja, joita on työläs käsitellä. Aineiston käsittely pienempien tiedostojen tapaan ilman ennakkosuunnittelua saattaa helposti johtaa levytilan loppumiseen tai hyvin kauan kestäviin tiedostojen kopiointiaikoihin verkkoyhteyksien yli.

Tietojenkäsittelyllisesti vaativin työvaihe puolestaan oli haihduntarasterien luonti: aineisto piti irrottaa Syken Vemala-aineistosta, viedä tietokantaan, käsitellä sellaiseen muotoon, että se voitiin yhdistää vuoden 1990 valuma-aluejaon valuma-alueisiin, ja lopulta rasteroida. Koska haihdunnan kokonaispainoarvo mallissa on kuitenkin suhteellisen pieni, voi tätä työvaihetta myös yksinkertaistaa käyttämällä Vemala-aineiston sijaan Global Evapotranspiration Database -tietokantaa, josta on saatavilla valmiita haihduntarastereita.

Biofysikaalisten taulujen rakentaminen puolestaan oli tieteellisesti työläin vaihe: taulun kertoimien arvoja varten jouduttiin perehtymään useiden eri tieteenalojen artikkeleihin. Projektin tarkoituksena oli kuitenkin luoda taulu, jota voitaisiin käyttää useissa eri kunnissa samantapaisilla maanpeiteaineistoilla ilman, että vaadittavia kertoimia joudutaan etsimään kirjallisuudesta toistamiseen. Mikäli malli kalibroidaan, muodostaa lämpötilamittaustiedon esikäsittely vielä ylimääräisen työvaiheen.

Maanpeiteaineistojen esikäsittely

Tampereen maanpeiteaineistot vuosilta 2020 ja 2022 saatiin pyydettyä käyttöön Tampereen kaupungilta suoraan mallinnukseen sopivana rasteriaineistona. Vuoden 2020 aineiston no data -arvo kuitenkin kirjoitettiin uudelleen 65 535:ksi vastaamaan vuoden 2022 rasteria, jotta no data -arvo 255 ei menisi sekaisin numeraalisesti sitä lähellä olevien maanpeiteluokkien kanssa. Uudelleenkirjoitus tehtiin `gdalwrap`⁷ -komentorivityökalulla seuraavasti:

```
gdalwarp -if Gtiff -of Gtiff -ovr NONE -s_srs "EPSG:3878" -t_srs "EPSG:3878" -srcband 1 -dstband 1 -srcnodata 255 -dstnodata 65535 -ot Uint16 -co TILED=YES -co COMPRESS=DEFLATE -co PREDICTOR=2 -co ZLEVEL=9 -co NUM_THREADS=1 .\maanpeite_2020_orig.tif .\maanpeite_2020.tif
```

QGISin mukana toimitettavaan GDAL-kirjastoon kuuluvia komentorivityökaluja käytettäessä on aina syytä käyttää tiedostoa tiivistäviä `-co` (creation option) -parametreja: muussa tapauksessa

⁷ `gdalwrap`-työkalun dokumentaatio: <https://gdal.org/en/stable/programs/gdalwarp.html>

luotava rasteritiedosto vie monisatakertaisen määrän levytilaa, ja tila yleensä loppuu nopeasti! Kokonaislukuarvoista koostuvan maanpeiterasterin kanssa aina suositeltavat -co-parametrit ovat:

- -co COMPRESS=DEFLATE (pakkaustyyppi)
- -co PREDICTOR=2 (kokonaislukurastereilla 2, liukulukurastereilla 3)
- -co ZLEVEL=9 (pakkauksen taso; 9= suurin mahdollinen arvo)

Mikäli työkaluja käytetään QGISin graafisella käyttöliittymällä Processing Toolboxin kautta, saadaan edellä mainitut parametrit käyttöön kussakin työkalussa valitsemalla kohdasta *Advanced Parameters* → *Additional creation options [optional]* → *Profile* -listasta vaihtoehto *High Compression*. Kyseiset parametrit varmistavat tehokkaimman mahdollisen pakkauksen käytön. Lisäksi on aina suositeltavaa käyttää seuraavia -co-parametreja:

- -co TILED=YES (tehokkaampi tiedoston sisäinen rakenne)
- -co NUM_THREADS=1 (säikeiden määrä, riippuu koneen suorittimesta)

Graafista käyttöliittymää käytettäessä edellä mainittuja parametreja ei ole valmiina, vaan ne on syötettävä käsin *Additional command-line parameters [optional]* -kohtaan. Suuria rastereita käytettäessä on yleensä muutoinkin suorituskykyisistä suositeltavaa käyttää komentoriviä suoraan ja rajoittaa QGISin graafisen käyttöliittymän käyttö tulosten tarkasteluun.

HSY:n maanpeiteaineisto, joka on ladattavissa verkosta suoraan vektorimuodossa, toimitettiin niin ikään erikseen pyydettyä rasterina, mutta valitettavasti pieninä irtotiilinä (vuoden 2024 aineistossa oli Espoon ulkopuoliset alueet mukaan lukien 3 343 tiiltä, mutta vuoden 2022 aineistossa vain muutamia satoja), jotka tuotiin kaikki QGISiin – suuren määrän TIFF-tiedostoja saa tuotua yhtä aikaa tasoiksi vetämällä ja pudottamalla ne Windowsin tiedostoikkunasta *Layers*-listaan – ja yhdistettiin QGISin *Build virtual raster* -työkalua käyttäen yksittäisiksi virtuaalirastereiksi. Yksittäisten rastereiden valinta *Build virtual raster* -työkalulla on erittäin hidasta, mikäli osarastereita on tuhansia, mutta tämän voi kiertää viemällä komennon parametrit JSON-tiedostoon ja lisäämällä tiedostorivit siihen tekstieditorissa sekä tuomalla tiedoston sisältö leikepöydän kautta QGISin *Build virtual raster* -työkaluun. Kaikki HSY:n vuoden 2024 rasterit yhdistävä JSON-tiedosto näytti vastaavalta kuin kuvissa

```
1 Search (Ctrl+Shift+F)
2   "area_units": "m2",
3   "distance_units": "meters",
4   "ellipsoid": "EPSG:7019",
5   "inputs": {
6     "ADD_ALPHA": false,
7     "ASSIGN_CRS": "EPSG:3879",
8     "EXTRA": "",
9   > "INPUT": [ ...
3353   ],
3354   "OUTPUT": "Y:/[REDACTED]/COUNTICOS/hsy_land_cover/HSMPA2024.vrt",
3355   "PROJ_DIFFERENCE": false,
3356   "RESAMPLING": 0,
3357   "RESOLUTION": 2,
3358   "SEPARATE": false,
3359   "SRC_NODATA": "4294967295"
3360 }
3361 }
```

Kuva 1 ja

```
9   "INPUT": [
10     "Y:/[REDACTED]/COUNTICOS/hsy_land_cover/2024_geotiff-basic-uint32-50cm/HSMPA2024_631459.tif",
11     "Y:/[REDACTED]/COUNTICOS/hsy_land_cover/2024_geotiff-basic-uint32-50cm/HSMPA2024_631460.tif",
12     "Y:/[REDACTED]/COUNTICOS/hsy_land_cover/2024_geotiff-basic-uint32-50cm/HSMPA2024_631461.tif",
```

Kuva 2.

```
1 Search (Ctrl+Shift+F)
2   "area_units": "m2",
3   "distance_units": "meters",
4   "ellipsoid": "EPSG:7019",
5   "inputs": {
6     "ADD_ALPHA": false,
7     "ASSIGN_CRS": "EPSG:3879",
8     "EXTRA": "",
9   > "INPUT": [ ...
3353   ],
3354   "OUTPUT": "Y:/[REDACTED]/COUNTICOS/hsy_land_cover/HSMPA2024.vrt",
3355   "PROJ_DIFFERENCE": false,
3356   "RESAMPLING": 0,
3357   "RESOLUTION": 2,
3358   "SEPARATE": false,
3359   "SRC_NODATA": "4294967295"
3360 }
3361 }
```

Kuva 1. Esimerkki Build virtual raster -työkalulle JSON-muodossa syötettävistä parametreista. INPUT-muuttujan arvo, joka koostuu 3 343 rivistä, on piilotettu.

```
9   "INPUT": [
10     "Y:/[REDACTED]/COUNTICOS/hsy_land_cover/2024_geotiff-basic-uint32-50cm/HSMPA2024_631459.tif",
11     "Y:/[REDACTED]/COUNTICOS/hsy_land_cover/2024_geotiff-basic-uint32-50cm/HSMPA2024_631460.tif",
12     "Y:/[REDACTED]/COUNTICOS/hsy_land_cover/2024_geotiff-basic-uint32-50cm/HSMPA2024_631461.tif",
```

Kuva 2. Esimerkki kuvan 1 INPUT-muuttujan arvoista.

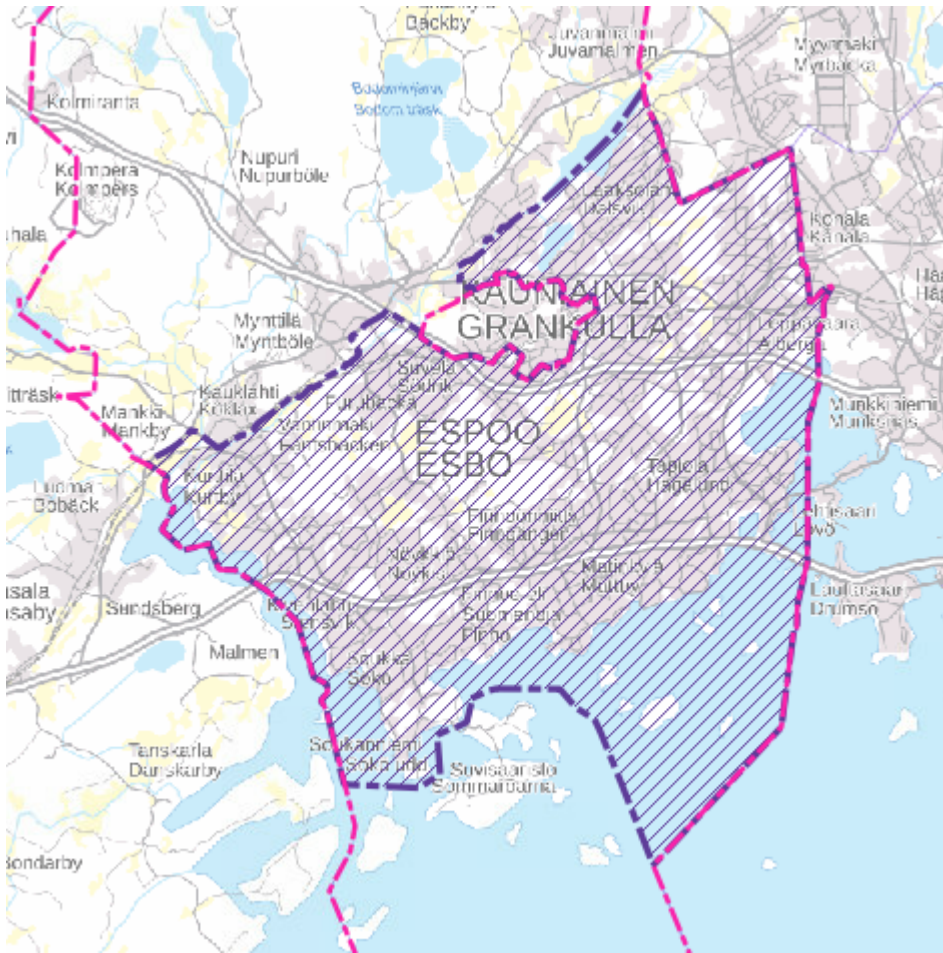
Näin luodut virtuaalirasterit muutettiin edelleen `gdal_translate` -komentorivityökalulla yksittäisiksi `uint16`-tyyppisiksi `geotiff`-rastereiksi. Yksityiskohtaisia komentoja ei esitetä tässä, koska kaikkia työvaiheita ei kirjattu ylös kaikkine yksityiskohtineen, ja `gdal_translate` -työkalun⁸ ja muidenkin GDAL-työkalujen dokumentaatioon perehtyminen on joka tapauksessa erittäin suositeltavaa isoja rastereita käsiteltäessä.

Edellä mainittujen formaattimuunnosten lisäksi vuoden HSY:n 2022 rasteri kirjoitettiin Tampereen vuoden 2020 rasteria vastaavasti `gdalwarp`-työkalulla uudelleen siten, että sen `no data` -arvo, joka oli lähdeaineistossa likimain -3.40×10^{28} ja muuttui `uint16`-muotoon muunnettaessa nolllaksi, muutettiin 65 535:ksi vastaamaan vuoden 2024 rasterin arvoja. HSY:ltä hankittiin vertailun vuoksi myös vuoden 2020 rasteriaineisto, jota kuitenkin ei pidetty vertailukelpoisena, koska se oli luotu teknisesti eri tavalla, vaikka lopputuote onkin vastaava. Tätä aineistoa ei kuitenkaan lopulta aikarajoitteiden vuoksi edes kokeiltu mallinnuskäytössä.

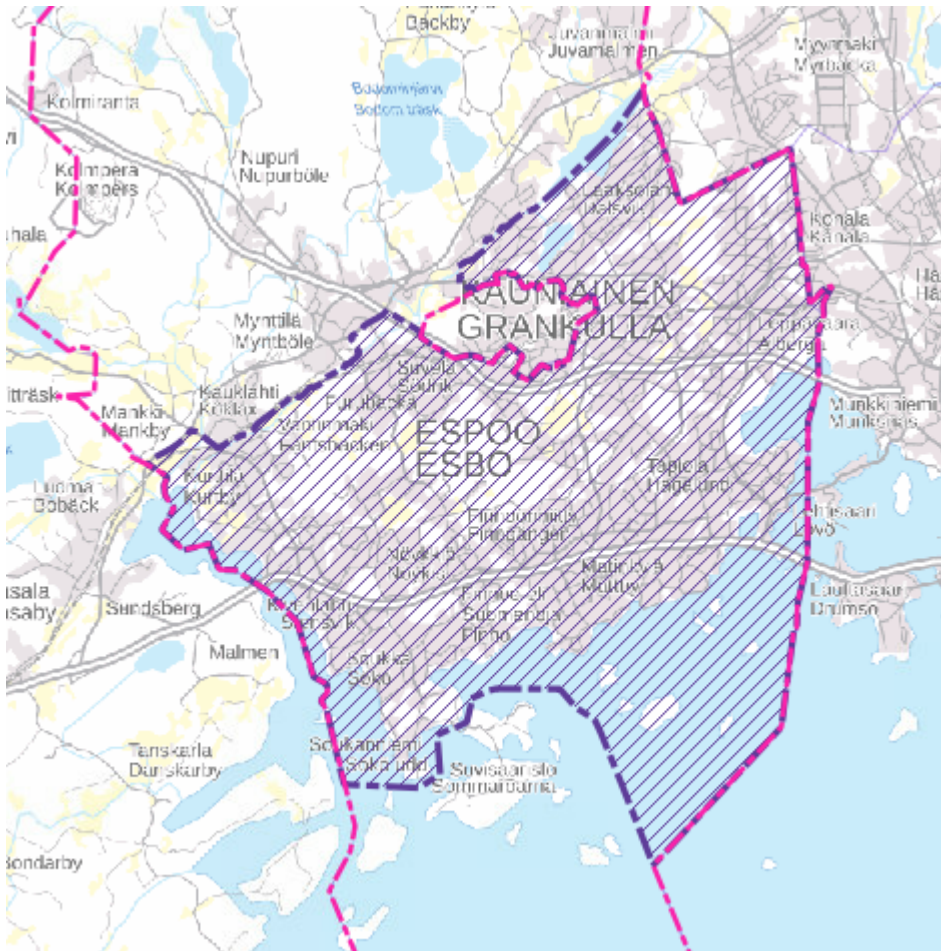
Alkuperäinen tarkoitus oli luoda Espoon rajojen ympärille joka kohdasta rajojen ulkopuolelle vähintään kaksi kilometriä ulottuva suorakaiteen muotoinen laatikko ja käyttää sitä aluerajauksena kuntarajan sijaan, jotta InVEST-mallin ilman sekoittumista ja viheralueiden viilennysvaikutusta määrittelevät kertoimet pätsivät myös kuntien raja-alueilla. Tämä rajaus luotiin QGISin *Minimum bounding geometry* ja *Buffer*-työkalujen avulla, reprojektoitiin edelleen ETRS89 / GK25FIN -koordinaatistoon, ja kustakin HSY:n rastereista leikattiin `gdalwarp`-työkalulla tähän laatikkoon sopiva alue.

*Tätä kuntarajat ylittävää aineistoa ei kuitenkaan lopulta käytetty suorituskykyisistä, vaan analyysi suoritettiin Espoolelle ainoastaan osalle kunnasta. Pois jätettiin käytännössä Kehä III:n pohjoispuolelle sijoittuvat alueet sekä Suvisaaristo, eli kunnan tilastoalueet 45, 51, 62, 63, 64, 71 ja 72. Jäljelle jääneet alueet yhdistettiin yhdeksi alueeksi QGISin *Dissolve*-työkalulla ja alueen sisälle jääneiden tilastoalueiden rajojen aiheuttamat pienet reiät poistettiin *Delete holes* -työkalulla. Lopputulos on esitetty viivoitettuna kuvassa*

⁸ `gdal_translate` -työkalun dokumentaatio: https://gdal.org/en/stable/programs/gdal_translate.html

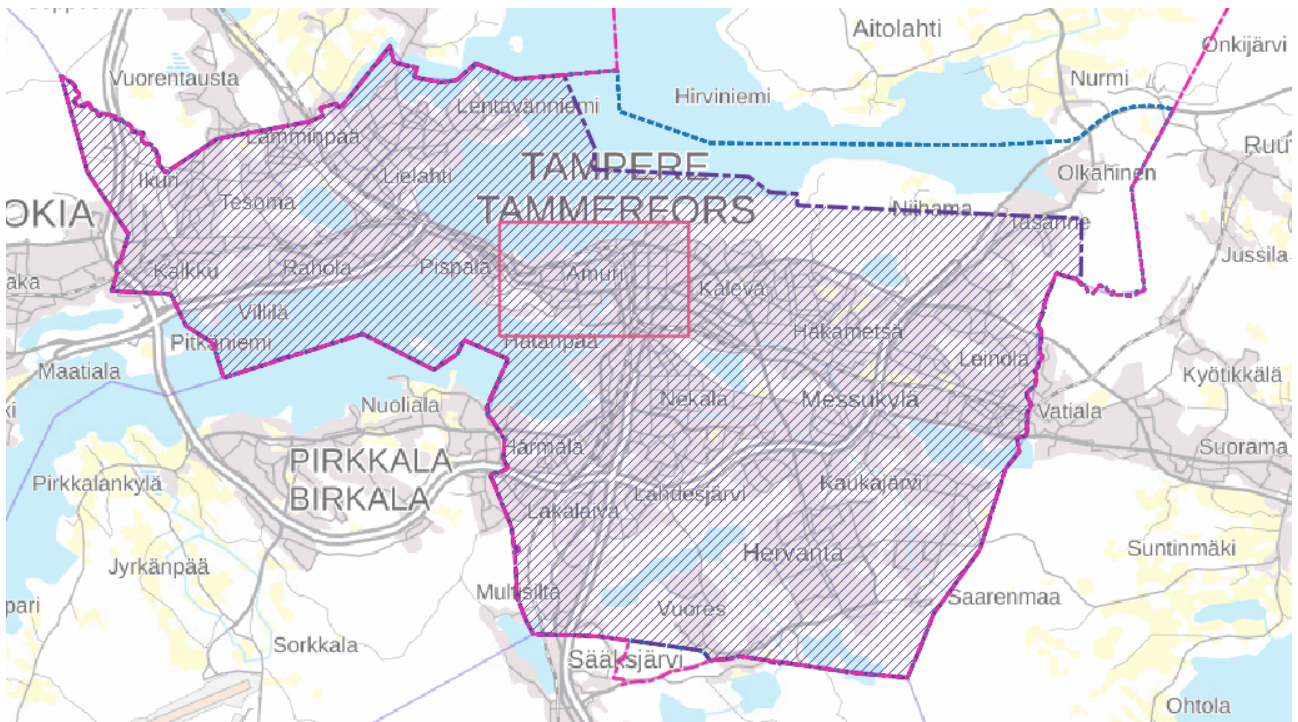


Kuva 3.

