

# Yövalaistuksen ja valopäästöjen alueellinen jakautuminen Suomessa

ANTTI PETTERI HILTUNEN, TIMO KUMPULA, MARKKU TYKKYLÄINEN

*Historia- ja maantieteiden laitos, Itä-Suomen yliopisto*



*Hiltunen, Antti Petteri, Timo Kumpula & Markku Tykkyläinen (2018). Yövalaistuksen ja valopäästöjen alueellinen jakautuminen Suomessa (The geospatial distributions of night illumination and light emissions in Finland). Terra 130: 4, 175–188.*

Remotely-sensed night-time lights (NTL) reveal the occurrence of human development while excessive light emissions cause ecological impacts and may create human health hazards. The aim of this research is to find out the factors affecting the quantity of remotely-sensed NTLs in Finland at 2015. We also aim to unveil how much NTLs have changed in Finland from 1993 to 2012 and what is the share of NTLs for different land use types in Finland in 2015. Answers to these questions are achieved with satellite radiance data and data on spatial structure, multiple linear regression (MLR), and change-detection methods. National and regional MLR models were produced to explain NTL and to compare the suitability of this modelling approach in different regions. Radiance is explained by population density, industrial building density, and lit roads density. Surprisingly, the brightest areas in Finland seem to be in Närpiö, a rural area with low population density but where greenhouse farming is common. Based on change-detection, new light sources have emerged because of the expansion of mining and tourism industries.

Key words: night-time lights (NTL), light emissions, satellite radiance data, change-detection, Suomi National Polar-orbiting Partnership (Suomi-NPP)

*Antti Petteri Hiltunen, Timo Kumpula & Markku Tykkyläinen, Department of Geographical and Historical Studies, University of Eastern Finland, P.O. Box 111, FI-80101 Joensuu. E-mails: <anttil@uef.fi>, <antti.petteri.hiltunen@gmail.com>, <timo.kumpula@uef.fi>, <markku.tykkylainen@uef.fi>*

Yövalaistusta, eli ympäristölainsäädännön termein valopäästöjä on tutkittu maailmalla viime vuosikymmeninä yhä enemmän, kun öiset satelliittikuvat ovat tulleet vapaasti saataville. Esimerkiksi globaalien yövalaistuksen tutkiminen on kehittynyt aineistojen tarkentumisen myötä (Cinzano ym. 2001; Falchi ym. 2016). Öisiä satelliittikuvia on käytetty myös sosioekonomisten ilmiöiden, kuten kaupungistumisen, väestön- ja talouskasvun sekä katuvalaistuksen energiankulutuksen tutkimukseen (Amaral ym. 2006; Sánchez de Miguel ym. 2014; Bennett & Smith 2017). Vaikka valopäästöt ovat olleet ilmiönä etenkin tähtitieteilijöiden murheena, aihepiiriä on tutkittu Suomessa niukasti ympäristökysymyksenä ennen vuotta 2011 (Valosaaste... 2013). Satelliittiaineistojen sekä väestöllisen ja yhdyskuntarakenteisen paikkatiedon yhdistämiseen perustuvaa analyysiä ei ole Suomessa aiemmin tehty.

Öisen keinovalon määrä ei lisääntynyt tasaisesti kaikkialla, vaan joiltain alueilta se voi vähentyä

samalla kun uusia kirkkaita alueita muodostuu. Merkittävimmit keinovalon lähteiksi on mainittu yleensä liikenne ja asutus (Lyytimäki & Rinne 2013: 55) sekä teollisuusalueet (Kuechly ym. 2012) ja satamat (Elsahragty & Kim 2015). Teollisuusalueilla ja satamissa valopäästöjä aiheuttavat erityisesti suuret piha- ja varastoalueet, joita valaistaan kirkkaasti. Asuinalueilla kasvillisuus varjostaa valonlähteitä ja pienemmät, pienempitehoisilla valaisimilla valaistut piha-alueet tuottavat vähemmän valopäästöjä.

Maankäyttömuotojen vertailua öisen keinovalon tuottajina ovat tehneet esimerkiksi Helga Kuechly ja kumppanit (2012) Berliinissä, missä kerättiin aineistoa yöaikaan lentokoneesta ilmakuvauksella noin yhden metrin spatiaalisella resoluutiolla. Eniten öistä valoa Berliinissä tuottivat tutkimuksen perusteella kadut, teollisuuden, kaupan ja palveluiden alueet sekä julkisten palveluiden alueet, kuten sairaalat ja koulut. Nämä muodostivat noin 55 prosenttia aiheutuneista valopäästöistä. Kirk-

kaimpia alueita Berliinissä olivat lentokenttäalueet, kaupunkikeskusta ja rakennustyömaat. Kuechly ja kumppanit (2012) huomauttavat myös, että spatioaalisen resoluution tarkentuessa esimerkiksi katu-  
jen valopäästöt näyttävät pienentyvän ja joidenkin maankäyttömuotojen osalta päästöt kasvavat. Tarkemmalla aineistolla päästään lähemmäs todellisia valopäästöjen aiheuttajia, jotka voivat jäädä karkeammasta satelliittidatasta havainnoitaessa vähemmälle huomiolle.