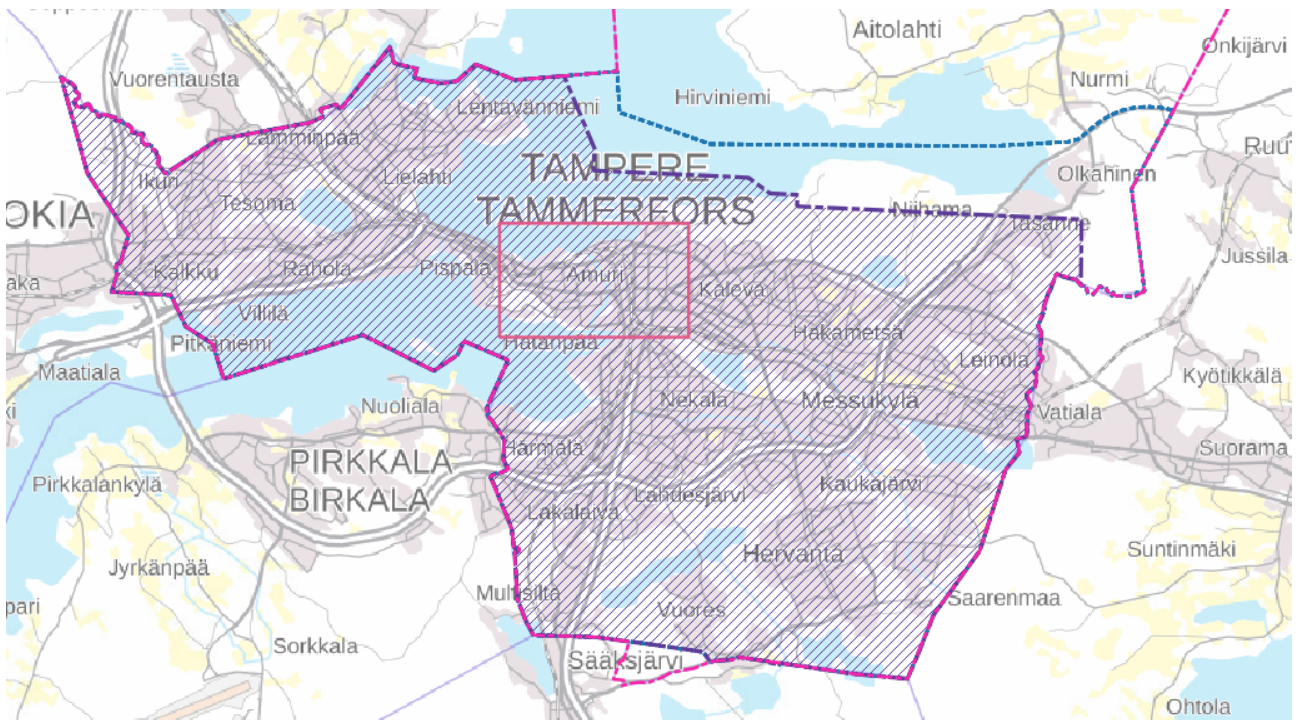


Kuva 3. Karttarajaus Espoon analyysialueesta. Uloin, osin kuvan ulkopuolelle jäävä fuksia katkoviiva on kunnan raja. Sen sisälle jäävä viivoitettu alue on analyysialue (taustakartta MML, CC-BY-4.0).

Tampereella lähdeaineisto ei ylittänyt kunnan rajoja ja käsitti niiden sisälläkin vain kunnan kaupunkimaiset osat, joten lähdeaineistoa käytettiin sellaisenaan. Tampereen aluerajaus on esitetty viivoitettuna kuvassa



Kuva 4.



Kuva 4. Karttarajaus Tampereen analyysialueesta ja kalibrointiprosessin analyysialueesta. Uloin, osin kuvan ulkopuolelle jäävä fuksia katkoviiva on kunnan raja. Sen sisällä järven poikki kulkeva sininen pisteiviiva on niin kutsutun kantakaupunkialueen raja. Sen sisälle jäävä viivoitettu alue on analyysialue, ja viivoitetun alueen sisällä oleva suorakaide on kalibrointialue (taustakartta MML, CC-BY-4.0).

Molempien kaupunkien alueeltaan pienemmistä maanpeiterastereista – Tampereelta vuodelta 2020 ja Espoosta vuodelta 2022 – luotiin lisäksi gda1_footprint-työkalulla erillinen area of interest (AOI) -vektoritaso. Tällä pyrittiin varmistamaan, että molempien vuosien analyysit kohdistuvat täsmälleen samalle alueelle:

```
gdal_footprint -b 1 -srcnodata 65535 -max_points unlimited -no_location <maanpeiterasteritiedoston_nimi.tif> -of "PostgreSQL"
PG:"dbname='<tietokannan_nimi>' host='<palvelimen_nimi>'
port='<yleensä 5432>' user='<kannan_käyttäjänimi>' password='<kannan_salasana>'" -lco SCHEMA=<tietokantaskeeman_nimi>
```

Näin luodun tason nimeksi tulee *footprint*. Tason nimen vaihtaminen `-lyr_name`-parametrilla ei toiminut odotetulla tavalla, joten *footprint*-nimi säilytettiin. On lisäksi syytä huomata, että `gdal_footprint`-työkalu sisältyy GDAL-kirjastoon vasta sen versiosta 3.8.0 lukien.

AOI-rajaukset eivät lisäksi toimineet odotetulla tavalla: ne vaikuttavat vain analyysin laskemiin tilastotietoihin, mutta analyysin luomat rasterit lasketaan kuitenkin koko alkuperäisen maanpeiteaineiston peittoalueelle. Koska laskennallista ilman lämpötilaa kuvaavan *T_air.tif*-rasterin laskenta on hidasta, mikäli alkuperäisen maanpeiteaineiston tarkkuus on suuri, on suositeltavaa leikata alkuperäiset aineistot leikata haluttuun kokoon ennen analyysin aloittamista. Mikäli tätä ei ole tehty alussa, se joudutaan kuitenkin tekemään lopuksi, jotta *Raster layer zonal statistics*-työkalu laskisi tilastotiedot oikein. Vuoden 2026 jatkohankkeen mallinussajoissa käytettiin suoraan alkuperäisessä hankkeessa oikeaan kokoon leikattuja aineistoja.

Esimerkkinä Tampereen vuoden 2022 aineistolle tämä tehtiin jälkikäteen seuraavasti (tiedostojen nimet ovat esimerkinomaisia):

```
gdalwarp -multi -of GTiff -ot Uint16 -s_srs "EPSG:3878" -t_srs
"EPSG:3878" -ovr NONE -co TILED=YES -co COMPRESS=DEFLATE -co PRE-
DICTOR=2 -co ZLEVEL=9 -co NUM_THREADS=2 -crop_to_cutline -cl foot-
print -cutline <projektikansion_polku>\AOI_Tampere.gpkg
<projektikansion_polku>\maanpeite_2022_perustoimitus.tif <projekti-
kansion_polku>\maanpeite_2022_aoi.tif
```

(*footprint*-taso luettiin tässä *AOI_Tampere.gpkg*-tiedostosta, koska analyysiajo edellytti Geopackage-muotoisia lähdeaineistoja. Kyse on kuitenkin samasta tasosta, joka edellä luotiin `gdal_footprint`-komennolla PostgreSQL-kantaan.)

Kaikkien TIFF-muotoisten aineistojen graafisen tarkastelun helpottamiseksi niille luotiin myös erilliset pyramidi- ja metadatatiedostot `gdaladdo` ja `gdalinfo`-komentorivityökaluilla seuraavasti:

1. `gdaladdo -ro --config COMPRESS_OVERVIEW DEFLATE --config PREDICTOR 2 --config ZLEVEL 9 <kohdetiedoston_nimi.tif>`
2. `gdalinfo -hist -stats <kohdetiedoston_nimi.tif>`

Huomionarvoista on, että `gdaladdo`-työkalulle tiedoston pakkausta ohjaavat parametrit annetaan apuparametrilla `--config` eikä `-co`, eikä parametrin nimeä ja arvoa eroteta yhtäsuuruusmerkillä vaan välilyönnillä. Itse parametrit ovat kuitenkin samoja kuin `gdal_translate` ja `gdalwrap`-työkalujen kanssa. Pyramidiin kirjoittaminen suoraan alkuperäisen tiedoston sisään oli estetty `gdalwrap`-komennon `-ovr NONE`-parametrin avulla, mikä on isojen tiedostojen tapauksessa suositeltavaa, koska se tekee varsinaisesta datatiedostosta helpommin käsiteltävän ja vähemmän rikkoutumisalttiin.

Haihduntarastereiden luonti

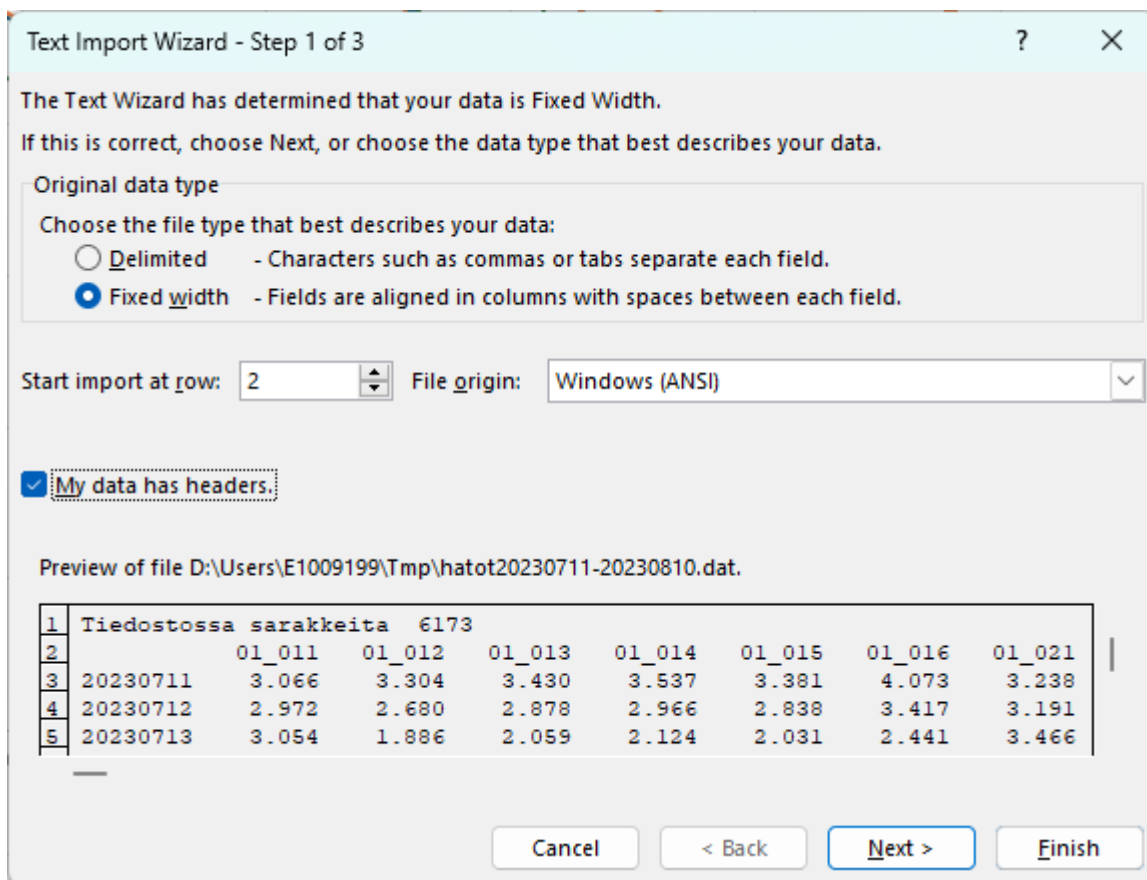
Vesistömallijärjestelmä WSFS-Vemalan kokonaishaihduntadata pyydettiin Syken Vemala-asiantuntijoilta ja saatiin määrämuotoisena tekstitiedostona *hatot.dat*, jossa oli päivätietoa tammikuun 1962 alusta alkaen yhteensä 6 173 alueelle. Lisäksi saatiin GPKG-tiedostona karttataso kyseisistä alueista. Tiedostosta irrotettiin ensin `grep`-komentorivityökalulle⁹ syötetyn säännöllisen lausekkeen avulla vuosien 2020, 2022 ja 2024 heinäkuun rivit kukin omaan tiedostoonsa (esimerkissä vuosi 2022):

```
grep -P '(\sTiedostossa.*$|\s{12}.*$|\s202207\d{2}.*$)' hatot.dat > hatot202207.dat
```

Mikäli haluttu aikaväli ei ole kalenterikuukausi, tarvitaan monimutkaisempia sääntöjä. Seuraavaa lauseketta käytettiin irrottamaan mallin kalibroinnissa käytettyjä lämpötilatietoja vastaavaa ajanjaksoa vastaavat haihduntatiedot:

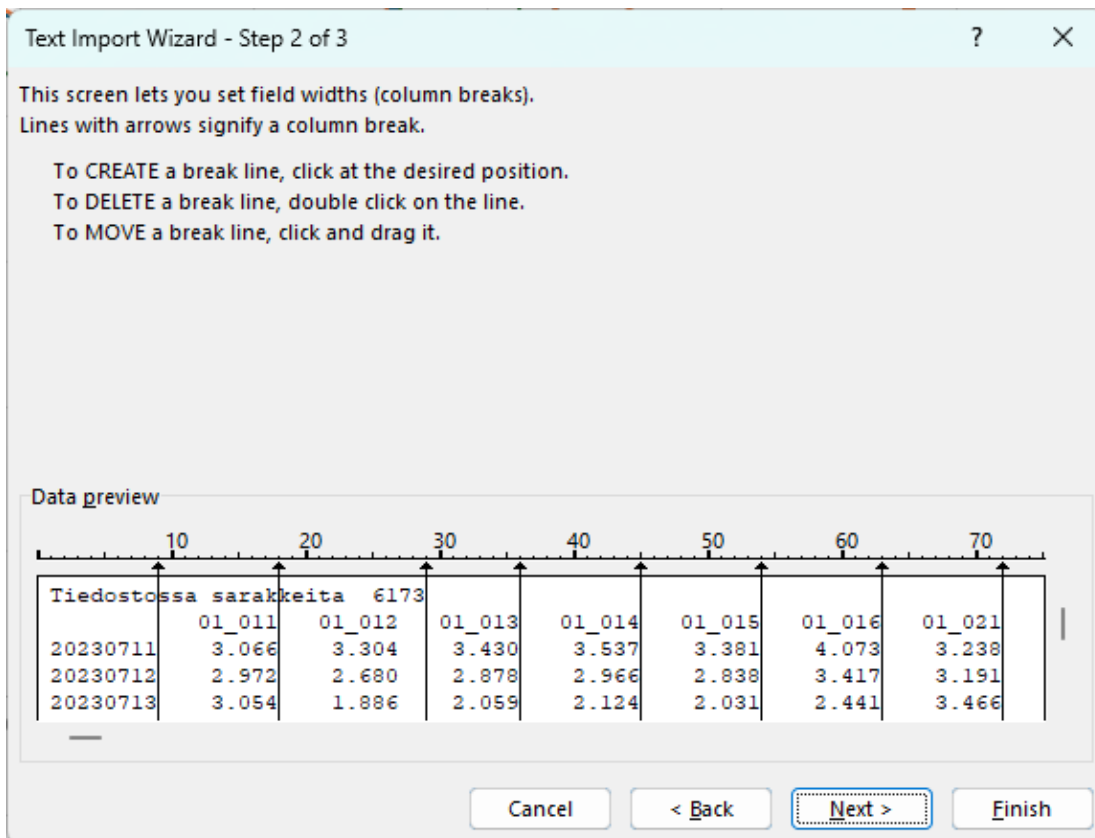
```
grep -P '(\sTiedostossa.*$|\s{12}.*$|\s2023071[1-9].*$|\s202307[2-3]\d.*$|\s2023080\d.*$|\s20230810.*$)' hatot.dat > hatot20230711-20230810.dat
```

Luotu tekstitiedosto (esimerkissä heinäkuun 2022 *hatot202207.dat*) avattiin Microsoft Exceliin ja käsiteltiin avattaessa sen *Text Import Wizard* -toiminnolla oheisissa kuvaruutukaappauksissa (kuvat Kuva 5, Kuva 6, Kuva 7 ja Kuva 8) esitetyllä tavalla, jättäen ensimmäinen rivi pois mutta huomioiden siinä kerrottu sarakkeiden määrä (6 173):

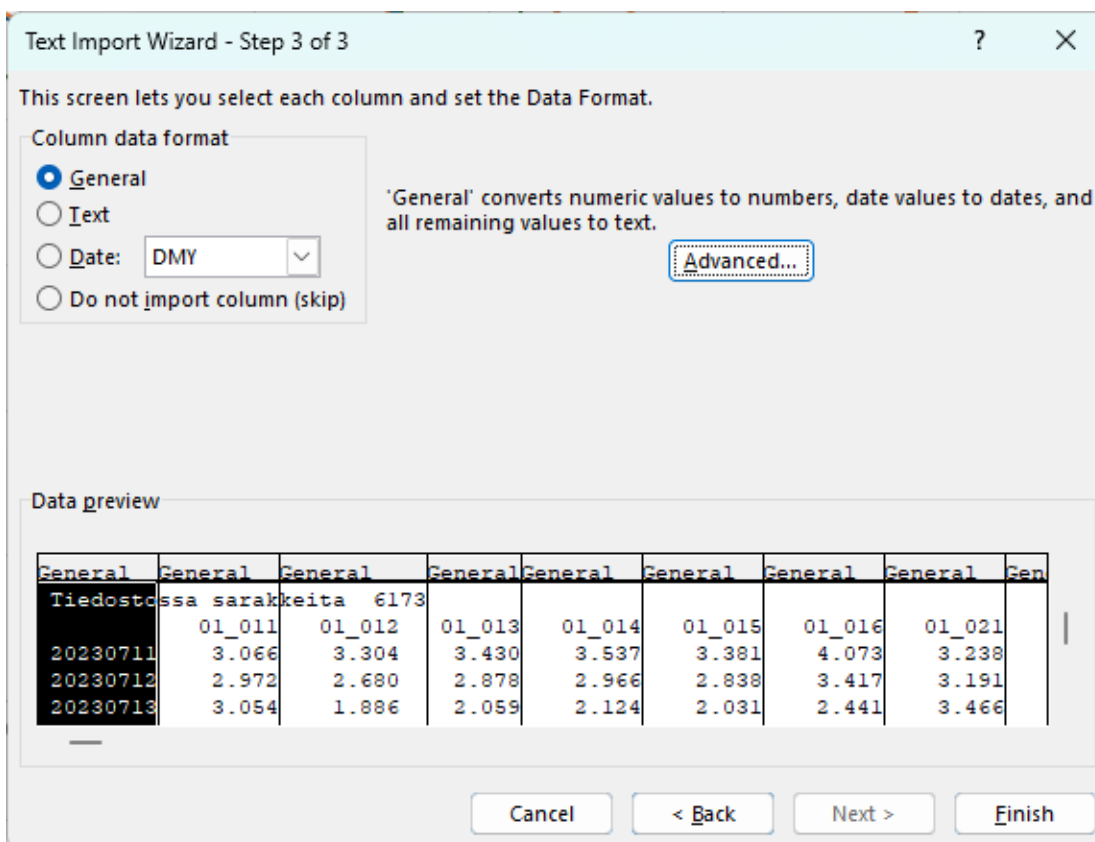


Kuva 5. Microsoft Excelin *Text Import Wizard* -työkalun ensimmäinen vaihe haihduntatietoja tuotaessa.

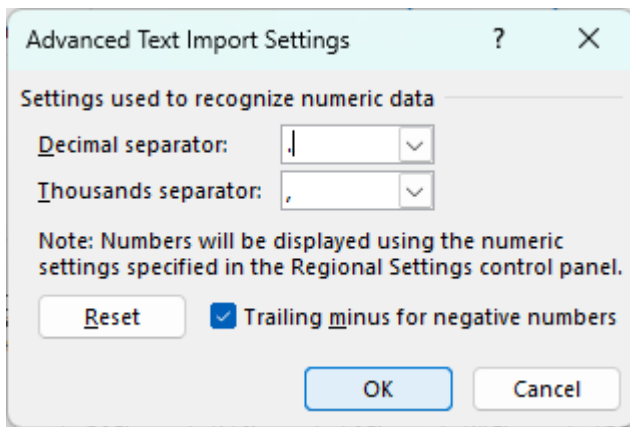
⁹ `grep`-työkalu sisältyy kaikkiin Linux-jakeluihin. Windowsille `grep`-työkalun saa asennettua helposti esimerkiksi Scoop-asennusympäristön avulla (<https://scoop.sh/>). Esimerkkikomento on GNU:n `grep`-versiolle, joten komento ei sellaisenaan toimi MacOS:n tai muun BSD-pohjaisen ympäristön `grep`-työkalulla, jotka eivät tunnista `-P`-vipua.



Kuva 6. Microsoft Excelin Text Import Wizard -työkalun toinen vaihe: sarakkeiden asetus välilyönnein erotellussa tekstitiedostossa. Tässä vaiheessa tulee tarkistaa, että sarakkeiden rajat on asetettu oikein.



Kuva 7. Microsoft Excelin Text Import Wizard -työkalun kolmas vaihe. Olennaisinta tässä vaiheessa on valita oikea numeroiden muoto, mikä tapahtuu napsauttamalla Advanced-painiketta.



Kuva 8. Numeroiden muodon valinta. Mikäli järjestelmän asetuksissa desimaalierotin on pilkku, on tärkeää varmistaa, että tässä valitaan piste, jotta numerot tunnustetaan oikein.

Prosessi voi hieman poiketa kuvissa esitetystä muissa taulukkolaskentaohjelmistoissa. Tuodun tiedoston kullekin kuukausisarakeelle laskettiin keskiarvo, ja kaavarivi kopioitiin sisällöltään vastaavaksi arvoriviksi kaavarivin alapuolelle (*Paste Special* → *Values*), kuten kuvassa Kuva 9.

	A	B	C	ICC	ICD	ICE	ICF	ICG	ICH	ICI	ICJ	ICK	ICL	ICM
1		01_011	01_012	671658	671659	671660	671661	671662	671663	671664	671665	671666	671667	
2	20230711	3.066	3.304	1.62	2.182	2.148	2.034	2.496	1.971	2.066	2.147	1.948	2.48	
3	20230712	2.972	2.68	1.549	2.073	2.047	1.927	2.313	1.869	1.948	2.026	1.833	2.329	
4	20230713	3.054	1.886	1.141	1.186	1.204	1.11	1.267	1.085	1.11	1.142	1.056	1.284	
5	20230714	1.701	2.378	1.475	1.454	1.475	1.366	1.513	1.343	1.341	1.377	1.296	1.532	
6	20230715	1.092	2.641	2.375	2.33	2.382	2.175	2.306	2.137	2.11	2.171	2.027	2.401	
7	20230716	1.846	3.334	2.365	2.364	2.385	2.228	2.525	2.195	2.203	2.258	2.139	2.505	
8	20230717	2.037	2.63	2.281	2.275	2.317	2.125	2.278	2.093	2.071	2.128	1.994	2.344	
9	20230718	3.285	2.223	1.475	1.408	1.437	1.372	1.362	1.347	1.329	1.377	1.32	1.489	
10	20230719	2.909	2.472	1.342	1.281	1.301	1.267	1.269	1.241	1.231	1.276	1.557	1.372	
11	20230720	3.43	2.078	1.305	1.251	1.268	1.239	1.567	1.213	1.206	1.249	1.52	1.341	
12	20230721	3.279	1.733	1.361	1.258	1.301	1.239	1.422	1.212	1.176	1.222	1.469	1.292	
13	20230722	2.682	1.554	1.154	1.317	1.245	1.305	1.197	1.014	0.977	1.322	1.222	1.066	
14	20230723	2.408	1.598	1.174	1.339	1.267	1.326	1.248	1.305	1.255	1.347	1.246	1.414	
15	20230724	2.111	1.625	1.16	1.324	1.252	1.314	1.253	1.294	1.247	1.337	1.241	1.402	
16	20230725	1.822	1.953	1.996	2.243	2.141	2.211	2.042	2.18	2.074	2.224	2.06	2.319	
17	20230726	1.756	2.315	1.842	2.086	1.977	2.062	1.958	2.037	1.946	2.083	1.946	2.173	
18	20230727	1.435	2.242	1.891	2.144	2.035	2.116	2.001	2.091	1.996	2.136	1.994	2.223	
19	20230728	1.956	1.855	1.812	2.046	1.956	2.006	1.888	1.981	1.879	2.01	1.865	2.083	
20	20230729	4.85	1.614	1.273	1.419	1.349	1.408	1.362	1.392	1.326	1.413	1.336	1.45	
21	20230730	2.133	2.181	1.863	2.078	1.975	2.068	1.988	2.043	1.944	2.075	1.964	2.121	
22	20230731	1.583	2.36	2.068	2.322	2.2	2.316	2.277	2.289	2.188	2.332	2.218	2.385	
23	20230801	2.422	2.681	1.909	2.147	2.019	2.192	2.094	2.16	2.066	2.217	2.136	2.246	
24	20230802	2.133	2.442	2.844	3.138	3.01	3.171	3.053	3.125	2.989	3.186	3.052	3.188	
25	20230803	1.539	2.243	2.18	2.417	2.316	2.43	2.334	2.399	2.279	2.426	2.331	2.417	
26	20230804	2.175	2.345	2.441	2.743	2.578	2.758	2.667	2.723	2.547	2.717	2.635	2.69	
27	20230805	2.16	2.209	2.193	2.471	2.315	2.505	2.392	2.473	2.308	2.465	2.396	2.432	
28	20230806	2.138	2.972	3.508	3.99	3.783	4.001	3.781	3.951	3.68	3.93	3.807	3.875	
29	20230807	0.982	3.595	3.524	4.064	3.829	4.082	3.999	4.042	3.793	4.04	3.949	3.997	
30	20230808	2.719	2.923	4.04	4.597	4.423	4.525	4.048	4.48	4.096	4.376	4.195	4.292	
31	20230809	1.939	1.873	2.274	2.604	2.507	2.54	2.207	2.516	2.273	2.431	2.32	2.377	
32	20230810	3.68	2.218	2.216	2.451	2.304	2.495	2.166	2.483	2.217	2.364	2.294	2.306	
33	average	2.364	2.328	1.989	2.194	2.121	2.158	2.138	2.119	2.028	2.155	2.076	2.220	
34	value	2.364	2.328	1.989	2.194	2.121	2.158	2.138	2.119	2.028	2.155	2.076	2.220	
35														

Kuva 9. Keskiarvon käsittävä kaavarivi ja sen alapuolinen arvorivi Microsoft Excelissä.

Lopulta muut rivit kuin sarakeotsikkoina toimivat aluetunnukset ja keskiarvojen arvorivi poistettiin, jäljelle jääneet kaksi riviä muutettiin riveistä sarakkeiksi (*Paste Special* → *Transpose*) ja otsikkorivi lisättiin. Tämän jälkeen tarkistettiin, että arvorivien määrä täsmäsi tuontivaiheessa pois jätetyllä tiedoston ensimmäisellä rivillä kerrottuun sarakkeiden määrään.

Käsitellyt tiedot tallennettiin CSV-tiedostoina ja tuotiin edelleen projektin työkantana käytettyyn PostgreSQL-tietokantaan. Kantaan luotiin ensin seuraava taulu kullekin vuodelle (tässä *shared*-nimiseen skeemaan), jossa *wsfs_id* -kenttä on alueen tunnistetunnus ja *value*-kenttä keskimääräinen haihdunta-arvo:

```
CREATE TABLE shared.et202207 (wsfs_id varchar, value double precision);
```

Tämän jälkeen itse data kopioitiin kantaan¹⁰:

```
get-content .\haihdunta_vemala_ka_202207.csv |psql 'postgresql://<kannan_käyttäjänimi>:<kannan_salasana>@<palvelimen_nimi>/<tietokannan_nimi>' -c "COPY shared.et202207 FROM STDIN WITH (FORMAT csv, DELIMITER ',', HEADER TRUE)"
```

Haihduntadatan mukana saadun GPKG-tiedoston karttataso avattiin QGISiin, tiedoston alueet tutkittiin visuaalisesti ja todettiin, että kaikki sellaiset alueet voitiin jättää huomiotta, jotka eivät sisälly vuoden 1990 valuma-aluejaon kolmanteen jakovaiheeseen. Tietokannassa erilliset vuoden 2020, 2022, 2023 ja 2024 tiedot yhdistettiin yhdeksi *evapotranspiration*-nimiseksi tauluksi, jossa on alueen tunnus ja kunkin vuoden tiedot omana sarakkeenaan:

```
CREATE TABLE evapotranspiration AS (  
    SELECT  
        et202007.wsfs_id,  
        et202007.value AS haihdunta_202007,  
        et202207.value AS haihdunta_202207,  
        et2023julaug.value AS haihdunta_2023julaug,  
        et202407.value AS haihdunta_202407  
    FROM et202007  
    INNER JOIN et202207  
        ON et202007.wsfs_id=et202207.wsfs_id,  
    INNER JOIN et2023julaug  
        ON et202007.wsfs_id=et2023julaug.wsfs_id  
    INNER JOIN et202407 ON et202007.wsfs_id=et202407.wsfs_id  
);
```

Vuoden 1990 valuma-aluejaon kolmannen jakovaiheen tietoihin (jäljempänä vain *valuma-alueet*) *evapotranspiration*-taulu yhdistettiin seuraavilla periaatteilla (komennot ovat esimerkinomaisia):

1. Valuma-alueiden geometriatiedot attribuutteineen tuotiin samaan tietokantaan *evapotranspiration*-taulun kanssa QGISin *DB Manageria* käyttäen (taulun nimi on näissä esimerkeissä *va1990_jv3*).
2. Muut kuin 3. jakovaiheen valuma-alueisiin liittyvät tiedot tiputettiin pois:
 - `DELETE FROM evapotranspiration WHERE wsfs_id NOT LIKE '%_%';`
3. *evapotranspiration*-tauluun luotiin kaksi erillistä kenttää, johon molempiin kopioitiin *wsfs_id* -kentän arvo: *va_j3_candidate* ja *va_j3_candidate_v*. Ensimmäiseen arvo kopioitiin

¹⁰ Toimenpide on tässä esitetty Windows Powershell-ympäristön *get-content* -komennon avulla. Linux-ympäristöissä käytetään *get-content* -komennon sijaan komentoa *cat*.

muutettuna siten, että mahdollinen alaviiva korvattiin pisteellä ja toiseen siten, että se korvattiin V-kirjaimella.

- ALTER TABLE evapotranspiration
ADD COLUMN va_j3_candidate varchar;
 - ALTER TABLE evapotranspiration
ADD COLUMN va_j3_candidate_v varchar;
 - UPDATE evapotranspiration SET va_j3_candidate = regexp_replace(wsfs_id, '_', '.') WHERE wsfs_id LIKE '%_%';
 - UPDATE evapotranspiration SET va_j3_candidate_v = regexp_replace(wsfs_id, '_', 'V') WHERE wsfs_id LIKE '%_%';
4. Tauluun luotiin vielä yksi kenttä, *va1990_jv3*, lopullista vuoden 1990 valuma-aluejaon kolmannen jakovaiheen jakotunnusta varten.
- ALTER TABLE evapotranspiration ADD COLUMN va1990_jv3 varchar;
5. Valuma-aluejaon tiedot yhdistettiin *evapotranspiration*-tauluun *va_j3_candidate_v*-kentän perusteella. *evapotranspiration*-taulun *va1990_jv3*-kenttä päivitettiin yhdistyneiden rivien osalta.
- UPDATE evapotranspiration et SET va1990_jv3=va.jako3tunnus FROM va1990_jv3 va WHERE et.va_j3_candidate_v=va.jako3tunnus;
6. Valuma-aluejaon tiedot yhdistettiin *evapotranspiration*-tauluun *va_j3_candidate*-kentän perusteella. *evapotranspiration*-taulun *va1990_jv3*-kenttä päivitettiin yhdistyneiden rivien osalta.
- UPDATE evapotranspiration et SET va1990_jv3=va.jako3tunnus FROM va1990_jv3 va WHERE et.va_j3_candidate=va.jako3tunnus;
7. *wsfs_id*-kentästä tehtiin taulun avainkenttä:
- ALTER TABLE evapotranspiration ADD PRIMARY KEY (wsfs_id);

Lopullinen *evapotranspiration*-taulun rakenne näytti tämän jälkeen seuraavalta:

Column	Type	Nullable	Default
wsfs_id	character varying	not null	
haihdunta_202007	double precision		
haihdunta_202207	double precision		
haihdunta_2023julaug	double precision		
haihdunta_202407	double precision		
va_j3_candidate	character varying		
va_j3_candidate_v	character varying		
va1990_jv3	character varying		

Indexes:

"evapotranspiration_pkey" PRIMARY KEY, btree (wsfs_id)

Taulun luonnin jälkeen kantaan luotiin valuma-alueet ja haihduntatiedot yhdistävä näkymä, jota käytettiin *gdal_rasterize*-komentorivityökalun varsinaisena lähdetasona:

```
CREATE VIEW va1990_jv3_haihdunta AS (
  SELECT va.*, et.haihdunta_202007, et.haihdunta_202207,
         et.haihdunta_2023julaug, et.haihdunta_202407
  FROM va1990_jv3 va INNER JOIN evapotranspiration et
  ON va.jako3tunnus=et.va1990_jv3);
```

Kunkin pilottikunnan rajojen ympärille luotiin joka kohdasta rajojen ulkopuolelle vähintään viisi kilometriä ulottuva suorakaiteen muotoinen laatikko QGISin Minimum bounding geometry ja Buffer-työkalujen avulla. Espoon ympärille luotu laatikko reprojektoitiin ETRS89 / GK25FIN -koordinaatistoon ja Tampereen ympärille luotu laatikko ETRS89 / GK24FIN -koordinaatistoon vastaamaan maanpeiterasterien koordinaatistoja. Tämän jälkeen kullekin laatikolle luotiin molempien analyysivuosien haihduntarasterit gdal_rasterize -komentorivityökalulla seuraavasti (kannalle oletetaan tässä tavanomainen salasana-autentikointi):

1. gdal_rasterize -of Gtiff -ot Float32 -tr 2 2 -a_nodata "-9999" -burn <alkuarvo> -init <alkuarvo> -co TILED=YES -co COMPRESS=DEFLATE -co PREDICTOR=2 -co ZLEVEL=9 -l <laatikkotason_nimi_tietokannassa> "PG:dbname='<tietokannan_nimi>' host=<palvelimen_nimi> port=<yleensä 5432> user='<kannan_käyttäjänimi>' password='<kannan_salasana>' <projektikansion_polku>/<kohdetiedoston_nimi.tif>
2. gdal_rasterize -l <valuma-alueet ja haihduntatiedot yhdistävän näkymän nimi tietokannassa> -a <ao_vuoden_haihdunta-arvojen attribuutti> "PG:dbname='<tietokannan_nimi>' host=<palvelimen_nimi> port=<yleensä 5432> user='<kannan_käyttäjänimi>' password='<kannan_salasana>'" <projektikansion_polku>/<kohdetiedoston_nimi.tif>

Ensimmäinen komento luo tyhjän rasterin. Espoon rastereille annettiin alkuarvoksi edellä kuvattu, kunkin tilivuoden merialueen haihdunta-arvo (1,14 ja 1,65). Sekä -burn että -init -parametrit vaaditaan, koska alkuperäinen laatikko perustuu ETRS-TM35FIN projektiossa määriteltäisiin kunta-rajoihin ja on reprojektoitu siitä; muuten merialueen arvon asetus tapahtuisi väärin. Tampereen rastereille annettiin alkuarvoksi rasterin no data -arvo -9999. Haihduntarasterit luotiin lähdeaineiston vaatimattomaan tarkkuuteen nähden melko tiheällä 2 × 2 metrin pistekoolla, jotta niiden tarkastelu päällekkäin 0,5 × 0,5 metrin maanpeiterasterien kanssa suuremmilla mittakaavoilla olisi mielekkäämpää.

Biofysikaalisten attribuuttitaulujen rakentaminen

INVEST-mallin vaatima biofysikaalinen taulu rakennettiin ensin tavallisena taulukkona Microsoft Excelissä. Koska kahden metrin maanpeiteaineistoissa maanpeiteluokkia on vain vähän verrattuna CORINE-maanpeiteaineiston tapaisiin pienimittakaavaisempiin, mutta luokitukseltaan tarkemmin jaoteltuihin aineistoihin, tässä on tehtävä melko suuria kompromisseja. Toisaalta aineistojen suuren mittakaavan ansiosta vihreän ja ei-vihreän alueen rajat ovat niissä hyvin tarkkoja.

Jokaiselle maanpeiteluokalle etsittiin kirjallisuudesta mahdollisimman tarkkaan kyseistä luokkaa vastaava haihduntakerroin (crop coefficient) ja heijastavuusarvo (albedo). Valinnan perusteet kuvattiin lyhyesti soluun liitettyyn kommenttiin. Joiltakin osin valinnat ovat huomattavia kompromisseja: esimerkiksi sorapinnan heijastavuuteen vaikuttavat suuresti soran raekoko ja lähdekivilaji, ja havu- ja lehtimetsillä on varsin erilainen heijastavuus. Valinnoissa käytettiin hyväksi mm. tietoa siitä, että Suomessa graniitit ovat valtakivilaji ja metsät voittopuolisesti havumetsiä.

Lisäksi puustoluokille arvioitiin varjostuskerroin sen mukaan, minkä osan kunkin puustoa kuvaavan maanpeiteluokan pinta-alasta latvuspeitto kattaa, ja jokaiselle maanpeiteluokalle määriteltiin tieto siitä, lasketaanko kyseinen maanpeiteluokka ylipäättään viheralueeseen vai ei. Vesialueet laskettiin viheralueiksi.

Koska analyysillä ei pyritty löytämään absoluuttisia lämpötiloja, vaan vertaamaan muutosta tilanteeseen, jossa viheralueita ei olisi, määriteltiin myös vaihtoehtoiset kertoimet kaikille niille luokille, jotka oli määritelty viheralueiksi. Vaihtoehtoisina arvoina tätä tarkoitusta varten käytettiin betonipinnan haihduntakerrointa ja heijastavuutta. Myös vesialueet korvattiin kuvitteellisella betonipinnalla, jotta myös niiden vaikutus tulisi vertailussa huomioiduksi.

Biofysikaalisesta taulukosta on xlsx-muotoinen kopio tämän ohjeen liitteenä. Liitetaulukossa solujen kommentteissa on viittaukset lähteisiin, joiden perusteella kuhunkin arvoon on päädytty. Taulukossa Taulukko 3 on esimerkki Espoon analyysissä käytetyn biofysikaalisen taulukon arvoista. Tampereen maankäyttöluokat poikkeavat hieman Espoon luokista, ja myös eroavat hieman vuosien 2020 ja 2022 välillä. Vuonna 2026 toteutetussa jatkohankkeessa testattiin biofysikaalisen taulun painokertoimien vaikutusta mallin kalibroinnin tuloksiin, mutta lopulta tarvetta muuttaa alkuperäisessä hankkeessa määriteltyjä kertoimia ei havaittu.

Taulukko 3. Käytetty biofysikaalinen taulukko (Espoon tiedot).

Maankäyttöluokka	Luokan koodi (HSY)	Varjo	Kerroin	Albedo	Viheralue
Tie (päällystetty)	111	0	0.15	0.08	0
Tie (päällystämätön)	112	0	0.40	0.24	0
Rakennus	120	0	0.20	0.15	0
Muu vettä läpäisemätön pinta	130	0	0.20	0.20	0
Pelto	211	0	1.05	0.21	1
Muu matala kasvillisuus	212	0	0.70	0.15	1
Puusto, 2–10 m	221	0.5	0.80	0.13	1
Puusto, 10–15 m	222	1	0.80	0.13	1
Puusto, 15–20 m	223	1	0.80	0.13	1
Puusto, yli 20 m	224	1	0.80	0.13	1
Avokallio	310	0	0.20	0.40	0
Paljas maa	410	0	0.50	0.22	0
Vesialue	510	0	1.00	0.10	1
Merialue	520	0	1.00	0.10	1
Varjo = varjoisuus, %					
Kerroin = maankäyttöluokan heijastekerroin (crop coefficient)					
Albedo = heijastavuus					
Viheralue = kyllä (1) / ei (0)					

Mallin kalibrointi

Mallin kalibrointikokeilua varten Tampereen kaupungilta saatiin tiedot sekä kaupungin omien lämpötila-anturien että Ilmatieteen laitoksen TAPSI-hankkeen antureiden sijainneista ja näillä tehdyistä mittauksista. Enemmistö antureista oli otettu käyttöön vasta 10.7.2023, joten kalibrointikokeilun ajanjaksoksi valittiin 11.7.2023–10.8.2023. Maanpeiteaineistona käytettiin kuitenkin vuoden 2022 aineistoa, mikä oli uusin Tampereelta saatavissa oleva aineisto.

Kalibrointia yritettiin Boschin ym. (2021) kehittämällä InVEST urban cooling model calibration -työkalulla. Työkalun pistemäisten lämpötilamittausten pohjalta tehtävään kalibrointiin vaaditaan kaksi CSV-tiedostoa: ensimmäisessä on asemien tunnuksot ja sijaintien x- ja y -koordinaatit, eli käytännössä sarakkeet *id*, *x* ja *y*. Toisessa on riveillä kunkin mittaustason lämpötilahavainnot ristiintaulukoituna havaintojen kanssa niin, että eri asemien havainnot kullekin ajanhetkelle ovat sarakkeittain. Ensimmäiseen sarakkeeseen tulevat mittausten aikaleimat ja ensimmäiselle riville asemien tunnuksot, joiden tulee vastata sijaintitaulukon *id*-sarakkeen arvoja. Lämpötilamittaustason ja -havaintojen tiedot käsiteltiin kalibrointia varten tämän rakenteen mukaiseksi.

Työkalun dokumentointi¹¹ ei ollut kovin yksityiskohtaista, ja sen käyttöä jouduttiin harjoittelemaan useisiin otteisiin, ennen kuin kalibrointiajossa onnistuttiin lainkaan. Tämän seurauksena alkuperäiseen hankkeeseen varatut työaikaresurssit loppuivat, ja mallinnus jouduttiin tekemään lopulta kalibroimatta mallia etukäteen. Hamelin ym. (2024) mukaan tämäkin on tieteellisesti kestävä ratkaisu, koska kalibrointi ei aina muutenkaan välttämättä paranna mallia, mutta tulosten luotettavuuden kannalta paras lähestymistapa olisi ollut ensin kalibroida malli huolellisesti, ja vasta sen jälkeen suorittaa itse mallinnus kalibroiduin parametrein. Vuonna 2026 toteutettiin pilottikunnista pelkästään Tampereen osalta erillinen jatkohanke, jossa kalibrointiprosessi suoritettiin uudelleen useisiin otteisiin ja kalibroituja painokertoimien käyttö varsinaisessa mallinnuksessa todettiin hyvin perustelluksi.

Kalibroinnin vaatimien laskentaresurssien vähentämiseksi sitä varten päädyttiin lopulta rajaamaan Tampereen ydinkeskustasta koko mallinnusalue (n. 150 km²) selvästi pienemmän, vajaan kymmenen neliökilometrin suuruisen alueen. Kun kalibrointiprosessia saatiin edistettyä, havaittiin, että kalibroitaessa tulee olla saatavilla haihduntatieto kullekin kalibroitaessa käytettävälle lämpötilamittaukselle erikseen. Tämä asia selitetään työkalun online-dokumentaatiassa. Työkalu ei suoritettaessa varoita tästä, vaan kaatuu, mikäli sen saatavilla ei ole yhtä monta haihduntarasteria kuin lämpötilamittauspäivääkin. Koska projektissa ei ollut aikaa kolmenkymmenen yhden haihduntarasterin tekoon, päätettiin kalibrointiajo suorittaa vain yhdelle päivälle. Vaihtoehtona olisi ollut käyttää samaa haihduntatietoa jokaiselle päivälle. Kalibrointiin oli alun perin valittu ajanjakso 11.7.2023–10.8.2023, ja tästä ajanjaksosta valittiin se päivä, jonka maksimilämpötila oli kaikkein suurin, eli 7.8.2023.