Öisellä valolla, joka on lähes yksinomaan keinovalo, on joitakin olennaisia terveysvaikutuksia (Navara & Nelson 2007). Keinovalon haitallisuuteen ei vaikuta ainoastaan valon määrä tai kirkkaus, vaan myös aallonpituus eli se, minkä väristä valo on, sekä valaistuksen ajoitus. Esimerkiksi Espanjassa toteutetussa tutkimuksessa on todettu siniselle valolle altistumisen olevan yhteydessä korkeampaan rinta- ja eturauhassyövän riskiin. Näkyvän spektrin valon määrä ei ollut kuitenkaan yhteydessä kasvaneeseen syöpäriskiin (Garcia-Saenz ym. 2018). Led-valaisimissa käytettävä valkoinen led lisää erityisesti lyhytaaltoisen sinisen valon määrää, mikä on erityisen haitallista melatoniinin tuotannolle sekä unirytmille. Vaikka valkoisen ledin tuottama valo näyttää paljaalla silmällä valkoiselta, sinisen valon aallonpituuden (460–500 nm) suuri osuus on mahdollinen, koska monet valkoista valoa tuottavat led-valaisimet ovat itse asiassa sinistä tai ultraviolettivaloa tuottavia siruja, joissa on keltainen fosforipinnoite (Lougheed 2014). Valkoinen led-valo voi olla siksi 2,5 kertaa haitallisempaa verrattuna esimerkiksi suurpainainenatriumlamppuihin (Gaston ym. 2013; Falchi ym. 2016). Lisäksi öisen valon on todettu olevan yhteydessä kohonneeseen rintasyöpäriskiin valkoihoisilla henkilöillä, mutta ei yhtä merkittävästi tummaihoisilla (Bauer ym. 2013).

Myös öisen keinovalon ekologisista vaikutuksista on myös saatu lisää tietoa tällä vuosituhanella. Huoli majakoiden ja muiden valojen aiheuttamista lintukuolemista nousi esiin jo 1800-luvun loppupuolella, mutta muiden lajien kohdalla vasta nopea kaupungistuminen on aiheuttanut merkittäviä vaikutuksia ja herättänyt samalla kiinnostusta aiheen tutkimiseen (Rich & Longcore 2006: 2). Kevin Gaston ja kumppanit (2015) kertovat yövalon biologisten vaikutusten tutkimuksen lisääntyneen viime vuosina, mutta vaikka yksilötasolla muutokset eliöiden fysiologiassa ja käytöksessä ovat laajalti dokumentoituja, vaikutukset populaatioihin, eliöyhteisöihin ja ekosysteemeihin tunnetaan heikosti.

*Näkyvällä valolla* fysikaalisena ilmiönä tarkoitetaan sähkömagneettista säteilyä, jonka aallonpituus on noin 380–780 nanometriä (Tiensuu 2010: 6; Rees

2013: 14). Käytämme tästä säteilystä termiä näkyvä valo, mikä viittaa ihmisen silmän havaitsemaan säteilyyn, ja vaikka emme pysty näkemään muuta säteilyä, voimme esimerkiksi tuntea lämpösäteilyn vaikutuksen ihollamme. Satelliitein havaittua kirkkautta kuvaa *radianssin arvo*. Se kertoo ylöspäin suuntautuvan säteilyn määrää (Rees 2013: 26–27), josta osa heijastuu taivaalle valaistavien pintojen kautta. Jotta satelliitein havaittu aineisto kuvaisi mahdollisimman hyvin ihmisen havaitsemaa valon määrää, tulee sensorien olla mahdollisimman tarkkoja juuri näkyvän valon aallonpituuksilla.

Tässä artikkelissa käsittelemme valopäästöjä Suomessa. Tutkimuskysymyksenämme on, missä päästöt syntyvät, miten ne jakautuvat alueellisesti, ja mikä on keskeisten ihmistoimintojen, kuten väestön sijoittumisen, tuotantotoimintojen ja tiestön, merkitys yövalaistuksen muodostajina. Tutkimme myös, mikä on eri maankäyttömuotojen osuus yövalaistuksen tuottajina. Lisäksi paikallistamme öisten keinovalon lähteiden muutokset vuodesta 1993 vuoteen 2012. Varsinainen tutkimusvuotemme on 2015, jonka satelliittiaineiston olemme muuttaneet tarkastelussamme ruutuaineistoksi. Tämä mahdollistaa ihmistoimintojen vaikutuksen tutkimisen YKR- ja Digiroad-tietokantoihin perustuen monimuuttujaregressioanalyyseillä.

## Aineistot ja menetelmät

Olemme käyttäneet tutkimuksessamme yövalaistusta kuvaavana aineistona Suomi-NPP:n (*Suomi National Polar-orbiting Partnership*) VIIRS-sensorin DNB-datasta (*Visible/Infrared Imager Radiometer Suite, Day/Night Band*) muodostettua komposiittia vuodelta 2015 (NOAA 2018). Käytimme sitä selitettävänä muuttujana laatimassamme regressiomallissa sekä aineistona maankäyttömuotojen vertailussa. DMSP-satelliittien F10 ja F18 OLS-sensorilla (*Operational Line Scanner*) tuotettuja stable lights -aineistosta interkalibroituja globaaleja komposiitteja (Zhang ym. 2016; Seto Lab 2018) vuosilta 1993 ja 2012 hyödynsimme ajallisen muutoksen tutkimiseen. VIIRS-aineisto sisältää havaitun radianssin, kun taas DMSP-OLS stable lights voi saada 64 arvoa 6-bittisellä skaalalla. Näistä digital number (DN) 0 tarkoittaa pimeyttä ja 63 tarkoittaa kirkkainta havaittua arvoa. Christopher Elvidge ja kumppanit (1999) ovat julkaisseet DMSP-OLS:stä myös radianssi-kalibroituja aineistoja, mutta näitä on saatavilla vain joillekin vuosille. Stable lights -aineisto on suosituin tutkimuksissa käytetyistä DMSP-OLS -aineistoista (Huang ym. 2014).