Vuoden 2026 jatkohankkeessa siirryttiin käyttämään lämpötiloina vuorokauden keskilämpötiloja maksimilämpötilojen sijaan, koska maksimilämpötilojen käyttö todettiin rahamääräisen arvonn kannalta huonoksi ratkaisuksi. Tämä ei kuitenkaan muuttanut valittua kalibrointipäivää, koska myös keskilämpötilat olivat tuona päivänä suurimmillaan. Tälle päivälle tehtiin yksi haihduntarasteri kappaleessa *Haihduntarastereiden luonti* kuvatulla tavalla, mutta ottaen mukaan vain yhden päivän tiedot. Kalibrointityökalu ei muutenkaan varoittanut lähdetietojen puutteista, vaan yksinkertaisesti kaatui, jos aineistoissa oli mitään epätasällisyyksiä, esimerkiksi, mikäli mukana oli kalibrointialueen ulkopuolelle jääneiden lämpötilamittauspisteiden tietoja. Nämä jouduttiin siivoamaan pois kalibrointiaineistosta, ennen kuin kalibrointiprosessin suorittaminen loppuun asti onnistui. Jatkohankkeessa todettiin lisäksi, että kalibrointityökalun suorituskyky paranee suuresti, mikäli myös maanpeiterasterit rajataan kalibrointia varten erikseen kalibrointialueen

¹¹ Dokumentaatio löytyy osoitteesta <https://invest-ucm-calibration.readthedocs.io/>.

kokoisiksi ennen kalibrointia. Kalibrointityökalun suorittamiseen vaadittava aika vaihteli silti suuresti eri kalibrointiajojen välillä alle kahdesta vuorokaudesta yli seitsemään.

Alkuperäisen hankkeen onnistunut kalibrointiajo tehtiin lopulta seuraavalla komennolla:

```
invest-ucm-calibration \  
/<projektikansion_polku>/analysis_data/land_cover/\  
maanpeite_2022_perustoimitus.tif \  
/<projektikansion_polku>/analysis_data/biophysical_tables/\  
biophysical_table_Tampere_2022_actual.csv \  
"factors" \  
/<projektikansion_polku>/analysis_data/evapotranspiration/\  
evaporation_raster_tampere_20230807.tif \  
--aoi_vector_filepath=/<projektikansion_polku>/analysis_data/\  
AOI_Tampere_calibration.gpkg \  
--t_refs "25.7" \  
--station_t_filepath=/<projektikansion_polku>/analysis_data/\  
temperature/temp_obs_2023-08-07_max_centre_only.csv \  
--station_locations_filepath=/<projektikansion_polku>/analysis_data/\  
temperature/temp_obs_points_for_model_calibration_centre_only.csv \  
--initial_solution="500, 50, 0.6, 0.2, 0.2" \  
--metric="R2" \  
--stepsize="0.3" \  
--num_steps=10 \  
--num_update_logs=10 \  
--dst_filepath=/<projektikansion_polku>/calibration_outputs/\  
calibrated_params_minimal_aoi_20230807.json \  
> /<projektikansion_polku>/console_logs/\  
ucm_calibration_minimal_20230807.out 2>&1
```

Puhdin käyttöjärjestelmäympäristö on Linux, joten komento esitetään edellä sellaisena kuin se Linuxissa ajetaan. Komento ajettiin yhtenä rivinä, mutta katkaistiin kenoviivamerkeillä (\) useille riveille tätä ohjeistusta varten. Mikäli komento ajetaan Windowsissa, tulee rivinvaihdot ja kenoviivamerkit poistaa ensin.

Kalibrointiprosessille ei varsinaisesta analyysiprosessista poiketen ollut mahdollista kertoa workerprosessien määrää, joten kalibrointi ajettiin selvästi pienemmillä resursseilla kuin varsinaiset analyysit, koska useita yhtäaikaisia prosesseja ei ollut mahdollista määrittää: laskentaan varattiin kaksi prosessoriydintä ja kahdeksan gibitavua muistia. Ensimmäisellä kalibrointiajolla suoritintehokkuus oli tällöin 85,0 %, mutta muistitehokkuus vain 17,9 %. Toisella, pidemmällä kalibrointiajolla suoritintehokkuus oli 77,3 % ja muistitehokkuus 23,2 %. Korkea suoritintehokkuus kahdella ytimellä viittaa siihen, että myös kalibrointiprosessi kaikesta huolimatta osaa hyödyntää ainakin kahta prosessoriydintä.

Tekninen onnistuminen ei kuitenkaan tarkoita tieteellistä onnistumista: vasta jälkikäteen havaittiin, että kaikkien – myös kalibrointialueen ulkopuolisten – lämpötilamittausten minimistä otettu referenssilämpötila – parametri --t_refs – oli mittausvirhe: kyseinen asema sijaitsee Tuomiokirkonkadulla, alueella, jossa lämpösaarekeilmiö on suurella todennäköisyydellä voimakkaimmillaan. Kun se ja toinen virhepiste – Joukahaisenkadun ja Sammonkadun risteys – jätettiin pois tuloksista,

oikea referenssilämpötila, eli kaikkien referenssipisteiden alin lämpötila, olisi ollut 29,4 °C. Vuoden 2026 jatkohankkeessa käytetty vastaava keskilämpötila samalta päivältä oli 24,4 °C.

Ensimmäisellä onnistuneella kalibrointiajolla prosessia toistettiin vain kymmenen iteraatiota, kun työkalun oletus olisi sata. Näin toimittiin siksi, että nähtäisiin nopeammin, kuinka kalibrointi teknisesti toimii, ja millaisia tuloksia se tuottaa.

Kun kalibrointiajo oli kertaalleen onnistunut, oli kulunut niin paljon aikaa, että itse mallinnus oli jo suoritettu ilman kalibrointia ja projektille varattu työaika loppunut kesken. Tämän vuoksi tulosten tulkinnat tehtiin kalibroimattomista ajoista. Kalibrointiajo kuitenkin toistettiin uudelleen korjaten edellä mainittu referenssilämpötilatieto ja nostaten iteraatioiden määrä sataan (parametrit `--num_steps` ja `--num_update_logs`).

Molemmilla kalibrointiajoilla työkalun mittaustapana (`--metric`) käytettiin R^2 :ta, koska tämä oli työkalun oletusarvo. Mittaustavan osalta ei kuitenkaan projektin aikarajoitteiden vuoksi tehty tarkempaa harkintaa.

Edellä mainituista virheistä ja rajoitteista johtuen kalibroinnin tulokset eivät välttämättä kuitenkaan ole kovin hyvät, ja alkuperäisen projektin resurssien rajallisuuden vuoksi alkuperäisiä kalibrointituloksia ei lopulta hyödynnetty mihinkään. Vuonna 2026 suoritettussa jatkohankkeessa tulosten käyttökelpoisuus saatiin kuitenkin vahvistettua Tampereen osalta. Jatkohankkeessa kalibrointi suoritettiin lämpötilamittausten vuorokausikeskiarvoille, toisin kuin alkuperäisessä hankkeessa, jossa se oli tehty maksimilämpötiloille. Kalibroinnin tulokset olivat tästä huolimatta samat kuin alkuperäisen hankkeen toisella kalibrointiajolla. Alkuperäisen hankkeen kalibrointiajojen tulokset esitetään taulukossa Taulukko 4, ja kalibrointiajo 2:n tuloksen mukaisia painokertoimia käytettiin jatkohankkeen mallinnustyössä.

Taulukko 4. Kalibroimattomassa mallinnuksessa käytetyt parametrit ja kalibroidut parametrit.

Parametri	Kalibroimaton arvo	Kalibrointiajo 1	Kalibrointiajo 2
Ilman sekoittumisetäisyys	500 m (oletus)	332 m	199 m
Viheralueiden viilennysvaikutus	50 m (mallin oletus 100 m)	107 m	96 m
Varjostuskerroin	0,60	0,54	0,77
Heijastuskerroin	0,20	0,37	0,13
Haihduntakerroin	0,20	0,09	0,10

Kalibroinnin tuloksista on havaittavissa, että erityisesti toisen kalibrointikierroksen tulokset poikkeavat selvästi kalibroimattomista arvoista. Alkuperäisen hankkeen yhteydessä arvioitiin, että tuloksissa vesialueiden kohdalla havaittu todennäköinen vääristymä johtuisi biofysikaaliseen tauluun valituista painokertoimista. Jatkohankkeessa toteutetun herkkyysoanalyysin yhteydessä kuitenkin todettiin, että tämä ei johtunut biofysikaalisen taulun painokertoimista, vaan viheralueiden viilennysvaikutuksen maksimietäisyyden laskemisesta sadasta metrillä viiteenkymmeneen metriin etukäteisarvioiden perusteella. Muutos tehtiin, koska käytettyjen maanpeiteaineistojen suuri spatiaalinen tarkkuus, 0,5 m × 0,5 m kuvapistettä kohden, oli merkittävästi suurempi kuin lähdekirjallisuudessa kuvatuissa mallinuksissa käytettyjen aineistojen tarkkuus. Tämä johtaa viheralueiden varsin pieneen kokoon, minkä vuoksi vähennettiin niiden oletettua viilennysvaikutuksen

maksimietäisyyttä. Jatkohankkeen herkkyyssanalyysin yhteydessä kuitenkin todettiin kyseisen johdopäätöksen olleen väärä: painokertoimen puolittaminen vääristää mallin tuloksia. Perustellumpaa olisi ollut puolittaa ilman sekoittumisetäisyys, joka kalibroinnin tuloksena laski yli puoleen alkuperäisestä. Herkkyyssanalyysi paljasti myös, että vaikka mallin oletuskertoimien käyttäminen korjaa vesialueita koskevan vääristymän, jäävät tulokset tällöin kokonaisuudessa hyvin epätarkoiksi suhteessa alkuperäisen maanpeiteaineiston tarkkuuteen. Kalibroituja painokertoimien käyttö onkin hyvin suositeltavaa käytettäessä tarkkoja maanpeiteaineistoja. Lisäksi on syytä huomioida, että mikäli biofysikaalisen taulun painokertoimia muutetaan, tulisi kalibrointi ajaa uudelleen muutetuilla kertoimilla ennen tulosten käyttöä. Aiempien kalibrointiajojen painokertoimien käyttäminen -- `initial_solution`-parametrin arvona mahdollisissa myöhemmissä kalibrointiajoissa on perusteltua.

Mallinnuksen referenssilämpötilat

InVEST-malli vaatii lähtöparametreikseen kahta eri lämpötilatietoa: varmasti lämpösaarekeilmiöalueen ulkopuolelta, esimerkiksi maaseudulta, mitatun referenssilämpötilan, johon lämpösaarekeilmiö ei vaikuta, ja arvion lämpösaarekeilmiön enimmäisvaikutuksesta. Alkuperäisen hankkeen kalibrointiajoissa referenssilämpötilana käytettiin mittauspisteverkon alinta maksimilämpötilaa kalibrointipäivältä, jättäen kuitenkin pois edellisessä kappaleessa mainitut ilmeiset virheelliset havainnot. Tämä lämpötila oli mitattu Lentävänniemessä sijaitsevalta Tampereen kaupungin lämpötila-anturi *Sensorihubi 27*:ltä, jolla mitattu maksimilämpötila tuolta päivältä oli 29,4 astetta Celsiusta. Vuoden 2026 jatkohankkeessa myös referenssilämpötila valittiin kalibrointialueelta käyttäen alueen alinta lämpötilaa. Tähän käytettiin Pyynikin TAPSI-mittausaseman lämpötilaa samalta päivältä, joka oli 24,4 °C.

Varsinaisia mallinnusajoja varten Ilmatieteen laitoksen eri sääasemien lämpötiloista piirrettiin Microsoft Excelillä graafit koko heinäkuun ajalta. Näiden avulla eri mittausasemien päiväkohtaista ja keskinäistä vaihtelua verrattiin keskenään. Referenssilämpötila pyrittiin valitsemaan kuumalta päivältä, mutta sellaiselta mittausasemalta, jonka lämpötila oli selvästi alempi kuin kaupunkialueella.

Vertailuja tehtiin seuraavilta sääasemilta:

- Espoo:
 - Espoo Nuuksio
 - Espoo Tapiola
 - Kirkkonummi Mäkiluoto
- Tampere
 - Pirkkala Tampere-Pirkkalan lentoasema
 - Tampere Härmälä
 - Tampere Siilinkari
 - Tampere Tampella (mittausasema lakkautettiin alkuvuonna 2022)

Espoon Nuuksion mittausaseman todettiin sijaitsevan niin kaukana sisämaassa, että siellä lämpötila oli lämpösaarekeilmiöstä huolimatta yleisesti merkittävästi korkeampi kuin Tapiolassa, joten referenssilämpötila valittiin Nuuksion sijaan Kirkkonummen Mäkiluodon sääasemalta. Tampereella käytettiin Siilinkarin sääaseman lämpötilaa. Lopulta päädyttiin valitsemaan käytettäväksi referenssilämpötiloiksi seuraavat (Ilmatieteen laitos 2025a):

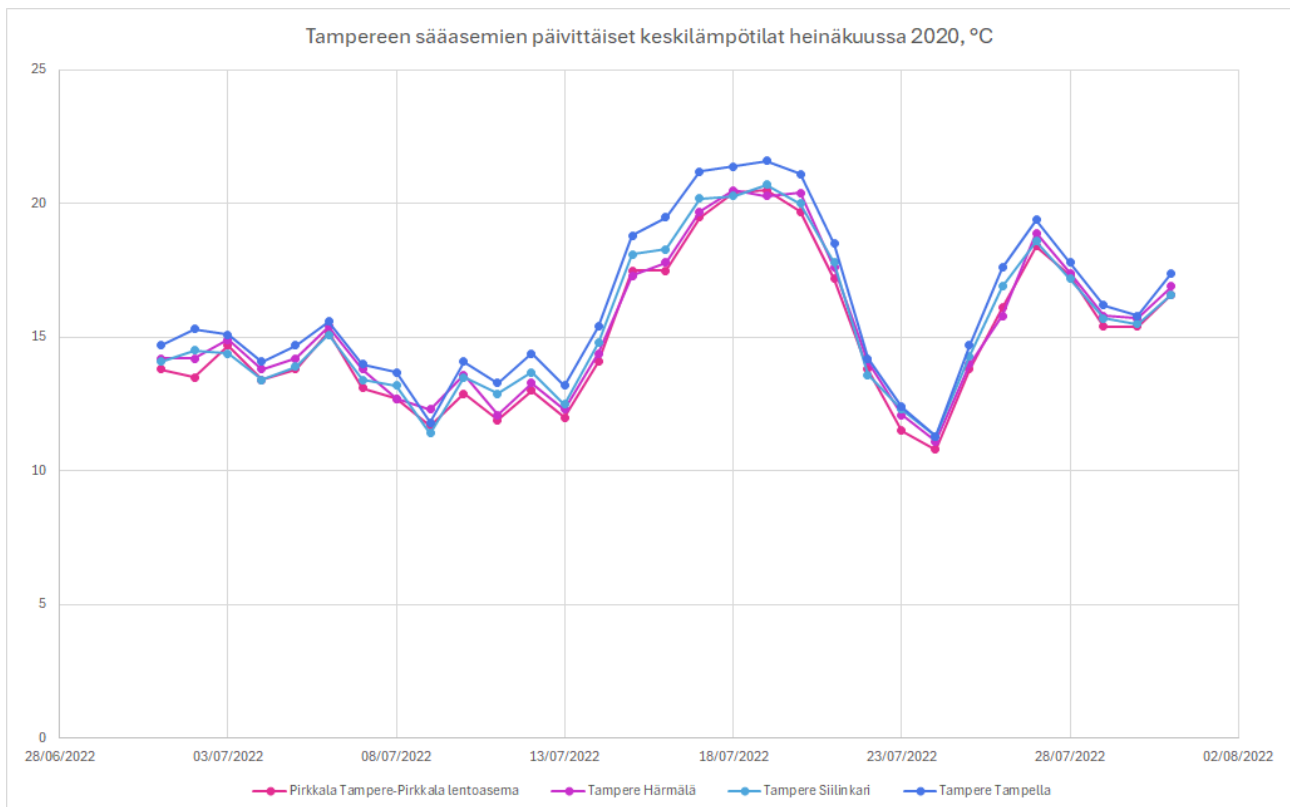
- Espoo 2022: Kirkkonummi Mäkiluoto 2.7.2022: 25,0 °C

- Espoo 2024: Kirkkonummi Mäkiluoto 30.7.2022: 25,0 °C
- Tampere 2020: Tampere Siilinkari 19.7.2020: 24,7 °C
- Tampere 2022: Tampere Siilinkari 21.7.2022: 28,2 °C

Vuoden 2026 jatkohankeessa käytettiin seuraavia referenssilämpötiloja. Vaikka jatkohankeen tarkoitus oli tarkentaa mallinnuksen tuloksia vain Tampereen osalta, suoritettiin tulosten kontrolloimiseksi itse mallinnusajo uudelleen myös Espoolle, minkä vuoksi vastaavat päivitetty referenssilämpötilat on raportoitu tässä myös Espoolle (Ilmatieteen laitos 2025a):

- Espoo 2022: Kirkkonummi Mäkiluoto 2.7.2022: 21,7 °C
- Espoo 2024: Kirkkonummi Mäkiluoto 26.7.2024: 20,9 °C
- Tampere 2020: Tampere Härmälä 18.7.2020 ja lentoasema 19.7.2020: 20,5 °C
- Tampere 2022: Tampere Siilinkari 2.7.2022 ja lentoasema 22.7.2020: 23,0 °C

Graafien tarkastelun jälkeen päädyttiin alkuperäisessä hankkeessa kaikissa tapauksissa käyttämään lämpösaarekeilmion arvioituna maksimivaikutuksena kolmea astetta Celsiusta. Jatkohankeessa tämä vaikutus laskettiin kahteen celsiusasteeseen, koska keskiarvolämpötilojen havaittu alueellinen vaihtelu on alhaisempaa kuin maksimilämpötilojen alueellinen vaihtelu. Käytännössä arvo vaihtelee päivästä toiseen: pelkästään Ilmatieteen laitoksen sääasematietojen perusteella tarkasteltuna eroa on joinakin päivinä tuskin lainkaan, mutta pahimmillaan enemmänkin kuin kolme astetta. Kirjallisuudessa maksimivaikutukseksi on arvioitu keskimäärin vain kaksi astetta (Chakraborty ja Lee 2019), mutta koska erot sääasemien välillä olivat enimmillään jopa 4,4 °C, katsottiin paremmaksi käyttää suurempaa arvoa. Kuvassa Kuva 10 on esimerkkikuvaaja Tampereen sääasemien päivittäisistä keskilämpötiloista heinäkuulta 2020.



Kuva 10. Esimerkkikuvaaja Tampereen sääasemien päivittäisistä keskilämpötiloista heinäkuussa 2020 (Ilmatieteen laitos 2025a). Sittemmin lakkautetun Tampellan sääaseman, joka sijaitsi selvällä lämpösaarekeilmiön vaikutusalueella, mittaamat lämpötilat erottuvat kuvaajasta säännönmukaisesti muita mittausasemia korkeampina arvoina.

Mallinnusajot

Edellä kuvatun mukaisesti alkuperäisessä hankkeessa varsinaiset mallinnukset toteutettiin ilman kalibroitua kalibroitiprosessin teknisen hankaluuden ja projektin aikarajoitteiden vuoksi. Vuonna 2026 Tampereelle toteutetussa jatkohankkeessa käytettiin kalibroituja painokertoimia.

INVEST-mallille on graafinen sovellus, mutta sitä ei tämän työn mallinnusten yhteydessä käytetty lainkaan. Mallinnus toteutettiin rakentamalla mallin komentorivityökalun dokumentaatioissa¹² kuvatun mukaisesti jokaiselle ajettavalle mallille mallin suorittava Python-skripti. Skriptin runko luotiin komentorivityökalulla ajamalla seuraava komento:

```
invest export-py urban_cooling_model
```

¹² Komentorivityökalun dokumentaatio löytyy osoitteesta <https://invest.readthedocs.io/en/latest/cli.html>.