Ihmistoiminnan vaikutusta tutkiessamme päädyimme käyttämään VIIRS-satelliittiaineistoa vuodelta 2015. Muokattuamme sen yhteismitalliseksi muiden paikkatietoaineistojen kanssa tulkitsimme havaitun radianssin 1 kilometri x 1 kilometri -ruudulle laskettuun keskiarvoon vaikuttavia tekijöitä (väestöä, valaistuja teitä sekä tuotantorakennuksia) regressioanalyysin avulla. Maankäyttömuotojen osuutta emissioiden tuottajana vertailimme myös VIIRS-datan avulla, mutta toisin kuin regressiomallinnuksessa, käytimme vertailussa havaittuja radianssin arvoja, emmekä 1 kilometri x 1 kilometri -ruudukolle laskettuja keskiarvoja, sillä maankäyttöluokitusaineistoa ei voi järkevästi yleistää neliökilometrin kokoiselle alueelle.

Regressioanalyysissä selittävänä väestötietona käytimme Tilastokeskuksen tuottamaa yhdyskuntarakenteen seurannan aineistoa (YKR) vuodelta 2015. Aineisto sisältää tilastoruuduittain väestö- ja yhdyskuntarakennetietoa Suomesta 250 metriä x 250 metriä, 1 kilometri x 1 kilometri ja 5 kilometriä x 5 kilometriä kokoisilla karttaruuduilla (*Yhdyskuntarakenteen seurantajärjestelmä...* 2015). Koska väestöruudut on luotu vain sellaisille alueille, joissa on väestöä, merkitsimme tyhjäksi jääneisiin hilaruutuihin väestön arvoksi nolla. Tieaineistona käytimme Liikenneviraston Digiroad-aineistoa, jossa valaistut tiet ovat omina viivamuotoisina vektoreinaan (Liikennevirasto 2018). Tämä yhdistettiin ruutuaineiston 1 kilometri x 1 kilometri -ruutujen kanssa, jolloin saimme tiedon siitä, kuinka monta erillistä viivasegmenttiä valaistua tietä on kunkin neliökilometrin laajuisen ruudun alueella.

Eri elinkeinonjen käytössä olevien tuotantorakennusten osoitetiedot saimme Väestörekisterikeskuksen avoimesta paikkatietoaineistosta, jossa on pistemuotoisena vektoriaineistona kaikki Suomen osoitteet. Laskimme kullekin 1 kilometri x 1 kilometri -ruudulle tuotantorakennusten lukumäärän osoitteiden perusteella. Tuloksien tarkastelussa tulee kuitenkin ottaa huomioon, että Väestörekisterikeskuksen osoiteaineistossa on jonkin verran virheitä, eikä rakennustietoja pidetä täysin luotettavina (Väestörekisterikeskus 2016). Tämä virhe vaikuttaa kuitenkin pääasiassa ruutuaineiston ruutujen rajakohdissa. Maakunnallisten regressiomallien rajaamiseen käytimme Maanmittauslaitoksen vuoden 2016 hallintorajoja.

VIIRS-aineiston spatiaalisen resoluution vuoksi kullekin 1 kilometri x 1 kilometri -ruudulle mahdun noin yhdeksän pikseliä, joiden keskipisteiden keskiarvoa käytimme kuvaamaan ruudun alueella havaittua ylöspäin suuntautuvaa valon säteilyä. Alueille, joissa VIIRS-aineiston perusteella ei ollut pysyviä valonlähteitä, määritimme hilaruudukon ruudun arvoksi nolla. Paikkatieto- ja kaukokartoit-

tusanalyysit teimme ESRI:n ArcGIS-ohjelmistolla (versio 10.2) ja tilastolliset analyysit IBM:n SPSS Statistics -ohjelmalla (versio 23). Tutkimuksen eri vaiheet esitämme kuvassa 1.

Suuresti poikkeavat havainnot vaikuttavat merkittävästi regressiomallin toimivuuteen, joten pyrimme rajaamaan niitä aineistosta hajontakuvioiden perusteella. Regressioanalyysiä varten poistimme aineistosta hyvin selvästi poikkeavat arvot eli oudokit. Kaikki ruudut, joissa radianssin arvo oli yli 150, poistettiin analyysistä. Raja-arvon valitsimme tarkastelemalla näitä hyvin selvästi suuremmat arvot. Näitä ruutuja oli vain 96, mutta niiden poistaminen nosti koko Suomen osalta mallin selitysasteen lähes 41 prosenttiin. Äärihavaintojen kanssa se oli vain noin puoli prosenttia.