Tämän jälkeen skriptin args-nimiseen, *dictionary*-tyyppiseen muuttujaan kirjoitettiin mallin suorittamiseksi vaadittavien parametrien arvot. Esimerkkinä Tampereen vuoden 2022 tietojen kalibroidussa mallinnuksessa käytetyn args-muuttujan arvo:

```
args = {
    'aoi_vector_path':
        '<projektikansion_polku>/analysis_data/'
        'AOI_Tampere.gpkg',
    'biophysical_table_path':
        '<projektikansion_polku>/analysis_data/'
        'biophysical_tables/'
        'biophysical_table_Tampere_2022_actual.csv',
    'cc_method': 'factors',
    'cc_weight_albedo': '0.13',
    'cc_weight_eti': '0.10',
    'cc_weight_shade': '0.77',
    'do_energy_valuation': False,
    'do_productivity_valuation': False,
    'green_area_cooling_distance': '96',
    'lulc_raster_path':
        '<projektikansion_polku>/analysis_data/'
        'land_cover/maanpeite_2022_perustoimitus.tif.tif',
    'n_workers': '10',
    'ref_eto_raster_path':
        '<projektikansion_polku>/analysis_data/'
        'evapotranspiration/evaporation_raster_tampere_2022.tif',
    'results_suffix': '',
    't_air_average_radius': '199',
    't_ref': '23.0',
    'uhi_max': '2',
    'workspace_dir':
        '<projektikansion_polku>/model_outputs/'
        'tre2022avg',
}
```

Jokainen näistä skripteistä ajettiin tämän jälkeen Puhdilla, kukin omana työnään. Edellä kuvattu esimerkki Tampereen vuoden 2022 mallista käynnistettäisiin Linux-ympäristössä seuraavasti:

```
export TMPDIR="<projektikansion_polku>/model_tmp/tre2022avg"
python3 <projektikansion_polku>/scripts/
urban_cooling_model_execute_tre2022_avg.py \
> <projektikansion_polku>/console_logs/
urban_cooling_model_execute_tre2022_avg.out 2>&1
```

TMPDIR-muuttujan asettaminen ennen mallia on olennaisen tärkeää, mikäli käytetään suuritarkkuuksisia rastereita: muussa tapauksessa malli käyttää käyttöjärjestelmän tilapäishakemistoa, josta hyvin todennäköisesti loppuu tila nopeasti kesken. Windowsissa tämä johtaa tyypillisesti C-levyn täyttymiseen, koska tilapäistiedostojen oletussijainti on hakemiston C:\Users\<käyttäjätunnus>\AppData\Local\Temp alla.

Mallinnus toteutettiin sekä alkuperäisessä hankkeessa että vuoden 2026 jatkohankkeessa kullekin tilivuodelle erikseen sekä varsinaisen maankäytön mukaisella biofysikaalisella taulukolla, että vaihtoehtoisella biofysikaalisella taulukolla, jossa kaikki kasvillisuuspintojen kertoimet oli korvattu betonipintojen ominaisuuksien mukaan määritellyn luokan "muu vettä läpäisemätön pinta" tiedoilla. Varsinaisten mallinnsajojen jälkeen jälkimmäisen arvoista vähennettiin ensimmäinen, jolloin saatiin tieto kasvillisuuden viennysvaikutuksesta näiden lämpötilojen erotuksena. Mallin edustamia absoluuttisia ilman lämpötiloja ei käytetty mihinkään, koska ne eivät Hamelin ym. (2024) mukaan yksinään ole riittävän luotettavia. Tämä pätee riippumatta siitä, onko malli kalibroitu vai ei.

Edellä mainittu vähennyslasku tehtiin `gdal_calc` -rasterilaskimen avulla seuraavasti (esimerkkinä Espoon vuoden 2024 tulokset alkuperäisestä hankkeesta):

```
gdal_calc -A <projektikansion_polku> /model_outputs/es-  
poo2024max_ref_no_veg/intermediate/T_air.tif -B <projektikansion_polku>  
/model_outputs/espoo2024max/intermediate/T_air.tif --outfile <projek-  
tikansion_polku>/model_outputs/espoo2024max/T_air_diff_to_no_veg.tif --  
calc="A-B" --type Float32 --co="TILED=YES" --co="COMPRESS=DEFLATE" --  
co="ZLEVEL=9" --co="PREDICTOR=3" --co="NUM_THREADS=8"
```

Komennon `intermediate`-alakansioissa olevat `T_air.tif`-tiedostot ovat mallin varsinaisia tulostiedostoja. Mallinnuksen jäljiltä nämä tiedostot ovat hyvin suurikokoisia: esimerkiksi edellä mainitun `model_outputs/espoo2024max/intermediate` -alokansiossa sijaitsevan `T_air.tif`-tiedoston koko oli 1,1 TiB. Suuri koko johtui sekä siitä, että tiedostojen datatyyppi oli tarpeettomasti `Float64`, että niiden ilmeisen tehottomasta pakkauksesta. `gdalinfo`-työkalun mukaan alkuperäiset tiedostot ovat `LZW`-pakattuja, mutta suuri koko viittaa pikemminkin pakkaamattomuuteen.

Jotta myös näitä tiedostoja voisi tarkastella, ne pakattiin `gdalwrap`-työkalulla uudelleen lämpötila-raportointiin riittävällä `Float32`-datatyypillä ja `DEFLATE`-pakkauksella seuraavasti (esimerkkinä Espoon vuoden 2024 normaaleihin kasvillisuustietoihin pohjautuvan mallinnuksen tulos alkuperäisestä hankkeesta):

```
gdalwarp -multi -of GTiff -ot Float32 -ovr NONE -wo NUM_THREADS=8 -co  
TILED=YES -co COMPRESS=DEFLATE -co PREDICTOR=3 -co ZLEVEL=9 -co  
NUM_THREADS=8 <projektikansion_polku>/model_outputs/espoo2024max/interme-  
diate/T_air.tif <projektikansion_polku>/model_outputs/es-  
poo2024max/T_air_float32.tif
```

Tämä pakkausoperaatio pienensi tiedostojen koot noin 0,05 prosenttiin alkuperäisestä. Esimerkiksi edellä mainittu esimerkkitiedosto pieneni 1,1 tebitavusta 574 mibitavuun.

Myös näille mallin tulosrasterille luotiin erilliset pyramidi- ja metadatatiedostot `gdaladdo`- ja `gdalinfo`-komentorivityökaluilla *Maanpeiteaineistojen esikäsittely* -kappaleessa esitetyllä tavalla. Tämän jälkeen tulostiedostot vietiin ulos mallinnsympäristönä käytetyltä Puhdilta.

Varsinaiset ekosysteemitilin vaatimat tilastoluvut laskettiin lopuksi kullekin `gdal_calc`-laskimen avulla luodulle `T_air_diff_to_no_veg.tif` -tiedostolle QGISin *Raster layer zonal statistics* -työkalulla. Koska Tampereen maankäyttömallia ei alkuperäisessä hankkeessa ollut heti aluksi ymmärretty leikata analyysialueen kokoiseksi, se jouduttiin tuolloin tekemään tässä vaiheessa. Työkalu suoritettiin seuraavin parametrein (esimerkinä Espoon vuoden 2024 tiedot alkuperäisestä hankkeesta):

```
{
  "area_units": "m2",
  "distance_units": "meters",
  "ellipsoid": "EPSG:7019",
  "inputs": {
    "BAND": 1,
    "INPUT":
"<projektikansion_polku>/espoo2024max/T_air_diff_to_no_veg.tif",
    "OUTPUT_TABLE":
"<projektikansion_polku>/espoo2024max/raster_zonal_stats_espoo_2024.gpkg",
    "REF_LAYER": 1,
    "ZONES":
"<projektikansion_polku>/hsy_land_cover/hsmpa2024_urban_espoo_uint16.tif",
    "ZONES_BAND": 1
  }
}
```

Raster layer zonal statistics -työkalu ei laske yhtä monipuolisia tilastoja kuin normaali *Zonal statistics* -työkalu, joten mikäli halutaan tietää keskiarvon lisäksi myös esimerkiksi mediaani ja keskihajonta, tarvitaan myös vektorimuotoista maankäyttömallia, jotta voidaan käyttää normaalia *Zonal statistics* -työkalua. Tässä pilottiprojektissa käytettiin kuitenkin ainoastaan *Raster layer zonal statisticsia*.

Analyysin kulku: rahamääräinen ekosysteemipalvelu-tili

Extract ERF and RR from Masselot and Gasparrini (2023)

Jos InVEST-mallin tulostama kaupungin keskilämpötila on vuorokausikeskiarvo ja se sijoittuu Masselotin ja Gasparrinin (2023) historiallisten tietojen vaihteluvälille, Masselotin ja Gasparrinin (2023) tietoja voidaan käyttää suoraan. Lataa kaikki tiedostot Masselotilta ja Gasparrinilta (2023) (katso linkki taulukossa 2).

Vaihe 1: Lataa tarvittavat paketit.

```
library(d1nm) # For creating the basis matrix
library(ggplot2) # For plotting
```

Vaihe 2: Tuo Masselotin ja Gasparrinin (2023) historialliset tiedot ja määrittele ERF-altistus-vastesuhteen (Exposure-Response Function) lämpötilaväli (käyttäen Tamperetta esimerkkinä; muuta koodissa Espoon kohdalla FI002C muotoon FI005C. Tämä koskee koko loppuosaa).

```
Temp<- read.csv('tmean_distribution.csv') #read the tmean_distribution file from Masselet and Gasparrini \(2023\)
TempTampere<-subset(Temp, URAU_CODE=="FI002C") #FI002C=Tampere, FI005C=Espoo
TempTampere<- TempTampere[,c(2:120)]
TempTampere<-as.numeric(TempTampere)
temp_range <- TempTampere
```

Vaihe 3: Määritä ERF-altistus-vastesuhde (Exposure-Response Function)

```
knots <- quantile(temp_range, probs = c(0.10, 0.75, 0.9)) #define ERF curve bend at which temperature,
#based on suggestion in Masselet and Gasparrini \(2023\)

# Create the basis matrix based on suggestion in Masselet and Gasparrini \(2023\)
basis_matrix <- onebasis(temp_range, fun = "bs", degree = 2, knots = knots)
```

```
#Load coefficient of Basis functions from Masselet and Gasparrini \(2023\)
coefs_simu<- read.csv('coef_simu.csv') #1000 simulations from the distribution of each city and age-specific coefficients (5 age groups) from Masselet and Gasparrini \(2023\)
coefs_simu<-subset(coefs_simu, URAU_CODE=="FI002C") #FI005C=Espoo
coefs_simuT1<-c(mean(coefs_simu[c(1:1000),c(4)]),mean(coefs_simu[c(1:1000),c(5)]), mean(coefs_simu[c(1:1000),c(6)]), mean(coefs_simu[c(1:1000),c(7)]), mean(coefs_simu[c(1:1000),c(8)]))
coefs_simuT2<-c(mean(coefs_simu[c(1001:2000),c(4)]),mean(coefs_simu[c(1001:2000),c(5)]), mean(coefs_simu[c(1001:2000),c(6)]), mean(coefs_simu[c(1001:2000),c(7)]), mean(coefs_simu[c(1001:2000),c(8)]))
coefs_simuT3<-c(mean(coefs_simu[c(2001:3000),c(4)]),mean(coefs_simu[c(2001:3000),c(5)]), mean(coefs_simu[c(2001:3000),c(6)]), mean(coefs_simu[c(2001:3000),c(7)]), mean(coefs_simu[c(2001:3000),c(8)]))
coefs_simuT4<-c(mean(coefs_simu[c(3001:4000),c(4)]),mean(coefs_simu[c(3001:4000),c(5)]), mean(coefs_simu[c(3001:4000),c(6)]), mean(coefs_simu[c(3001:4000),c(7)]), mean(coefs_simu[c(3001:4000),c(8)]))
coefs_simuT5<-c(mean(coefs_simu[c(4001:5000),c(4)]),mean(coefs_simu[c(4001:5000),c(5)]), mean(coefs_simu[c(4001:5000),c(6)]), mean(coefs_simu[c(4001:5000),c(7)]), mean(coefs_simu[c(4001:5000),c(8)]))

#Load vcov, the variance-covariance matrix of the coefficients in each city and 5 age groups from Masselet and Gasparrini \(2023\)
vcov<- read.csv('vcov.csv')
vcov<-subset(vcov, URAU_CODE=="FI002C") #FI005C=Espoo
vcov_temp1<- as.numeric(vcov[c(1),c(3:17)])
vcov_temp1matrix1 <- matrix(0, ncol = 5, nrow=5)
vcov_temp1matrix1[lower.tri(vcov_temp1matrix1, diag = TRUE)]<- vcov_temp1

vcov_temp2<- as.numeric(vcov[c(2),c(3:17)])
vcov_temp1matrix2 <- matrix(0, ncol = 5, nrow=5)
vcov_temp1matrix2[lower.tri(vcov_temp1matrix2, diag = TRUE)]<- vcov_temp2

vcov_temp3<- as.numeric(vcov[c(3),c(3:17)])
vcov_temp1matrix3 <- matrix(0, ncol = 5, nrow=5)
vcov_temp1matrix3[lower.tri(vcov_temp1matrix3, diag = TRUE)]<- vcov_temp3

vcov_temp4<- as.numeric(vcov[c(4),c(3:17)])
vcov_temp1matrix4 <- matrix(0, ncol = 5, nrow=5)
vcov_temp1matrix4[lower.tri(vcov_temp1matrix4, diag = TRUE)]<- vcov_temp4

vcov_temp5<- as.numeric(vcov[c(5),c(3:17)])
vcov_temp1matrix5 <- matrix(0, ncol = 5, nrow=5)
vcov_temp1matrix5[lower.tri(vcov_temp1matrix5, diag = TRUE)]<- vcov_temp5

# Compute ERF values and Minimum Mortality Temperature (MMT)
erf_values1 <- basis_matrix %%% coefs_simuT1
#mmt1 <- temp_range[which.min(erf_values1)] #extreme cold weather make the MMT at cold and influence the results of centralizing and RR
mmt1 <- temp_range[which.min(erf_values1[erf_values1>=quantile(erf_values1, 0.06)])+round(119*0.06)] #Exclude extreme cold part before find MMT
#Espoo use # mmt1 <- temp_range[which.min(erf_values1[erf_values1>=quantile(erf_values1, 0.03)])+round(119*0.03)]

erf_values2 <- basis_matrix %%% coefs_simuT2
#mmt2 <- temp_range[which.min(erf_values2)]#extrem cold weather make the MMT at cold and influence the results of centralizing and RR
mmt2 <- temp_range[which.min(erf_values2[erf_values2>=quantile(erf_values2, 0.06)])+round(119*0.06)]#Exclude extreme cold part before find MMT
#Espoo use first mmt

erf_values3 <- basis_matrix %%% coefs_simuT3
mmt3 <- temp_range[which.min(erf_values3)]

erf_values4 <- basis_matrix %%% coefs_simuT4
mmt4 <- temp_range[which.min(erf_values4)]

erf_values5 <- basis_matrix %%% coefs_simuT5
mmt5 <- temp_range[which.min(erf_values5)]

# Estimate RR by centered ERF value on the MMT
erf_RR_data1 <-crosspred(basis_matrix, coef = coefs_simuT1, vcov = vcov_temp1matrix1, cen = mmt1,
model.link = "log")

erf_RR_data2 <-crosspred(basis_matrix, coef = coefs_simuT2, vcov = vcov_temp1matrix2, cen = mmt2,
model.link = "log")

erf_RR_data3 <-crosspred(basis_matrix, coef = coefs_simuT3, vcov = vcov_temp1matrix3, cen = mmt3,
model.link = "log")

erf_RR_data4 <-crosspred(basis_matrix, coef = coefs_simuT4, vcov = vcov_temp1matrix4, cen = mmt4,
model.link = "log")

erf_RR_data5 <-crosspred(basis_matrix, coef = coefs_simuT5, vcov = vcov_temp1matrix5, cen = mmt5,
model.link = "log")
```

Jos INVEST-mallin tulostama kaupungin lämpötila sijoittuu historiallisen vaihteluvälin ulkopuolelle (Esimerkiksi Espoon tapauksessa käytettiin vuorokauden maksimilämpötilaa), koodiin on tehtävä

alla olevat muutokset ERF-altistus-vastesuhteen ekstrapoloimiseksi kyseisen vaihteluvälin ulkopuolisiin lämpötiloihin.

```
# Define the temperature range for the ERF
temp_range <- seq(-25.5, 28, by = 0.01)
# Upper bound: slightly higher the highest value in InVEST output temperature grid, lower bound: lowest from tmean_distribution
# Calculate knots at specific percentiles
knots <- quantile(temp_range, probs = c(0.10, 0.75, 0.807)) #locate the original temperature at 0.9, Tampere=0.807, Espoo=0.851

# Compute ERF values
erf_values1 <- basis_matrix %>% coefs_simut1
#mmt1 <- temp_range[which.min(erf_values1)] #extrem cod weather make the MMT at cold and include the results of centralizing and RR
#mmt1 <- temp_range[which.min(erf_values1[erf_values1>=quantile(erf_values1, 0.06)])+round(119*0.06)]
mmt1 <- temp_range[which.min(erf_values1[erf_values1>=quantile(erf_values1, 0.05)])+round(568*0.06)]
#Espoo use # mmt1 <- temp_range[which.min(erf_values1[erf_values1>=quantile(erf_values1, 0.05)])+round(5351*0.05)]

erf_values2 <- basis_matrix %>% coefs_simut2
#mmt2 <- temp_range[which.min(erf_values2)]#extrem cod weather make the MMT at cold and include the results of centralizing and RR
#mmt2 <- temp_range[which.min(erf_values2[erf_values2>=quantile(erf_values2, 0.06)])+round(119*0.06)]
mmt2 <- temp_range[which.min(erf_values2[erf_values2>=quantile(erf_values2, 0.06)])+round(568*0.05)]
```

Loput koodista on samaa kuin edellä.

Vaihe 4: Poimi RR-arvo (suhteellinen riski) tietyssä lämpötilassa. Alla käytetään arvoa 24,92 astetta, joka on Tampereen kaupungin yhden päivän keskilämpötilojen keskiarvo ilman viheralueita vuonna 2020. Se voidaan korvata millä tahansa muulla InVEST-mallin tulostamalla lämpötilalla, esimerkiksi 23,82 asteella, joka on sama matriisi samalta vuodelta, mutta todellisilla maanpeitetyypeillä.

```
temp_target <- 24.92
RR1<-approx(erf_RR_data1$predvar, erf_RR_data1$a11RRfit, xout = temp_target)$y
RR2<-approx(erf_RR_data1$predvar, erf_RR_data2$a11RRfit, xout = temp_target)$y
RR3<-approx(erf_RR_data1$predvar, erf_RR_data3$a11RRfit, xout = temp_target)$y
RR4<-approx(erf_RR_data1$predvar, erf_RR_data4$a11RRfit, xout = temp_target)$y
RR5<-approx(erf_RR_data1$predvar, erf_RR_data5$a11RRfit, xout = temp_target)$y
```

(Valinnainen vaihe: Piirrä ERF-kuvaaja)

```
# Plot curve of each age group separately, 20-44, 45-65, 65-74, 75-84, 85+
plot(erf_RR_data1, xlab = "Temperature (°C)", ylab = "Relative Risk",
     main = "Relative Risk Curve (centered on MMT)")
plot(erf_RR_data2, xlab = "Temperature (°C)", ylab = "Relative Risk",
     main = "Relative Risk Curve (centered on MMT)")
plot(erf_RR_data3, xlab = "Temperature (°C)", ylab = "Relative Risk",
     main = "Relative Risk Curve (centered on MMT)")
plot(erf_RR_data4, xlab = "Temperature (°C)", ylab = "Relative Risk",
     main = "Relative Risk Curve (centered on MMT)")
plot(erf_RR_data5, xlab = "Temperature (°C)", ylab = "Relative Risk",
     main = "Relative Risk Curve (centered on MMT)")

# Plot curve in the same figure
plot(erf_RR_data1, xlab = "Temperature (°C)", ylab = "Relative Risk", col='red',
     main = "Relative Risk Curve (centered on MMT)")
lines(erf_RR_data2, col='blue')
lines(erf_RR_data3, col='green')
lines(erf_RR_data4, col='yellow')
lines(erf_RR_data5, col='orange')
```

Arvioi ekosysteemipalveluiden vaikutus ylimääräisiin kuolemantapauksiin (excess deaths) ja säästettyihin ihmishenkiin (lives saved)

Ylimääräiset kuolemantapaukset eri ikäryhmissä nykyisillä maanpeitetyypeillä tai ilman viheralueita on arvioitu alla olevalla kaavalla (Masselot ym. 2023, Gasparrini ja Leone, 2014, Huang ym. 2023):

$$Excess\ Death_{age,T} = Crude\ Death_{age} * (RR_{age,T} - \frac{1}{RR_{age,T}})$$

Kuolleiden henkilöiden määrät vuodessa ikäryhmittäin ja kunnittain perustuvat Tilastokeskuksen tietoihin. Viiteen ikäryhmään jaetut kuolleisuustiedot laskettiin ryhmittäin yhteen noudattaen Masselotin ym. (2023) tutkimuksessa käytettyjä RR-arvojen ikäryhmiä (20–44, 45–65, 65–74, 75–84, 85+). Kunkin ikäryhmän tiedot jaettiin 365:llä, jotta ne saatiin muutettua päivittäisiksi kuolemantapauksiksi mukaillen Masselot ym. 2023 lähestymistapaa, jossa RR ja ERF ovat päiväkohtaisia arvoja.