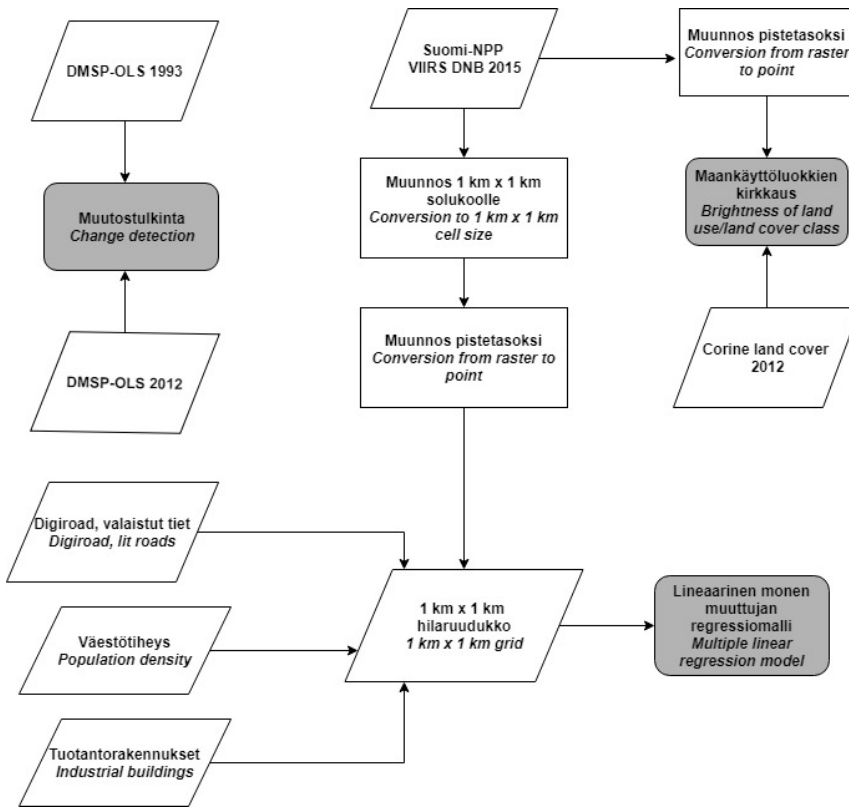
Ilmakuvatarkastelun perusteella suurin osa poikkeavan korkeista radianssin arvoista, joita malli ei kyennyt selittämään, oli peräisin kasvihuoneista. Aineistossa suurin yksittäinen arvo sijaitsi Närpiössä, ja oli 8 594 nW/sr/cm<sup>2</sup> (nanowattia/steradiaani/neliösenttimetri), joka on huomattavasti korkeampi kuin yhdestäkään suuresta kaupungista peräisin oleva valo. Esimerkiksi Helsingin keskustasta korkein havaittu radianssin arvo on 164 nW/sr/cm<sup>2</sup>. 1 kilometri x 1 kilometri -ruuduille lasketun keskiarvon suurin arvo Närpiössä on 2 819 nW/sr/cm<sup>2</sup>. Vastaavasti Helsingin keskustan korkein arvo on 117 nW/sr/cm<sup>2</sup>.

Selittävää tekijää (radianssia vuodelta 2015) mallinsimme lineaarisella regressiomallilla, jossa selittävinä tekijöinä käytimme väestötiheyttä, valaistujen teosuuksien määrää sekä tuotantoalueiden sijoittumista vuonna 2015. Regressiomallin rakenne on alla olevan yhtälön mukainen:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 \quad (1).$$

Siinä  $y$  on selitettävä muuttuja eli radianssi,  $a_0$  on vakiotermin ja parametrit  $a_1$ ,  $a_2$  ja  $a_3$  ovat selittävien muuttujien kertoimet. Muuttuja  $x_1$  kuvaa väestötiheyttä,  $x_2$  valaistujen tiesegmenttien määrää 1 kilometri x 1 kilometri -ruudulla ja  $x_3$  osoitteiden perusteella laskettua tuotantorakennusten määrää 1 kilometri x 1 kilometri -ruudulla. Muodostimme regressiomallin koko Suomen aineistosta sekä erikseen maakunnittain. Tällä tavalla saatoimme paikallistaa suurimpia poikkeavia havaintoja, sillä regressiomallien selitysasteet sekä hajontakuviot osoittavat suurta selittävyuden ja radianssin vaihtelua maakunnittain.

Muutosanalyysin avulla vertailimme DMSP-OLS stable lights -aineistosta tehtyjen interkalibroittujen globaalien komposiittien (Zhang ym. 2016) vuosien 1993 ja 2012 kuvia. Vertailun avulla



Kuva 1. Vuokaavio tutkimuksen työvaiheista ja tietoaineistoista.  
Figure 1. Flow chart of the processes and data materials of the study.

Taulukko 1. Yövalaistuksen ja ihmistoiminnan välinen keskinäisriippuvuus Suomessa vuonna 2015.  
Table 1. Mutual dependencies between night illumination and human activities in Finland, 2015.

Pearson Correlation (n=393206)	Radianssi <i>Radiance</i>	Väestötiheys <i>Population density</i>	Valaistut tie <i>Lit road</i>	Tuotantorakennusten määrä <i>Industrial building quantity</i>
Radianssi <i>Radiance</i>	1,000			
Väestötiheys <i>Population density</i>	0,543 p < 0,001	1,000		
Valaistut tie <i>Lit road</i>	0,408 p < 0,001	0,243 p < 0,001	1,000	
Tuotantorakennusten määrä <i>Industrial building quantity</i>	0,509 p < 0,001	0,531 p < 0,001	0,426 p < 0,001	1,000

tutkimme, miten valaistuksen määrä on muuttunut tällä ajanjaksolla. Näissä rasteriaineistoissa pikselien arvoilla on 64 mahdollista lukuarvoa, jossa 0 kuvaa pimeyttä ja 63 kirkkainta havaittua arvoa. Pikselin arvo ei siis kerro radianssin arvoa, eivätkä edes samalla satelliitilla otetut kuvat ole vertailukelpoisia keskenään ilman interkalibrointia. Ylisaturaation vuoksi kirkkaimpien alueiden vertailu on tällä aineistolla mahdotonta.

Maankäyttöluokat saimme Suomen ympäristökeskuksen (SYKE:n) Corine-aineistosta (*Coordination of information on the environment*). Analyseissä käytimme karkeinta aineistoa, jossa maankäyttöluokat ovat vähintään 25 hehtaarin kokoisia polygoneja. Maankäyttömuotojen merkitystä valopäästöjen esiintymiseen selvitimme käyttämällä vuoden 2015 VIIRS-aineistoa, jonka muutimme pisteaineistoksi pikselien keskipisteiden perusteella. Yhdistimme pisteet Corinen maankäyttöluokitusastoon, ja pisteiden havaituista radianssin arvoista laskimme keskiarvon kullekin Corinen polygonille.

## Tulokset

### Valopäästöt ja ihmistoiminnan vaikutus

Öisin eniten valoa Suomessa säteilevä paikka löytyy vuoden 2015 satelliittiaineiston perusteella Närpiöstä. Närpiö kuuluu Pohjanmaan maakuntaan, jossa tuotetaan yli 70 prosenttia Suomen kasvihuonekurkuista ja -tomaateista (Tilastotietokanta 2017), ja on alueen merkittävä kasvihuonevihanesten tuotannon keskittymä (Niemi & Väre 2017: 28). Kirkkaat kasvihuoneiden kasvatuslamput tuottavat enemmän keinovaloa kuin suurimpien kaupunkien keskustat. Suurimmat havaitut arvot radianssissa löytyvät sen vuoksi juuri kasvihuoneiden kohdilta. Näitä suurimpia arvoja ei mikään regressiomallin muuttujista pysty selittämään.

Närpiössä ovat Suomen kirkkaimmat keinovalon lähteet, mutta koko kunnan alueella asuu alle 10 000 henkilöä. Tämä poikkeama ilmeni erityisen selvästi, kun sovelsimme regressiomallia erikseen maakunnittain. Pohjanmaan regressiomallin selitysaste jäi vain noin puoleen prosenttiin ennen Närpiön poikkeavien havaintojen poistamista, kun se oli esimerkiksi Uudenmaan maakunnassa jopa 62 prosenttia. Poikkeavien havaintojen poistamisella pyrimme saamaan havaintojen jakauman lähemmäs normaalijakaumaa. Mallissa käytettyjen muuttujien välisistä korrelaatioista (taulukko 1) huomataan, että kaikki muuttujat korreloivat positiivisesti radianssin kanssa. Regressiomallin lu-

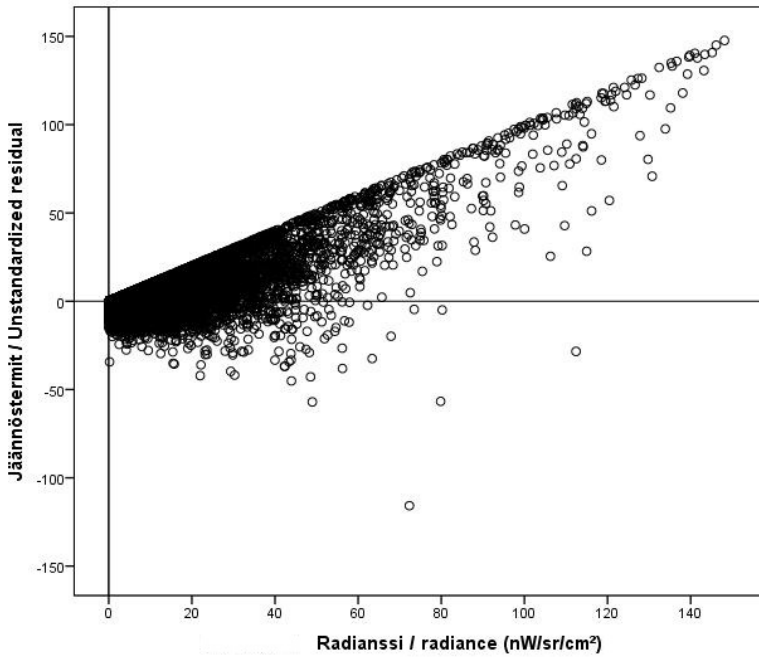
miseksi käytimme askeltavaa regressiota (*stepwise regression*), jossa muuttujia lisätään malliin yksi kerrallaan. Näin saadaan selville asteittain kunkin muuttujan osuus regressiomallin selitysasteeseen. Regressiomallin perusteella väestötiheys selittää 29,5 prosenttia radianssin arvoista, valaistujen teiden määrä 8,1 prosenttia ja tuotantorakennusten määrä 2,8 prosenttia. Koko Suomen osalta mallin selitysaste on 40,4 prosenttia (taulukko 2).