Tietyn lämpötilan aiheuttama ylimääräinen kuolleisuus voidaan arvioida yllä olevalla kaavalla käyttäen kyseisen ikäryhmän ja lämpötilan kokonaiskuolleisuuslukuja sekä suhteellista riskiä (RR). Laskenta voidaan suorittaa Excel-tiedostossa. Olettaen, että T1 on lämpötila ilman viheralueita ja T2 on lämpötila nykyisillä maanpeitetyypeillä, ekosysteemipalveluiden ansiosta säästyneiden ihmishenkien kokonaismäärä voidaan arvioida alla olevan kaavan mukaisesti.

$$\begin{aligned} & \textit{Total number of lives saved from ecosystem services} \\ & = \sum_{age=5}^{1} Life\ saved\ from\ ecosystem\ services_{age} \\ & = \sum_{age=5}^{1} (Excess\ Death_{age,T1} - Excess\ Death_{age,T2}) \end{aligned}$$

Säästettyjen ihmishenkien arvottaminen (ekosysteemipalvelun arvo)

Käytä ihmishengen tilastollista arvoa (VSL, Value of Statistical Life) kuvaamaan säästetyn ihmishengen arvoa. 20 EU-maan VSL-arvot kohdevuosina (2020, 2022, 2024) määritettiin noudattaen Huang ym. (2025) esittämää funktiota.

$$VSL_{target\ year-EUR} = VSL_{2005-USD} * PPP_{2005-EUR} * \left(\frac{CPI_{target\ year-EUR}}{CPI_{2005-EUR}} \right)$$

Suomen VSL-arvoa oikaistaan edelleen ostovoimakorjatulla (PPS) bruttokansantuotteella asukasta kohti OECD:n (2012) suosituksen mukaisesti:

$$VSL_{target\ year-EUR,Finland} = VSL_{target\ year-EUR} \left(\frac{GDP\ in\ PPS_{target\ year,EU20}}{GDP\ in\ PPS_{target\ year,Finland}} \right)$$

Ekosysteemipalvelun arvo yhdelle hellepäivälle on:

$VSL_{target\ year-EUR,Finland}$ * Total mubers of lives saved from esystem services

Ekosysteemitilinpitoa varten tarvitaan vuotuinen arvo. Tämän arvioimiseksi kerromme edellä las-
ketun yhden päivän ekosysteempipalvelun arvon niiden päivien lukumäärällä, jolloin lämpötila ylit-
tää tietyn kynnsarvon. Taulukossa 5 on esitetty niiden päivien lukumäärä, jotka ylittävät mallin
tulostaman lämpötilan, sekä niiden päivien määrä, jotka ylittävät Ilmatieteen laitoksen määrittele-
män varoitusrajan¹³.

Taulukko 5. Niiden päivien lukumäärä, jotka ylittävät mallin tulostaman lämpötilan, sekä niiden päivien
määrä, jotka ylittävät Ilmatieteen laitoksen määrittelemän varoitusrajan Tampereen ja Espoon eri lämpöti-
lan mittausasemilla.

Vuosi	Mittaus- asema	Päivät, jolloin maksimilämpötila ylittää tietyn asteen				Päivät, jolloin keskilämpötila ylittää tie- tyn asteen			
		Mallin tulos T*	27 (kuu- ma)	30 (erit- tään kuuma)	35 (äärim- mäisen kuuma)	Mallin tulos T**	20 (kuu- ma)	24 (erit- tään kuuma)	28 (äärim- mäisen kuuma)
2020	Tampere Härmälä	-	-	-	-	5	16	1	0
	Tampere Siilinkari	-	-	-	-	6	19	1	0
	Tampere Tampella	-	-	-	-	11	24	4	0
2022	Tampere Härmälä	-	-	-	-	4	23	4	0
	Tampere Siilinkari	-	-	-	-	3	21	3	0
	Tampere Tampella	-	-	-	-	-	-	-	-
2024	Espoo Tapiola	7	9	0	0	-	-	-	-
	Kirkko- nummi Mäkiluoto	0	1	0	0	-	-	-	-
	Espoo Tapiola	0	2	0	0	-	-	-	-
2024	Kirkko- nummi Mäkiluoto	0	0	0	0	-	-	-	-

*Espoo 2022 : 27,42, 2024 : 27,33

** Tampere 2020: 21.8, 2022: 23.82

Ekosysteemitilit taulukkoina: fyysinen ekosysteemi- palvelutili

¹³ <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/aarilampotilojen-terveysvaikutuksia>

Kappaleessa *Ekosysteemitilin kuvaus* kirjoitetun mukaisesti tässä kuvataan lämpösaarekeilmiön hillintäpalvelun tili ainoastaan tarjontanäkökulmasta. Palvelun yksikkönä on viilennysvaikutus asteina, jota verrataan tilanteeseen, jossa kasvillisuutta ei olisi lainkaan. Espoon tilit on esitetty taulukoissa 6 ja 7, ja Tampereen tilit taulukoissa 8 ja 9. Tampereen luvut on korjattu vuoden 2026 jatkohankkeen tulosten mukaisiksi.

Espoo

Taulukko 6. Espoon lämpösaarekeilmiön hillintäpalvelun fyysisen tarjontatilin tilinavaus taulukkona. Luvut ovat alkuperäisen hankkeen tulosten mukaisia.

Lämpösaarekeilmiön hillintäpalvelu, tarjonta, tilinavaus (2022)		
Ekosysteemityyppi (maankäyttöluokka)	Ala, ha	Viilennysvaikutus, °C
Tie (päällystetty)	990	0,40
Tie (päällystämätön)	215	0,45
Rakennus	969	0,41
Muu vettä läpäisemätön pinta	1 218	0,40
Pelto	339	0,57
Muu matala kasvillisuus	3 431	0,46
Puusto, 2–10 m	1 407	0,48
Puusto, 10–15 m	613	0,49
Puusto, 15–20 m	757	0,52
Puusto, yli 20 m	654	0,55
Avokallio	380	0,48
Paljas maa	861	0,43
Vesialue	202	0,54
Merialue	3 403	0,20
Koko alue	15 441	0,40

Taulukko 7. Espoon lämpösaarekeilmiön hillintäpalvelun fyysisen tarjontatilin tilinpäätös taulukkona. Luvut ovat alkuperäisen hankkeen tulosten mukaisia.

Lämpösaarekeilmiön hillintäpalvelu, tarjonta, tilinpäätös (2024)		
Ekosysteemityyppi (maankäyttöluokka)	Ala, ha	Viilennysvaikutus, °C
Tie (päällystetty)	995	0,47
Tie (päällystämätön)	155	0,55
Rakennus	1 008	0,48
Muu vettä läpäisemätön pinta	1 606	0,49
Pelto	348	0,67
Muu matala kasvillisuus	2 996	0,54
Puusto, 2–10 m	1 623	0,58
Puusto, 10–15 m	786	0,59
Puusto, 15–20 m	943	0,62
Puusto, yli 20 m	701	0,66
Avokallio	176	0,55
Paljas maa	503	0,48
Vesialue	201	0,61
Merialue	3 399	0,28
Koko alue	15 441	0,49

Tampere

Taulukko 8. Tampereen lämpösaarekeilmiön hillintäpalvelun fyysisen tarjontatilin tilinavaus taulukkona. Luvut ovat vuoden 2026 jatkohankkeen tulosten mukaisia.

Lämpösaarekeilmiön hillintäpalvelu, tarjonta, tilinavaus (2020)		
Ekosysteemityyppi (maankäyttöluokka)	Ala, ha	Viilennysvaikutus, °C
Tie (päällyste tuntematon)	1 043	0,80
Rakennus	1 051	0,74
Muu vettä läpäisemätön pinta	1 827	0,74
Pelto	104	1,00
Muu matala kasvillisuus	1 024	0,94
Puusto, 2–10 m	1 403	0,96
Puusto, 10–15 m	1 122	1,11
Puusto, 15–20 m	1 746	1,22
Puusto, yli 20 m	2 080	1,30
Avokallio	1	1,07
Paljas maa	458	0,78
Vesialue	3 162	1,69
Koko alue	15 021	1,14

Taulukko 9. Tampereen lämpösaarekeilmiön hillintäpalvelun fyysisen tarjontatilin tilinpäätös taulukkona. Luvut ovat vuoden 2026 jatkohankkeen tulosten mukaisia.

Kokonaispinta-ala on 109 ha tilinavausta pienempi, koska pieni, kokonaan Näsijärvelle sijoittuva osa analyysialueesta ei sisällynyt vuoden Tampereen 2022 maanpeiteaineistoon.

Lämpösaarekeilmiön hillintäpalvelu, tarjonta, tilinpäätös (2022)		
Ekosysteemityyppi (maankäyttöluokka)	Ala, ha	Viilennysvaikutus, °C
Tie (päällystetty)	886	0,73
Tie (päällystämätön)	109	0,91
Rakennus	947	0,68
Muu vettä läpäisemätön pinta	2 145	0,73
Pelto	116	1,01
Muu matala kasvillisuus	1 045	0,89
Puusto, 2–4 m	470	0,89
Puusto, 4–10 m	1 034	0,94
Puusto, 10–15 m	1 163	1,07
Puusto, 15–20 m	1 730	1,20
Puusto, yli 20 m	1 741	1,28
Avokallio	7	1,27
Paljas maa	470	0,74
Vesialue	3 049	1,67
Koko alue	14 912	1,10

Ekosysteemitilit taulukkoina: rahamääräiset ekosysteemipalvelut

Taulukoissa 10 ja 11 esitetään säästetyt ihmishenget ja niitä vastaava palvelun arvo yhden hellejakson aikana. Keskilämpötilaa käytettäessä (Tampereen tapauksessa) yhden hellejakson kokonaispalveluarvo voidaan kertoa kyseisenä vuonna esiintyneiden (x kpl) hellepäivien määrällä, jolloin saadaan vuotuinen palveluarvo. Tämä vuotuinen palveluarvo edustaa ekosysteemipalvelujen todellista tarjontaa sekä kotitalouksien vuotuista palvelujen käyttöarvoa, sillä väestötekijät on huomioitu laskelmissa.

Espoo

Taulukko 10. Ekosysteemipalvelun ansiosta säästetyt ihmishenget ja niitä vastaava palvelun arvo yhden hellejakson aikana Espoossa (perustuen heinäkuun kuumimman päivän maksimilämpötilaan).

Yksi hellejakso					
2022			2024		
Ikäryhmä	Säästetyt ihmishenget (ihmisten lkm)	Säästynyt raha / ekosysteemipalvelun arvo (milj. EUR)	Säästetyt ihmishenget (ihmisten lkm)	Säästynyt raha / ekosysteemipalvelun arvo (milj. EUR)	
20-44	0.002	0.007	0.002	0.009	
45-65	0.012	0.054	0.014	0.063	
65-74	0.023	0.102	0.026	0.116	
75-84	0.045	0.197	0.056	0.255	
85+	0.058	0.255	0.069	0.312	
Total	0.141	0.615	0.166	0.754	

Tampere

Taulukko 11. Ekosysteemipalvelun ansiosta säästetyt ihmishenget ja niitä vastaava palvelun arvo yhden hellepäivän aikana Tampereella (perustuen heinäkuun kuumimman päivän keskilämpötilaan).

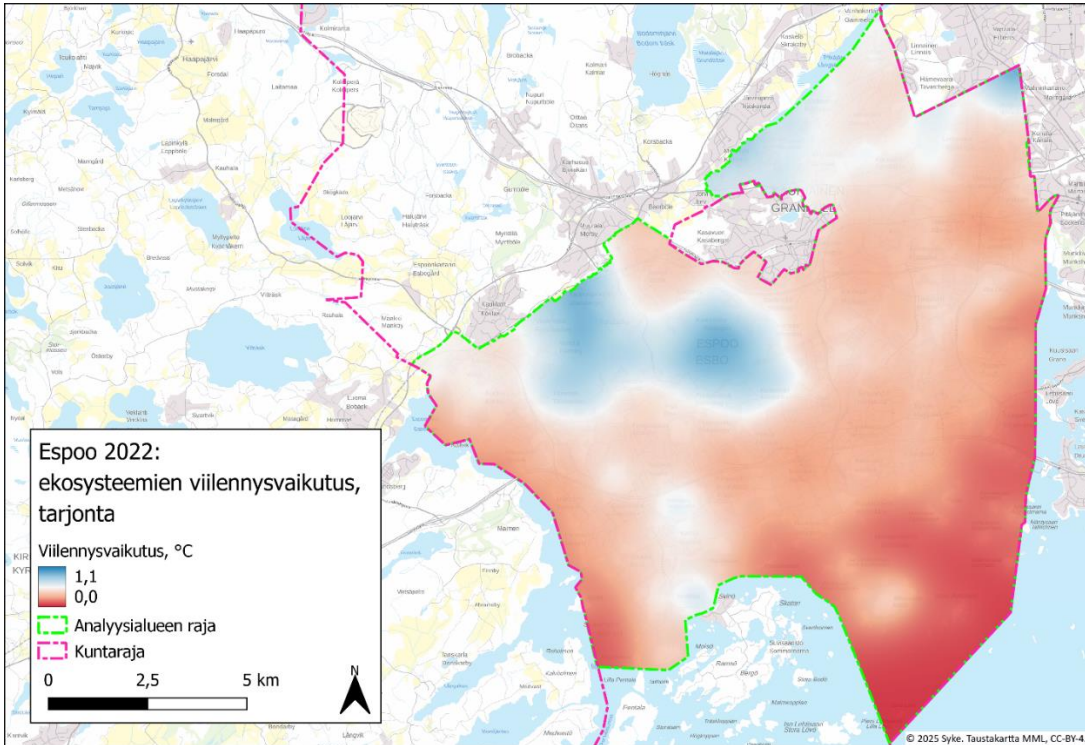
Yksi hellepäivä					
2020			2022		
Ikäryhmä	Säästetyt ihmishenget (ihmisten lkm)	Säästynyt raha / ekosysteemipalvelun arvo (milj. EUR)	Säästetyt ihmishenget (ihmisten lkm)	Säästynyt raha / ekosysteemipalvelun arvo (milj. EUR)	
20-44	0.000	0.002	0.002	0.010	
45-65	0.014	0.056	0.036	0.157	
65-74	0.040	0.165	0.083	0.363	
75-84	0.073	0.301	0.181	0.790	
85+	0.147	0.602	0.316	1.377	
Total	0.274	1.126	0.618	2.697	

Koska Tampereen tapauksessa käytettiin kuumimman päivän keskilämpötilaa, on perusteltua arvioida myös vuotuinen arvo. Taulukon 5 tietojen mukaisesti: Härmälän sääasemalla oli vuonna 2020 yhteensä 16 päivää, jolloin keskilämpötila ylitti 20 astetta ja Siilinkarin sääasemalla 21 tällaista päivää vuonna 2022 (vertailusääaseman valinta perustuu InVEST-mallinnukseen). Kertomalla päivien määrän yksittäisen hellepäivän tuottamalla palveluarvolla saadaan ekosysteemipalveluiden ansiosta säästettyjen ihmishenkien määräksi noin 4 ihmistä vuonna 2020, mikä vastaa arviolta 18 miljoonan euron säästöä. Tämän mukaisesti vuonna 2022 lämpösaarekeilmiön hillintäpalvelun ansiosta säästettiin noin kolmentoista ihmisen henki, mikä vastaa noin 56,6 miljoonan euron arvoa.

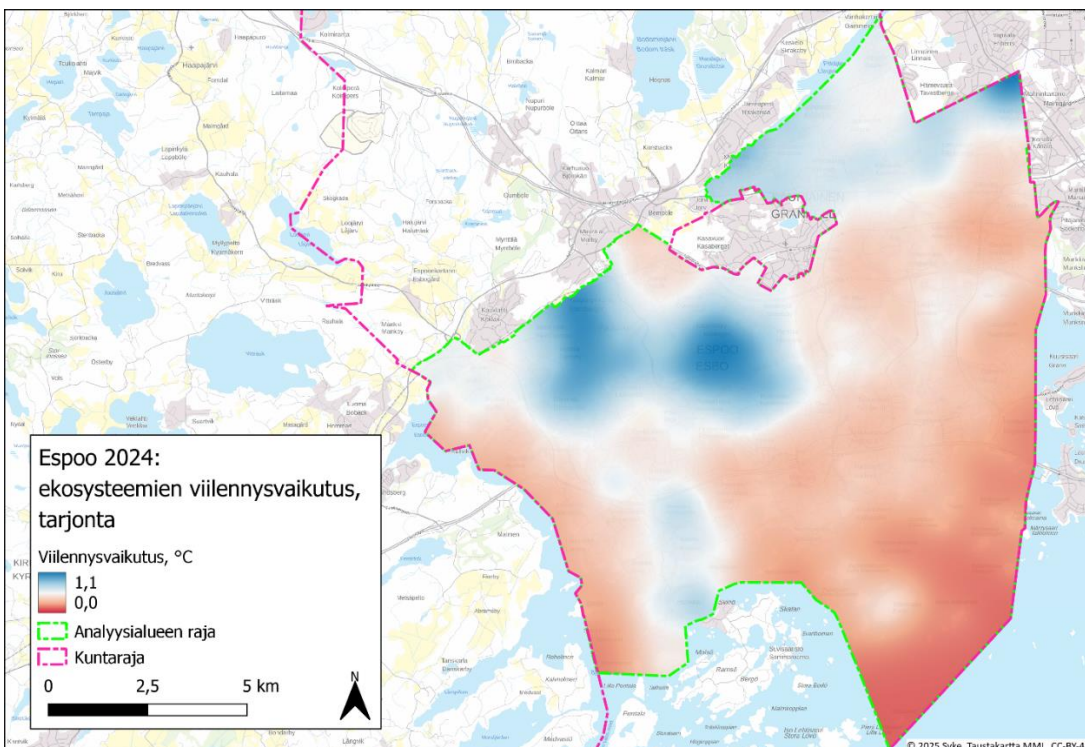
Ekosysteemitilit karttoina: fyysinen ekosysteempipalvelutili

Seuraavilla kahdella sivulla on esitetty taulukkomuotoisia tilejä vastaavat karttatarkastelut Espoon ja Tampereen kaupunkien ekosysteemitilinpitoalueilta.

Espoo

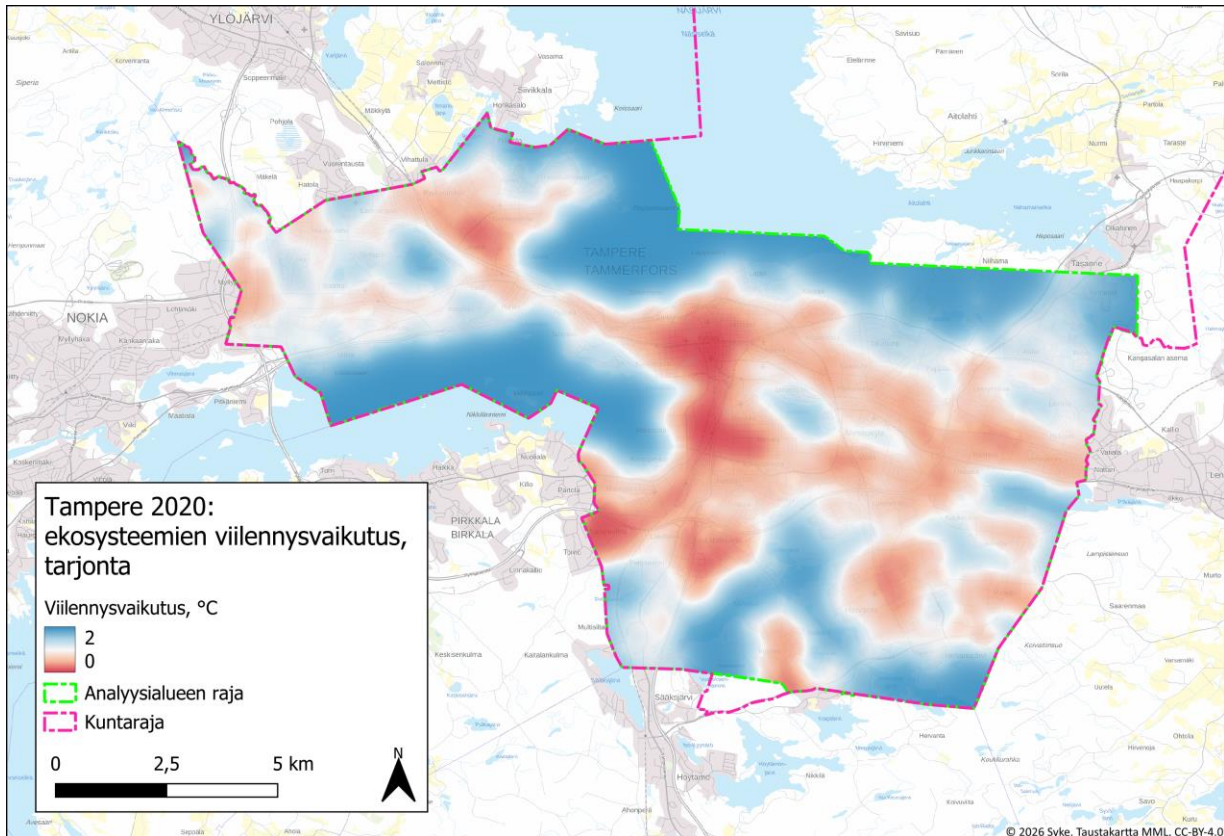


Kuva 11. Espoon lämpösaarekeilmiön hillintäpalvelun fyysisen tarjontatilin tilinavaus.

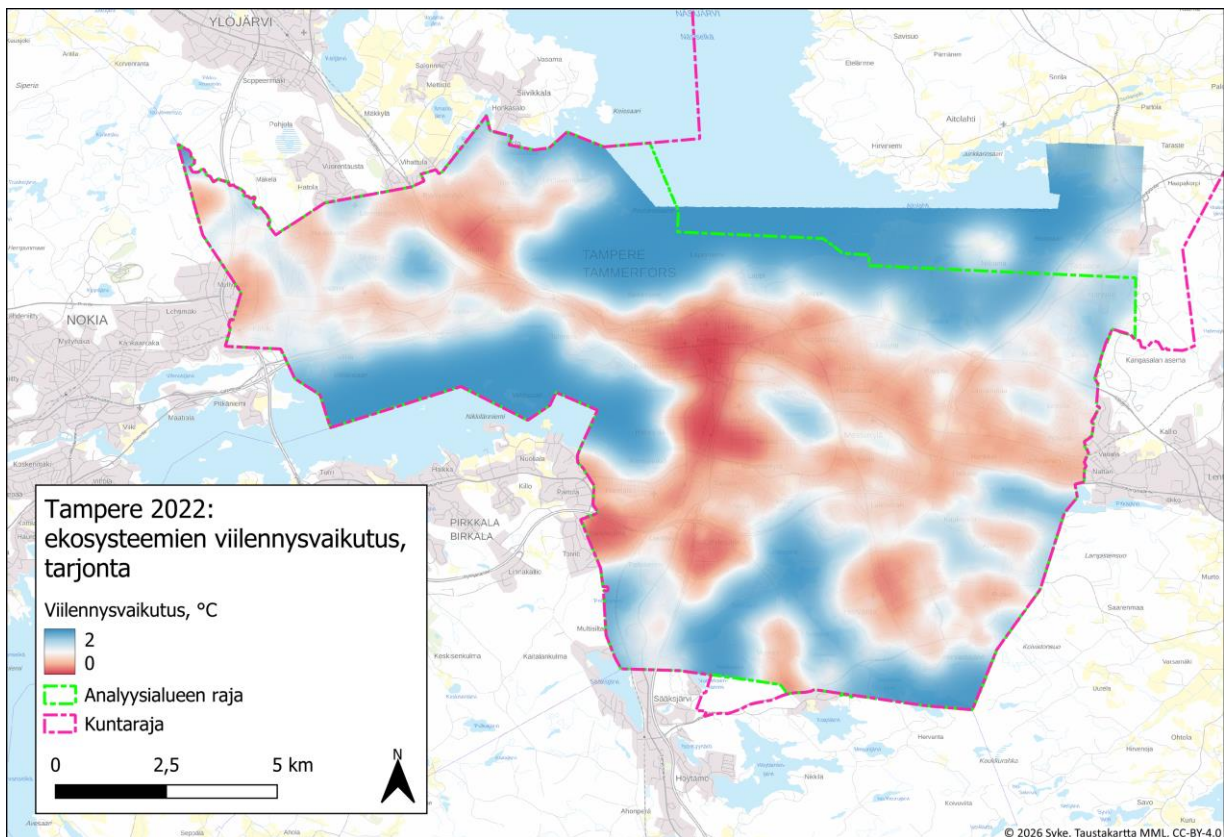


Kuva 12. Espoon lämpösaarekeilmiön hillintäpalvelun fyysisen tarjontatilin tilinpäätös.

Tampere



Kuva 13. Tampereen lämpösaarekeilmiön hillintäpalvelun fyysisen tarjontatilin tilinavaus. Kartta on korjattu vuoden 2026 jatkohankkeen tulosten mukaiseksi.



Kuva 14. Tampereen lämpösaarekeilmiön hillintäpalvelun fyysisen tarjontatilin tilinpäätös. Kartta on korjattu vuoden 2026 jatkohankkeen tulosten mukaiseksi.

Tulokset ja niiden tulkinta

Mallin kalibroimattomuus ja parametrit

Hamelin ym. (2024) malli ei selitä päiväsaikaisia absoluuttisia lämpötiloja kovinkaan hyvin, eikä sitä siksi tulisi käyttää niiden ennustamiseen, vaan mallilla tulisi ainoastaan arvioida ilman viilennysvaikutusta. Alkuperäisen projektin aikarajoitteiden vuoksi vastaavaa vertailua ei tehty, vaikka se käytettävissä olevan datan puitteissa olisi ollut tehtävissä. Jatkohankkeen tulosten perusteella kalibrointi on hyvin suositeltavaa ainakin, mikäli käytetään tämän hankkeen tapaan spatiaalisesti hyvin suuritarkkuuksista maanpeiteaineistoa, koska tulosten tarkkuus paranee selvästi. Hamelin ym. (2024) tulokset eivät välttämättä ole tarkkuudeltaan vertailukelpoisia tämän pilottiprojektin kanssa, koska tässä pilottiprojektissa käytettiin sijaintitarkkuudeltaan selvästi heidän aineistoaan tarkempaa maanpeiteaineistoa.

Mikäli mallia ei kalibroida, on vuoden 2026 jatkohankkeen perusteella suositeltavaa käyttää tämän pilottiprojektin toisessa kalibrointiajossa saatuja ja jatkohankkeessa vahvistettuja tuloksia mallin alkuparametreina, jos käytössä on suuritarkkuuksinen maanpeiteaineisto. Spatiaalisesti vähemmän tarkoilla maanpeiteaineistoilla mallin oletusarvoisissa parametreissa pitäytyminen voi sen sijaan olla perusteltua. Jatkohankkeen herkkyysoanalyysin perusteella oletusarvoisin parametreihin ei ole syytä tehdä muutoksia ilman, että muutokset on vahvistettu kalibroimalla malli.

Vesialueiden viilennysvaikutus

Alkuperäisessä hankkeessa laadittujen tulosten karttatarkasteluista on nopeasti nähtävissä, että mallin painokertoimien määrittäminen ei ole onnistunut hyvin vesialueiden osalta: vesialueet vaikuttavat olevan kuumempia kuin maa-alueet, vaikka todellisuudessa vesistöillä on veden suuren ominaislämpökapasiteetin vuoksi voimakas lämpötilanvaihteluita tasaava vaikutus, mikä kuumalla säällä käytännössä viilentää lähialueiden paikallisilmastoa (vastaavasti myöhään syksyllä vesialueet hidastavat ilman viilenemistä (Suomi & Käyhkö 2012)). Tämä on mallinnustulosten merkittävin virhe.

Vuoden 2026 jatkohankkeessa virheen lähteeksi paljastui puutteellisten tietojen varassa tehty arvio, jolla mallin oletusarvoisissa parametreissa sataan metriin asetettu viheralueiden viilennysvaikutuksen maksimietäisyys laskettiin puoleen. Jatkohankkeen herkkyysoanalyysi vahvistaa, että tällaisen muutoksen tekeminen ei ole suositeltavaa. Mikäli käytössä on spatiaalisesti tarkka maanpeiteaineisto, kuten tässä hankkeessa, on sen sijaan suositeltavaa laskea ilman sekoittumisen maksimietäisyyttä selvästi. Tässäkin on kuitenkin syytä nojautua joko erikseen kulloiselle mallinnusalueelle kalibroituihin parametreihin tai, mikäli mallin kalibrointi ei ole mahdollista, tässä hankkeessa määriteltyihin kalibroituihin parametreihin. Tässä hankkeessa määriteltyjä kalibroituja parametreja voinee pitää yleisesti Suomen oloihin soveltuvina, mikäli käytössä on spatiaaliselta tarkkuudeltaan suuri maanpeiteaineisto. Mikäli aineiston pistekoko kuitenkin on suurempi kuin 2 m × 2 m, on syytä joko kalibroida malli erikseen tai pitäytyä sen oletusarvoisissa parametreissa.

Vuoden 2026 jatkohankkeen yhteydessä testattiin myös veden ominaislämpökapasiteetin jäljittämistä varjostus- ja heijastuskertoimilla, mutta jatkohankkeen tulosten perusteella tämän ei pitäisi olla tarpeen, eikä sille löydy tukea tutkimuskirjallisuudesta, joten sitä ei voi pitää suositeltavana.

Haihduntarasterin ja lämpötilamittausten ajankohtien vastaamattomuus

Mallinnusta aloitettaessa tarkoituksena oli ensin mallintaa viilennysvaikutus kuukauden keskilämpötilasta, mutta aineistojen esikäsittelyn jälkeen ymmärrettiin, että vaikutukset jäävät pieniksi, jos referenssilämpötilat eivät ole kovin korkeita. Mallinnusta ei siis varsinaisesti kannata suorittaa kuin kuumilta päiviltä. Ekosysteemitilipidon näkökulmasta riittävä vastaavuus saataneen, jos kuuma päivä sijoittuu jokaisen tilivuoden osalta samalle kuukaudelle.

Tämän virheen vuoksi käytetyt haihduntarasterit perustuivat kuukausikeskiarvoihin. Haihdunnan painoarvo mallissa on kuitenkin varsin vähäinen, joten tästä aiheutunut virhe lienee sekin melko vähäinen.

Muut viilennysvaikutukset

Malli vahvistaa sen, että tehokkaimmin kasvillisuus viilentää ilmaa, kun latvuspeitto on mahdollisimman kattava. Vähemminkin peittävä kasvillisuus, kuten heinäpelto, saattaa viilentää kohtuullisesti voimakkaan heijastusvaikutuksen vuoksi, mutta varjostuksen vaikutus on tehokkaampaa. Vaikka alkuperäisessä hankkeessa suoritettu mallinnus edellä kerrotulla tavalla arvioi vesialueiden viilennysvaikutuksen todellista selvästi vähäisemmiksi, on vesialueen keskellä sijaitsevista puustoisista saarista, kuten Espoon Miessaaresta, nähtävissä puuston viilentävä vaikutus. Kauempana isoista vesialueista samantapaisia vaikutuksia on nähtävissä esimerkiksi Espoon Laajalahden, eteläisen Mankkaan ja Tapiolan ympäristöissä, jossa korkeaa puustoa on rakennetuksi ympäristöksi runsaasti.

Alkuperäisen hankkeen virheet on huomioitava tarkasteltaessa sen pohjalta tehtyjä, tähän ohjeeseen sisällytettyjä Espoon karttoja. Lisäksi on syytä muistaa, että Tampereen jatkohankkeessa korjatut kartat perustuvat keskilämpötiloihin, kun taas alkuperäisessä hankkeessa laaditut Espoon kartat perustuvat maksimilämpötiloihin, ja tästä syystä tämän ohjeen esimerkkikartoissa lämpötilan vaihteluväli on Tampereen kartoissa isompi (0,0–2,0 °C) kuin Espoon vastaavissa (0,0–1,1 °C). Tämänkään vuoksi eri kaupunkien karttoja ei tule verrata keskenään. Alkuperäisen hankkeen mallinnuksen puutteista huolimatta molempien kaupunkien osalta Espoon Keskuspuiston ja Tampereen Kauppi–Niihaman ulkoilualueiden tapaiset, runsaasti korkeaa puustoa sisältävät laajat viheralueet nousevat selkeästi esiin.

Vesialueiden pinta-ala ei yleensä merkittävästi muutu, ellei suoriteta laajoja maantäyttöjä, joten lämpösaarekeilmiön torjunnan näkökulmasta paras ekosysteemityyppi olisi siten sellainen, jossa latvuspeiton osuus olisi mahdollisimman suuri. Sillä, onko alue varsinaisesti metsää vai puistoa, ei tällöin ole tästä näkökulmasta merkitystä, jos puustoa vain on riittävästi takaamaan laaja latvuspeitto. Koska HSY:n maanpeiteaineistossa ei ollut erillisiä 2–4 m ja 4–10 m korkeita maanpeiteluokkia, vaan ainoastaan 2–10 m korkean kasvillisuuden luokka, ja Tampereellakin tämä ero oli olemassa vain vuoden 2022 aineistossa, jouduttiin tilipidon vertailtavuuden vuoksi asettamaan näiden kahden maanpeiteluokan parametrien arvot samaksi Tampereen vuoden 2022 aineistossa. Mikäli jokaiselta tilinpitovuodelta kuitenkin on olemassa mainitut erilliset luokat, voi 4–10 metrin luokan latvuspeittävyden arvioida suuremmaksi kuin 2–4 metrin luokan.

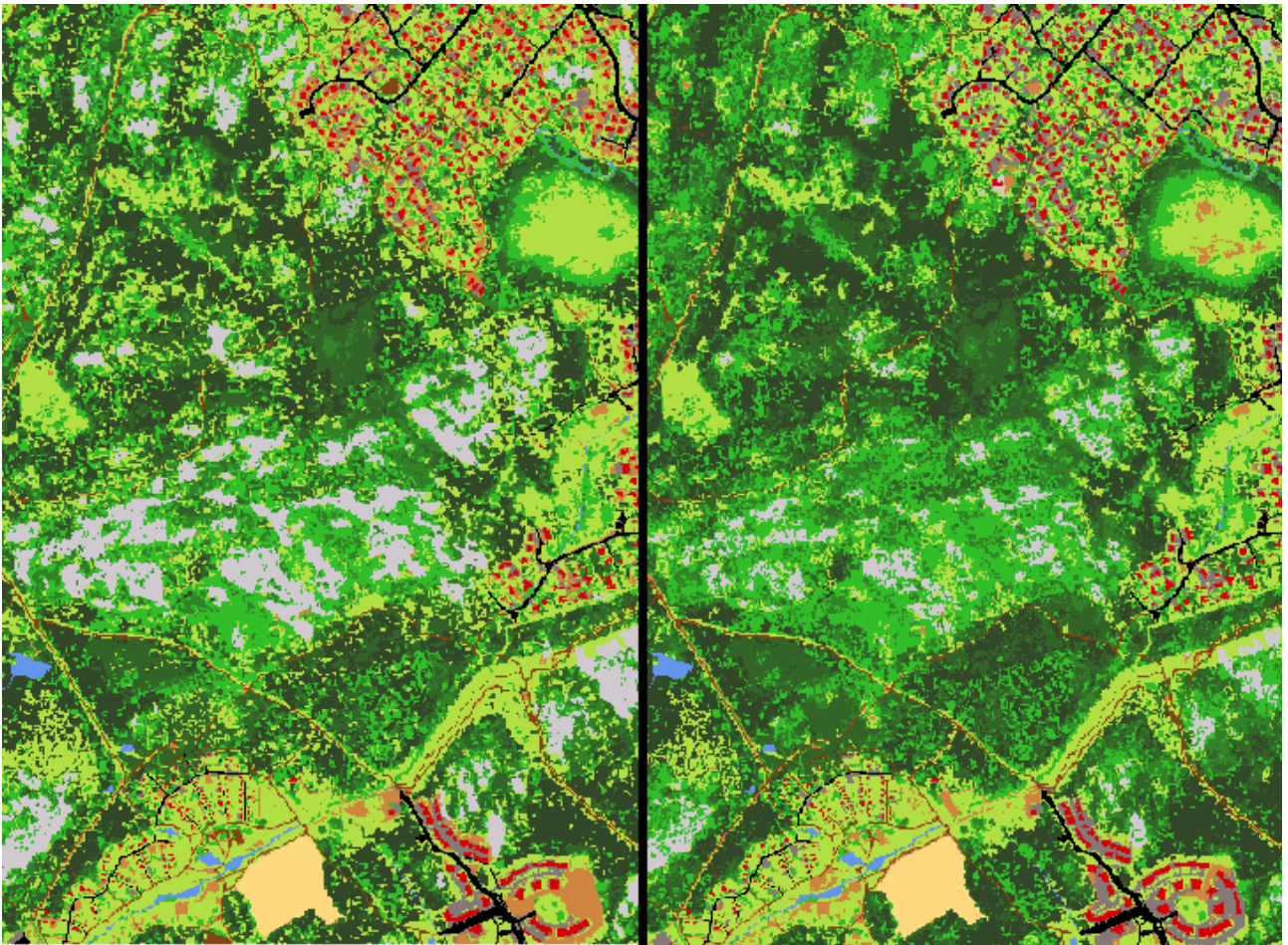
Muut tulkinnot

Espoon osalta viilennysvaikutuksen karttatarkastelussa viilennysvaikutus vaikuttaa parantuneen selvästi vuonna 2024, mikä on yllättävä tulos erityisesti huomioiden, että molempina vuosina mallinnuksessa käytetty referenssilämpötila oli sattumalta täsmälleen sama (25,0 °C). Yksi perusteista, joihin tukeutuen pilottiprojektin tilikaudeksi valittiin 2022 ja 2024 oli HSY:n maanpeiterasterien tuotantomenetelmä: tuotantomenetelmä oli vaihdettu vuoden 2020 jälkeen tekoälypohjaiseksi, ja vuosina 2022 ja 2024 oli käytetty samaa menetelmää. Vuoden 2026 jatkohankkeessa suoritettiin Tampereen muuttuneiden tulosten validoimiseksi uudet, keskilämpötiloihin perustuvat ja Tampereen kalibrointiajajojen painokertoimia käyttävät mallinnusajot myös Espoolle, mutta tältä osin tulokset eivät muuttuneet: vuoden 2024 osalta koko analyysialueen viilennysvaikutus oli edelleen yllättävästi vuoden 2022 tulosta parempi.

Tarkasteltaessa maanpeiterasteria kartalla on kuitenkin helposti havaittavissa, että yhtenäisistä tuotantomenetelmistä huolimatta puuston tunnistaminen on syystä tai toisesta onnistunut näinä vuosina varsin eri tavoin, minkä vuoksi vuoden 2022 maanpeiterasterin pinta-alasta on luokiteltu selkeästi suurempi osa avokallioksi kuin vuoden 2024 rasterin pinta-alasta (kuva 15). Tämä ero lähtöaineiston luokituksissa riittää selittämään eron ja osoittaa, kuinka herkkä malli on maanpeiteaineiston luokitukselle.

Eron juurisyiden tarkempi pohdinta tämän ohjeen puitteissa ei ole tarkoituksenmukaista, mutta esimerkiksi maanpeiteaineiston lähtöaineistona käytettyjen, laserkeilausaineistoja täydentävien ilmakuvien kuvausajankohta saattaa vaikuttaa asiaan, mikäli kuvaus on tehty fenologisesti eri aikaan vuodesta. Loppuraporteissa ilmakuvien varsinaista kuvausaikaa ei kerrota, vaan ainoastaan se, milloin HSY on toimittanut ilmakuva-aineiston maanpeiteaineiston laatijalle, mikä vuoden 2022 tapauksessa on ollut maaliskuussa ja vuonna 2024 huhtikuussa (Scalگو 2022, Scalگو 2024).

Tampereen osalta viilennysvaikutuksen karttatarkastelu ei paljasta vastaavaa eroa, tosin Espoon karttoja suuremman viilennysvaikutuksen vaihteluvälin vuoksi pienet erot eivät myöskään näy Tampereen kartoilla yhtä herkästi. Mikäli karttojen skaala muutettaisiin samaksi kuin Espoon kartoilla – mikä tosin johtaisi karttakuvan puhki palamiseen Niihaman ja Vuoreksen tapaisilla metsäisillä alueilla, joissa viilennysvaikutus on suuri – näkyy vuoden 2024 aineistossa viilennysvaikutuksen lievä heikentyminen. Vuoden 2026 jatkohankkeessa eron suuruus Tampereella laskettiin maanpeiteluokakohtaisesti, ja heikennystä oli tapahtunut kaikissa maanpeiteluokissa avokallioita lukuun ottamatta 0,00–0,07 °C. Ero on kuitenkin niin vähäinen, ettei se yksin riitä alueellisten johtopäätösten tekemiseen, mutta toisaalta Espoon esimerkin valossa maanpeiterasterin tuotannon synnyttämää vaikutusta asiaan ei voi sulkea pois. Tämän ohjeen näkökulmana ovat ekosysteemitilinpidoon tarpeet, mutta suunnittelun näkökulmasta keskimääräisen viilennysvaikutuksen voisi myös laskea alueittain ja tehdä näistä teemakartan. Tätä voisi sitten esimerkiksi verrata alueen latvuspeiton kehitykseen.



Kuva 15. Näyte HSY:n maanpeiteaineistosta Espoon keskuspuiston alueelta Puolarmetsän ja Sepänkylän välisestä maastosta. Kuvassa vasemmalla vuoden 2022 aineisto ja oikealla vuoden 2024 aineisto. Kuvasta on selvästi nähtävissä, että vuonna 2024 selvästi suurempi osa alueesta, joka on vuonna 2022 luokiteltu avokallioksi (harmaa väri), on vuonna 2024 luokiteltu puustoluokkiin (eri vihreän värisävyt, tummempi sävy merkitsee korkeampaa puustoa).

Taloudellisten tulosten tulkinta

Espoon tapauksessa käytettiin maksimilämpötilaa. Näin ollen arvottamistuloksia voidaan tulkita vain skenaariotilanteena: jos näin korkea keskilämpötila toteutuisi, kuinka monta ihmishenkeä ja kuinka suuri rahallinen arvo voitaisiin säästää nykyisen ekosysteemyyppien jakautumisen ja rakenteen perusteella.

Tampereen tapauksessa käytettiin kuumien päivien keskilämpötiloja. Tämän vuoksi tuloksia voidaan tulkita siten, että ne mallintavat sitä, mitä näinä kuumina päivinä todellisuudessa tapahtui kyseisinä vuosina. Laajennettaessa tuloksia yhdestä hellepäivästä vuotuiseksi arvoksi arvottaminen muuttuu kuitenkin likimääräiseksi arvioksi, koska InVEST-mallinnusta varten valittiin vain yksi edustava päivä.

Taulukon 5 mukaan Härmälän sääasemalla oli 16 päivää, jolloin päivittäinen keskilämpötila ylitti 20 °C. Näistä päivistä osa oli lämpötiloiltaan alempia kuin InVEST-mallinnuksessa käytetty lämpötila ja osa korkeampia. Kun ylimääräisen kuolleisuuden luvut yhdistetään nykyisen maankäyttömallin tuottamiin lämpötiloihin ja tuloksia verrataan Masselotin ym. (2023) arvioon sekä koko maan ja Tampereen väestöön, tämän tutkimuksen vuotuiset arviot ylimääräisestä kuolleisuudesta asettuvat järkevälle vaihteluvälille suhteessa koko maan arvioon. Tulokset ovat hieman alhaisempia tai

korkeampia kuin Masselotin ym. (2023) yleinen arvio, riippuen siitä, montako hellepäivää tarkastelussa käytettiin.