Residuaalien hajontakuviot (kuva 2) paljastaa, kuinka luotettava malli on ja missä virheen osuus kasvaa. Hajontakuviossa on huomattavissa, että jännöstermin hajonta kasvaa radianssin keskiarvon kasvaessa (ks. Holopainen & Pulkkinen 2012: 283). Malli on siis luotettavampi ennustamaan radianssin arvoa silloin, kun arvot eivät ole kovin suuria. Tämä johtuu osittain siitä, että 1 kilometri x 1 kilometri -ruutujen suuria radiansseja on aineistossa suhteellisen vähän verrattuna pienempiin arvoihin.

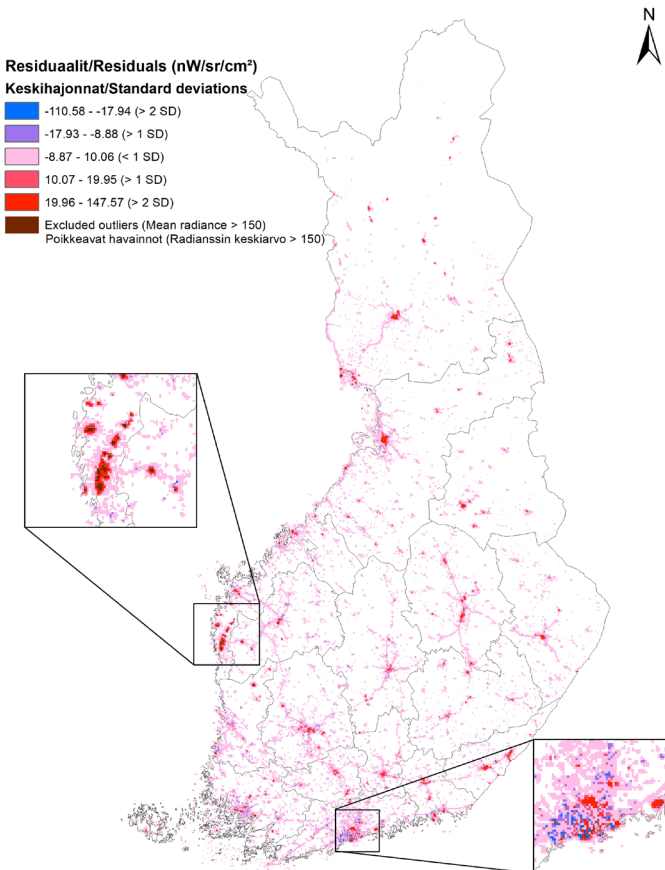
Toinen mallin ennustuskykyä heikentävä tekijä on muuttujien kyvyttömyys selittää suuria arvoja. Tämä aiheutuu siitä, että suuret radianssin arvot eivät ole aina yhteydessä esimerkiksi suureen väestötiheyteen tai valaistujen teiden määrään. Residuaalien karttaesitys vahvistaa tätä selitystä myös muualla kuin kasvihuoneiden kohdalla (kuva 3). Hajonta on pienintä kaupunkien ympärillä taajamissa ja suurinta kaupunkien keskustoissa. Residuaalien ja estimaattien hajontakuviot osoittavat, että virheen osuus kasvaa radianssin kasvaessa (kuva 2). Näitä arvoja eivät mallissa käytetyt muuttujat kykene juurikaan selittämään.

Laskimme alueelliset regressiomallit maakunnittain. Näiden mallien selitysasteet on esitetty kuvassa 4 ja Pohjanmaan ja Päijät-Hämeen residuaalit kuvassa 5. Pienin selitysaste oli Pohjanmaalla ja suurin Päijät-Hämeessä. Päijät-Hämeessä suurin havaittu 1 kilometri x 1 kilometri -ruudun keskiarvadianssi oli alle 150, joten aineistosta ei tarvinnut rajata oudokkeja pois. Sen sijaan Pohjanmaalla olivat koko Suomen aineiston korkeimmat havaitut arvot, joista rajasimme 150:n ylittäneet radianssit pois. Mallin selitysaste jäi kuitenkin alhaiseksi. Pohjanmaan regressiomallin selitysastetta olisi voinut parantaa rajaamalla enemmän korkeita arvoja pois aineistosta, mutta selitysaste olisi silti jäänyt vain noin 20 prosenttiin. Päijät-Hämeessä selittävien muuttujien keskinäiset korrelaatiot olivat suurempia kuin Pohjanmaalla, ja ne korreloivat havaitun radianssin kanssa voimakkaammin kuin keskenään. Mallin selitysaste on 65 prosenttia.

Väestötiheys ja tuotantorakennusten määrä ruudittain korreloivat voimakkaammin keskenään kuin kumpikaan näistä muuttujista 1 kilometri x 1 kilometri -ruutujen keskiarvadianssin kanssa.



Kuva 2. Yövalaistusta vuonna 2015 Suomessa selittävän regressiomallin residuaalit. Aineistosta on poistettu 96 neliökilometrin ruutua, joissa radianssi on yli 150 nW/sr/cm<sup>2</sup>.  
 Figure 2. Residuals of the regression model explaining night illumination in Finland, 2015. The 96 cells of radiance over 150 nW/sr/cm<sup>2</sup> were deleted from data.



Kuva 3. Yövalaistusta vuonna 2015 selittävän regressiomallin residuaalit. Luokittelu perustuu residuaalien keskihajontoihin.  
 Figure 3. Residuals of the regression model explaining night illumination in Finland, 2015. Classification is based on standard deviations of the residuals.

Taulukko 2. Yövalaistusta Suomessa vuonna 2015 selittävän askeltavan regressiomallin selitysasteet.  
 Table 2. Coefficients of determination of the stepwise regression models explaining night illumination in Finland, 2015.

Malli	Korjattu selitysaste	Selitysasteen muutos	F-testi	Merkitsevyys
Model	Adjusted R2	R2 Change	F-test	Sig.
Väestötiheys <i>Population density</i>	0,295	0,295	164 640,895	p < 0,001
Väestötiheys + Valaistuu tie <i>Population density + Lit roads</i>	0,376	0,081	118 536,425	p < 0,001
Väestötiheys + Valaistuu tie + Tuotantorakennusten määrä <i>Population density + Lit roads + industrial building quantity</i>	0,404	0,028	89 011,224	p < 0,001

VIF-arvojen (*Variance Inflationary Factor*) perusteella muuttujien välillä ei kuitenkaan esiintynyt sellaista merkittävää multikollineaarisuutta (ks. taulukko 3), joka olisi edellyttänyt jommankumman muuttujan jättämistä mallin ulkopuolelle.

Koko Suomen regressiomallin yhtälö (2) kuvaa, miten radianssin arvo muuttuu selittävien muuttujien arvojen muuttuessa. Mallin mukaan esimerkiksi yksi valaistuu tiesegmentti ruudulla nostaa radianssia 0,964 nanowattia/sr/cm<sup>2</sup>:

$$y = 0,004 + 0,009x_1 + 0,964x_2 + 0,055x_3 \quad (2).$$

### Valopäästöjen kasvu ja vähentyminen

Aikavälin 1993–2012 valopäästöjen muutoksen tulkinta osoittaa, että suurin lisäys valaistuksen määrässä löytyy Pohjanmaalta, ja erityisesti Närpiön alueella valopäästöjen kasvu on ollut voimakasta (kuva 6). Osa näistä uusista valonlähteistä on todennäköisesti peräisin kasvihuoneista, mutta myös uudet valaistut tiet ja asutuksen leviäminen voivat vaikuttaa tuloksiin. Muualla Suomessa uusia merkittäviä valaistuu alueita ovat uudet kaivokset. Kaivostoiminnassa tarvitaan valaistusta myös yöaikaan, koska toiminta on ympärivuorokautista. Lapin ja Kainuun uudet kaivokset Kevitsa, Suurikuusikko ja Talvivaara erottuvat satelliittiaineistosta selvästi. Myös laskettelukeskukset, kuten Levi ja Ylläs, ovat selvästi laajentuneet, ja niissä valaistuu yhä useampia rinteitä sekä alueen teitä. Lisäksi mitä ilmeisimmin loma-asuntoja on rakennettu runsaasti laskettelukeskusten läheisyyteen.

Yleisesti muutostilasta näkyy, että valonlähteet ovat voimistuneet erityisesti kaupunkien ympärillä. Tätä yövalaistuksen kasvua selittää osittain kaupun-

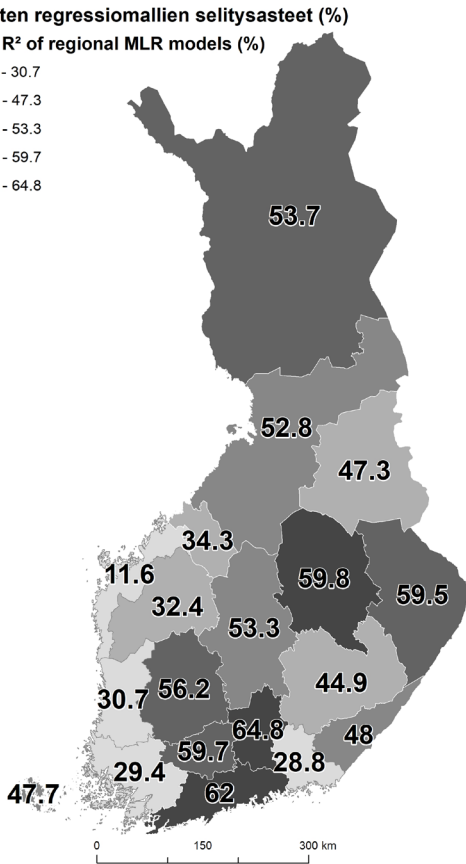
kien ympäryskuntien väestönkasvu. Suurimpien kaupunkien keskustoissa valopäästöjen määrä on pysynyt suurin piirtein ennallaan tai jopa laskenut aineiston perusteella, mutta tällä aineistolla kirkkaimpien valonlähteiden vertailu on mahdotonta.

Taulukossa 4 on esitetty muutosanalyysin perusteella saadut kirkkauden (DN) muutoksen pinta-alat luokiteltuna. Alueita, jossa kirkkaus ja siten yövalaistus oli lisääntynyt, oli 3 042 neliökilometriä enemmän kuin vähentyneen kirkkauden ja yövalaistuksen alueita. Suurin osa muutoksista on kuitenkin varsin vähäisiä, ja ne esiintyvät pienillä alueilla.

Vuonna 2015 maankäyttömuodoittain suurimmat havaitut radianssit esiintyivät satama-alueilla, liikenteen alueilla, taajamien viheralueilla ja puistoissa sekä palveluiden alueilla (taulukko 5). Yleisesti arvot ovat korkeita ihmisen muokkaamissa ympäristöissä. Kokonaan ilman havaittua valoisuutta olevat alueet ovat niukkakasvuiset kangasmaat sekä luonnonniityt. Esimerkiksi vesireittien radianssia nostaa se, että asutus on yleensä keskittynyt jokien ja vesistöjen äärelle, mutta esimerkiksi järvien suurempi pinta-ala ja etäisyys rannoista vähentävät tämän maankäyttöluokan radianssia.