Näin ollen saatua arviota vuotuisista säästetyistä ihmishengistä voidaan pitää hyväksyttävänä likimääräisenä arviona. Vuotuisen arvion tarkempaa arviointia varten kannattaa noudattaa kohdassa *“Miten vuotuinen arvo voitaisiin arvioida tarkemmin”* esitettyä työnkulkua.

Suosituksia mallinnustyöhön

Mallinnusprosessiin ryhdyttäessä työvaiheet kannattaa suunnitella siten, että työ edistyy mahdollisimman sujuvasti. Tässä pilottihankkeessa näin ei kaikilla tavoin osattu toimia, minkä vuoksi alla esitetään suosituksia vastaisia mallinuksia silmällä pitäen.

Kalibroidaanko malli vai ei?

Mallinnusta suunnitellessa on ensimmäiseksi syytä päättää, aiotaanko malli kalibroida. Mikäli näin aiotaan tehdä, tarvitaan kalibroida varten joko jostakin muusta datalähteestä, kuten pintalämpötiladatasta johdettu ilman lämpötilarasteri tai useita mittauspisteitä lämpösaarekeilmiön arvioidulta vaikutusalueelta kattava ilman lämpötila-aineisto.

Ensin mainittuja on joissakin tapauksissa valmiina saatavilla: esimerkiksi Turussa tehtyjen TURCLIM-hankkeen mittausten pohjalta kalibroituja kaupunkialueiden lämpötilarastereita on saatavilla paikkatietohakemistosta¹⁴. Jälkimmäisen kaltaista aineistoa ei sen sijaan yleensä ole valmiina saatavilla, minkä vuoksi tällöin voi olla tarpeen perustaa kuntaan anturiverkosto, jolla on mitattava dataa vähintään yhden kesän ajan, ennen kuin mallin kalibrointi voidaan suorittaa. Kalibrointi ei yleensä tarvitse toistaa vuosittain.

Jos kalibrointi ei ole tarkoitus tehdä, itse mallinnustyö voidaan aloittaa nopeammin, mikäli soveltuva maankäyttöaineisto on saatavissa.

Erityisesti suurimittakaavaisia maanpeiteaineistoja käytettäessä olisi kalibrointi varten resursisyydestä hyvä valita jokin lämpösaarekeilmiön piiriin suurella todennäköisyydellä kuuluva osa-alue kunnan koko alueen sijaan. Tämän alueen maanpeiteaineisto on sen jälkeen syytä irrottaa erilleen muusta aineistosta kalibrointiajoka varten.

Vuoden 2026 jatkohankkeen perusteella kalibroituja painokertoimien käyttäminen on suositeltavaa, mikäli käytössä on suurimittakaavainen maanpeiteaineisto. Jos käytetään tällaista aineistoa, mutta mallin kalibrointi koetaan liian työlääksi, on suositeltavaa käyttää tässä ohjeessa julkaistuja kalibroituja painokertoimia.

Mitä maankäyttöaineistoja käytetään?

Itse mallinuksia varten on ensimmäiseksi selvitettävä maankäyttöaineistojen saatavuus: millaista aineistoa on saatavissa ja miltä vuosilta, missä muodossa aineisto on saatavissa, mitä työvaiheita

¹⁴ Kts. Paikkatietohakemistosta hakusanalla ”TURCLIM löytyvät aineistot:

<https://www.paikkatietohakemisto.fi/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/search?any=turclim>

aineiston esikäsittely vaatii ja niin edelleen. Ekosysteemitilinpidon tapauksessa aineistojen ajallinen saatavuus yleensä määrää myös tilinpidon tilikauden. Tässä pilottihankkeessa aineiston esikäsittely osoittautui ennakkoon arveltua työläämmäksi, erityisesti HSY:n tiilitettyinä toimitettujen aineistojen vaatima aineistojen yhdistely, mutta myös se, ettei rasterimuotoisia aineistoja ollut saatavissa julkisista lähteistä, vaan niitä oli erikseen pyydettävä.

Maanpeiteaineistot on syytä rajata analyysialueen kokoiseksi ennen mallinnusprosessin aloittamista. Tässä projektissa näin ei ymmärretty tehdä näin heti alkuun, jolloin rajausta jouduttiin joka tapauksessa tekemään jälkikäteen *Raster layer zonal statistics* -työkalun käyttöä varten. Etukäteen tehty rajausta saattaa nopeuttaa mallinnusta.

Mitä lämpötiladataa käytetään?

Maankäyttöaineistojen saatavuuden varmistuttua järkevintä on seuraavaksi päättää, mistä ja milta päiviltä mitattuja lämpötiloja käytetään referenssilämpötilana. Ilmatieteen laitoksen julkista sääasemaverkostoa voi käyttää tähän, mutta mahdollisista kunnan omista antureista on tässäkin hyötyä. Lämpötila on syytä valita kuumalta päivältä. Referenssilämpötilan ja maksimiarvon erotuksena voi käyttää kahta tai kolmea astetta, mikäli erillisiä mittauksia varmasti kuumasta paikasta rakennetun ympäristön keskeltä ei ole. Kaksi astetta on yleensä sopivampi luku, mikäli mallinnuksen referenssilämpötilana käytetään vuorokauden keskilämpötilaa, kun taas vuorokauden maksimilämpötilaa käytettäessä luku voi olla kolmekin astetta. Sopivia astelukuja voi haarukoida tekemällä saatavilla olevista lämpötilamittauksista kuvan Kuva 10 kaltaisia kuvaajia, jotka auttavat hahmottamaan vaihtelua. Mallinnuksessa voi harkinnan mukaan käyttää joko kuuman päivän keskilämpötilaa tai maksimilämpötilaa.

Tämän jälkeen on syytä rakentaa biofysikaalinen taulu, mikäli tämän ohjeen liitteenä oleva taulu ei esimerkiksi erilaisen maankäyttöaineiston vuoksi sovellu käytettäväksi sellaisenaan. Vaikka käytettäisiin tämän ohjeen taulua, niin on myös hyvä päättää tässä vaiheessa, mitä muutoksia tauluun mahdollisesti katsotaan tarpeelliseksi tehdä.

Mitä haihduntadataa käytetään?

Tässä pilotissa käytettiin Syken Vemala-haihduntadataa, koska Syke toteutti pilottiprojektin, ja kyse on Syken omasta datasta, jonka soveltuvuutta tähän tarkoitukseen haluttiin testata. Kyseinen data on myös selvästi tarkempaa kuin vaihtoehtoinen, Global Evaporation Databasen (Taulukko 2. Ekosysteemien viilennysvaikutusta mallinnettaessa käytetyt lähdeaineistot.) kautta saatavilla oleva data. (Kyseinen aineisto tarkastettiin lähdeaineistojen esikäsittelyn yhteydessä, mutta sitä ei käytetty varsinaisessa mallinnustyössä.) Koska haihduntadatan paino mallissa on kuitenkin melko vähäinen, ja Vemala-datan esiprosessointi haihduntarasteriksi oli melko työlästä, voi prosessia hyvin nopeuttaa ja yksinkertaistaa tyytymällä Global Evaporation Databasen dataan: tämä ei todennäköisesti vaikuttaisi tuloksiin suuresti.

Millä painokertoimilla malli painotetaan?

Mikäli malli kalibroidaan, vastaus tämän väliotsikon kysymykseen on helppo: malli tulee tällöin painottaa kalibrointiajon tulosparametreilla, ellei niiden oikeellisuus ole selvästi kyseenalaistettavissa. Vaihtoehtona on käyttää joko tämän pilottiprojektin kalibrointiajon parametreja. Mikäli niitä ei käytetä, on syytä käyttää mallin oletusparametreja, ei tähän pilottiprojektiin lähtöhypoteesien pohjalta valittuja parametreja, joiden todettiin jatkohankkeen yhteydessä vääristävän vesialueiden

viilennysvaikutusta. Tämän projektin kalibrointiajoissa saatujen parametrien käyttö painokertoimena on suositeltavaa, mikäli käytetään vastaavia suurimittakaavaisia maanpeiteaineistoja kuin tässä hankkeessa käytettiin, eikä erillistä kalibrointiajota suoriteta.

Miten edetä potentiaalisesta tarjonnasta (fyysinen suure) kohti varsinaista tarjonta- ja käyttötaseita?

Kun mallinnuksesta on saatu lämpötilojen spatiaalinen tulos, kaupungin keskilämpötilaa ja eri ekosysteemityyppien keskilämpötiloja arvioitaessa tulee valita vain ne ruudut, joissa on asutusta (esim. Tilastokeskuksen väestöruutuaineisto)¹⁵ tai jotka kuuluvat kaupunkialueeseen (esim. SYKEN YKR-kaupunkialueaineisto)¹⁶.

Miten vuotuinen arvo voitaisiin arvioida tarkemmin?

Tämän projektin pilottikokemusten perusteella ehdotamme tarkemman arvon arvioimiseksi seuraavaa työnkulkua, joka käyttää samoja menetelmiä kuin tässä ohjeessa on esitetty.

Ensin valitaan taulukosta 5 käytettävä kynnysarvo. Kuuman ilman keskilämpötilan viitearvoksi voidaan valita esimerkiksi 20 astetta. Vaihtoehtoisesti, jotta tulokset vastaisivat paremmin Masselotin ja Gasparrinin (2023) arvioita, voidaan viitearvona käyttää myös historiallisten lämpötilojen korkeinta kahta prosenttia. Tampereen tapauksessa 20,52 astetta oli kuumimpien kahden prosentin päivien kynnysarvo vuosina 1990–2019 (Masselot ja Gasparrini, 2023). Seuraavissa vaiheissa käytetään selityksen havainnollistamiseksi 20 asteen viitearvoa.

Toiseksi haetaan Ilmatieteen laitoksen historialliset lämpötilahavainnot (Ilmatieteen laitos 2025a) ja valitaan ne päivät, joiden keskilämpötilat ylittävät 20 astetta. Jos tällaisia päiviä on esimerkiksi kuusitoista, valitaan näiden päivien tarkat keskilämpötilat.

Kolmanneksi ajetaan InVEST-malli kuusitoista kertaa menetelmäosiossa kuvatulla tavalla siten, että jokaisella toistokerralla käytetään yhtä näistä kuudestatoista lämpötilahavainnosta. Jokainen kierros käsittää tällöin kaksi malliajtoa: yhden todellisten kasvillisuuspintojen mukaisen ja yhden vertailuajon ilman kasvillisuutta. Näin saadaan 16 lämpötilasarjaa, joista jokaisessa on kaksi arvoa: yksi kasvillisuuspeitteellä ja toinen ilman sitä.

Neljänneksi käytetään InVEST-mallin tuottamia lämpötiloja arvioimaan säästettyjen ihmishenkien määrä ja niiden rahallinen arvo jokaiselle näistä kuudestatoista päivästä, kuten menetelmäosiossa on kuvattu.

Lopuksi näiden 16 päivän laskennalliset arvot lasketaan yhteen. Näin saatu summa käy sekä vuotuisiksi arvoksi käyttötaseeseen että kokonaistarjonnan (total supply) arvoksi ekosysteemipalvelujen tilinpitoon.

¹⁵ https://stat.fi/tup/avoin-data/paikkatietoaineistot/vaestoruutuaineisto_1km_en.html

¹⁶ <https://www.syke.fi/en/environmental-data/downloadable-spatial-datasets#ykr-urban-zones>

Lähteitä ja lisätietoa

- Babi Almenar, J., Marando, F., Vallecillo, S., Zulian, G., Cortinovis, C., Zurbaran-Nucci, M., Chrysoulakis, N., Parastatidis, D., Heris, M. and Grammatikopoulou, I. (2023) Urban Ecosystem accounts following the SEEA EA standard: A pilot application in Europe. Publications Office of the European Union: Luxembourg. JRC133240. <https://dx.doi.org/10.2760/741116>
- Bosch, M., Locatelli, M., Hamel, P., Remme, R. P., Chenal, J., & Joost, S. (2021). A spatially explicit approach to simulate urban heat mitigation with InVEST (v3.8.0). *Geoscientific Model Development*, 14(6), 3521–3537. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-3521-2021>
- Broadbent, A. M., Coutts, A. M., Nice, K. A., Demuzere, M., Krayenhoff, E. S., Tapper, N. J., & Wouters, H. (2019). The Air-temperature Response to Green/blue-infrastructure Evaluation Tool (TARGET v1.0): An efficient and user-friendly model of city cooling. *Geoscientific Model Development*, 12(2), 785–803. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-785-2019>
- Chakraborty, T., & Lee, X. (2019). A simplified urban-extent algorithm to characterize surface urban heat islands on a global scale and examine vegetation control on their spatio-temporal variability. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 74, 269–280. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.09.015>
- European Environment Agency (2022). Climate change as a threat to health and well-being in Europe: focus on heat and infectious diseases. 68 pp. <https://doi.org/10.2800/67519>
- Gasparrini, A., & Leone, M. (2014). Attributable risk from distributed lag models. *BMC medical research methodology*, 14, 55. <https://doi.org/10.1186/1471-2288-14-55>
- Hamel, P., Bosch, M., Tardieu, L., Lemonsu, A., de Munck, C., Nootenboom, C., Viguié, V., Lonsdorf, E., Douglass, J. A., & Sharp, R. P. (2024). Calibrating and validating the Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST) urban cooling model: Case studies in France and the United States. *Geoscientific Model Development*, 17(12), 4755–4771. <https://doi.org/10.5194/gmd-17-4755-2024>
- Helsingin Seudun Ympäristöpalvelut -kuntayhtymä. (2022). Helsingin seudun maanpeiteaineisto 2022 (No. a565f7ce-32ec-438c-981c-47b3fc8e368d) [GeoTIFF]. Paikkatietohakemisto. <https://www.paikkatietohakemisto.fi/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/a565f7ce-32ec-438c-981c-47b3fc8e368d>
- Helsingin Seudun Ympäristöpalvelut -kuntayhtymä. (2024). Helsingin seudun maanpeiteaineisto 2024 (No. d8d42cb1-9f57-447c-a03e-170ae1819899) [GeoTIFF]. Paikkatietohakemisto. <https://www.paikkatietohakemisto.fi/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/d8d42cb1-9f57-447c-a03e-170ae1819899>
- Hu, Y., Wang, C., & Li, J. (2023). Assessment of heat mitigation services provided by blue and green spaces: An application of the InVEST urban cooling model with scenario analysis in Wuhan, China. *Land*, 12(5), 963.
- Huang, W. T. K., Masselot, P., Bou-Zeid, E., Fatichi, S., Paschalis, A., Sun, T., Gasparrini, A., & Manoli, G. (2023). Economic valuation of temperature-related mortality attributed to urban heat islands in European cities. *Nature communications*, 14(1), 7438. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-43135-z>
- Ilmatieteen laitos. (2025a). Havaintojen lataus—Ilmatieteen laitos. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus>
- Ilmatieteen laitos. (2025b). Itämeren muoto, ala ja tilavuus—Ilmatieteen laitos. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/itameren-muoto-ala-ja-tilavuus> (viitattu 27.3.2025)
- Korhonen, N., Kühn, T., Laapas, M., Pirinen, P., & Gregow, H. (2025). Micro-climatic temperature measurements in the Finnish city of Tampere (s. 6 files, 15.9 MB) [Dataset]. Finnish Meteorological Institute. <https://doi.org/10.57707/FMI-B2SHARE.91581AD5F518432BA4BC3DC36C427799>

- Natural Capital Alliance. (2025). Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST). Ohjelmistoversio 3.15.1. <https://doi.org/10.60793/natcap-invest-3.17.2>
- La Notte, A., Maes, J., Dalmazzone, S., Crossman, N. D., Grizzetti, B., & Bidoglio, G. (2017). Physical and monetary ecosystem service accounts for Europe: A case study for in-stream nitrogen retention. *Ecosystem Services*, 23, 18–29. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.11.002>
- MML = Maanmittauslaitos. (2025). Taustakartta (rasteri) [Map]. <https://www.maanmittauslaitos.fi/kartat-ja-paikkatieto/aineistot-ja-rajapinnat/tuotekuvaukset/taustakarttasarja-rasteri>
- MML & Syke & TK = Maanmittauslaitos, Suomen ympäristökeskus, & Tilastokeskus. (2024). Hallinnolliset alueet—SYKE. <https://metadata.ymparisto.fi/dataset/hallinnolliset-alueet>
- Marando, F., Heris, M. P., Zulian, G., Udías, A., Mentaschi, L., Chrysoulakis, N., Parastatidis, D., & Maes, J. (2022). Urban heat island mitigation by green infrastructure in European Functional Urban Areas. *Sustainable Cities and Society*, 77, 103564. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103564>
- Masselot, P., Mistry, M., Vanoli, J., Schneider, R., Lungman, T., Garcia-Leon, D., Ciscar, J. C., Feyen, L., Orru, H., Urban, A., Breitner, S., Huber, V., Schneider, A., Samoli, E., Stafoggia, M., de' Donato, F., Rao, S., Armstrong, B., Nieuwenhuijsen, M., Vicedo-Cabrera, A. M., ... EXHAUSTION project (2023). Excess mortality attributed to heat and cold: a health impact assessment study in 854 cities in Europe. *The Lancet. Planetary health*, 7(4), e271–e281. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(23\)00023-2](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(23)00023-2)
- Masselot, P. and Gasparrini, A. (2023). Temperature-related mortality exposure-response functions for 854 cities in Europe (Version 2.0.0). Published: 7.12.2023. <https://zenodo.org/records/10288665>
- OECD (2012), Mortality Risk Valuation in Environment, Health and Transport Policies, OECD Publishing. <http://dx.doi.org/10.1787/9789264130807-en>
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1–24. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>
- Ruuhela, R., Votsis, A., Kukkonen, J., Jylhä, K., Kankaanpää, S., & Perrels, A. (2021). Temperature-Related Mortality in Helsinki Compared to Its Surrounding Region Over Two Decades, with Special Emphasis on Intensive Heatwaves. *Atmosphere*, 12(1), 46. <https://doi.org/10.3390/atmos12010046>
- Scalgo. (2022). Helsingin seudun maanpeiteaineisto 2022 – Menetelmäkuvaus ja tulokset. Helsingin Seudun Ympäristöpalvelut -kuntayhtymä. https://avoidatastr.blob.core.windows.net/avoidata/AvoinData/9_Kartat/Maanpeiteaineisto/2022/HMPA2022-menetelmakuvaus.pdf
- Scalgo. (2024). Helsingin seudun maanpeiteaineisto 2024 – loppuraportti. Helsingin Seudun Ympäristöpalvelut -kuntayhtymä. https://avoidatastr.blob.core.windows.net/avoidata/AvoinData/9_Kartat/Maanpeiteaineisto/2024/HMPA2024-menetelmakuvaus.pdf
- Suomi, J. & Käyhkö J. (2012). The impact of environmental factors on urban temperature variability in the coastal city of Turku, SW Finland. *International Journal of Climatology*, 32(3), 451–463. <https://doi.org/10.1002/joc.2277>
- Syke = Suomen ympäristökeskus. (1991). Valuma-aluejako 1990 (No. {44394B13-85D7-4998-BD06-8ADC77C7455C}) [Dataset]. <https://metadata.ymparisto.fi/dataset/valuma-aluejako-1990>
- Syke = Suomen ympäristökeskus. (2023). Vesistömallijärjestelmä (WSFS) (No. {C08C0416-6605-4BC5-8956-58AAF95F0030}) [Dataset]. <https://metadata.ymparisto.fi/dataset/vesistomallijarjestelma-wsfs>
- Taha, H. (1997). Urban climates and heat islands: Albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy and Buildings*, 25(2), 99–103. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(96\)00999-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(96)00999-1)
- Tampereen kaupunki. (2020). Tampereen maanpeiteaineisto (No. d6b4d149-6465-4148-a2cc-75c5e086a3e9) [GeoTIFF]. Paikkatietohakemisto. <https://www.paikkatietohakemisto.fi/geonetwork/srv/api/records/d6b4d149-6465-4148-a2cc-75c5e086a3e9>

- Tampereen kaupunki. (2022). 2022_Maanpeiteaineisto (No. d5394f78-e9a1-447f-81e8-2c2e637340e6) [GeoTIFF]. Paikkatietohakemisto. <https://www.paikkatietohakemisto.fi/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/d5394f78-e9a1-447f-81e8-2c2e637340e6>
- Tampereen kaupunki. (2023). Sääasemien mittaustietoja [CSV].
- Tomlinson, C. J., Chapman, L., Thornes, J. E., & Baker, C. J. (2011). Including the urban heat island in spatial heat health risk assessment strategies: A case study for Birmingham, UK. *International Journal of Health Geographics*, 10(1), 42. <https://doi.org/10.1186/1476-072X-10-42>
- UN = United Nations. (2021). System of Environmental-Economic Accounting—Ecosystem Accounting (white cover version) | System of Environmental Economic Accounting. <https://seea.un.org/content/system-environmental-economic-accounting-ecosystem-accounting-white-cover-version>
- Zomer, R., J., Xu, J., Spano, D., & Trabucco, A. (2024). CMIP6-based global estimates of future aridity index and potential evapotranspiration for 2021-2060 (Versio 4) [Dataset]. Science Data Bank. <https://doi.org/10.12688/openreseurope.18110.4>