### Tulosten vertailu muihin tutkimuksiin

Kirkkaimmiksi keinovalon lähteiksi Suomessa paljastuivat aineiston perusteella kasvihuoneviljelmät, jotka loistavat selkeästi kirkkaammin kuin mitkään muut toiminnat tai alueet Suomessa. Kasvihuoneet ovat yleensä kokonaan lasitettuina rakennuksia, koska niissä halutaan hyödyntää päivisin loistava auringonvalo mahdollisimman tehokkaasti. Öisin



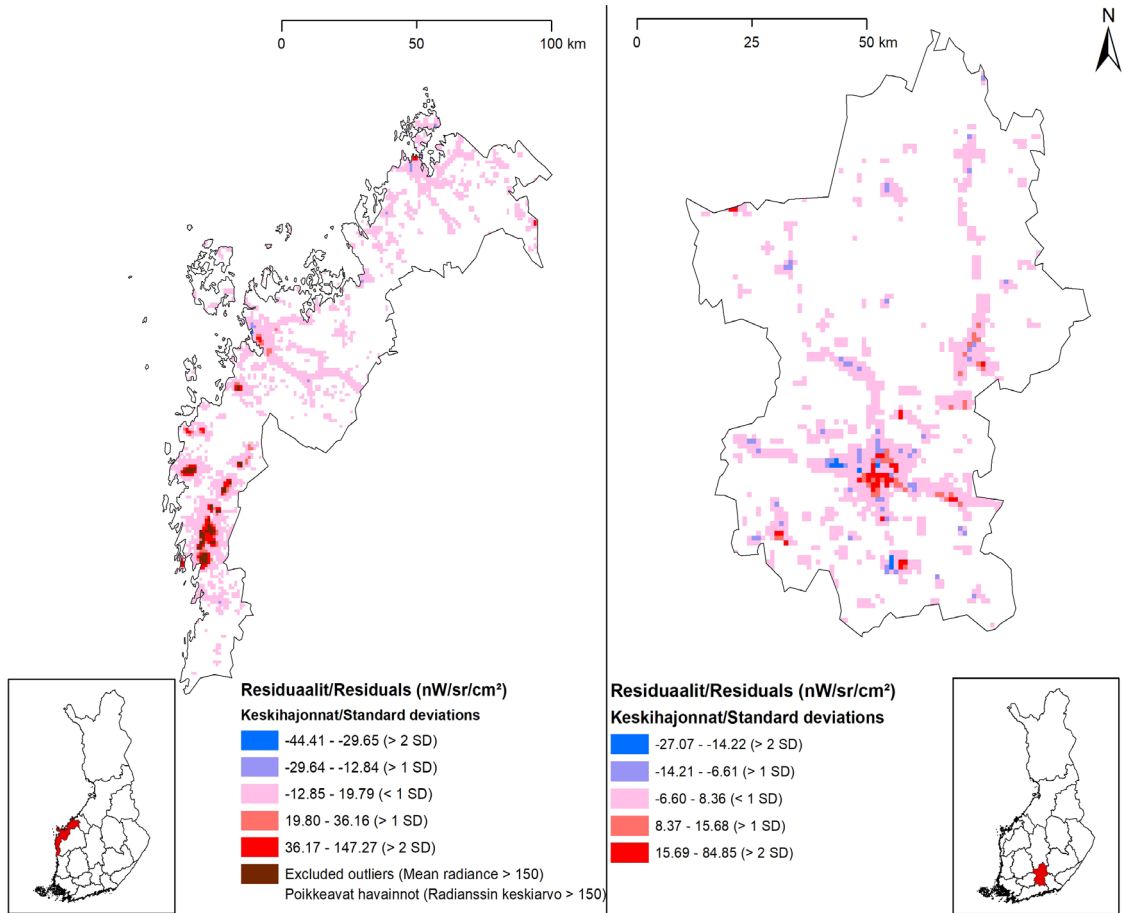
Kuva 4. Maakunnittaisen regressiomallien selitysasteet vuonna 2015.  
Figure 4. Coefficients of determination of the regional regression models, 2015.

Taulukko 3. Yövalaistusta Suomessa vuonna 2015 selittävän regressiomallin kertoimet, merkitsevyys ja multikollineaarisuudesta.

Table 3. Regression coefficients, significance and multicollinearity test of the regression model explaining night illumination in Finland, 2015.

Mallin tekijät <i>Model coefficients</i>	Kertoimet <i>Unstandardized coefficients</i>	Kertoimen keski- virhe <i>Standard error</i>	t-arvo <i>t</i>	Merkitsevyys <i>Sig.</i>	VIF <i>VIF</i>
Vakiotermi $x_0$ <i>Constant <math>x_0</math></i>	0,004	0,005	0,716	p = 0,474	-
Väestötiheys $x_1$ <i>Population density <math>x_1</math></i>	0,009	0,000	245,844	p < 0,001	1,444
Valaistu tie $x_2$ <i>Lit road <math>x_2</math></i>	0,964	0,006	158,844	p < 0,001	1,246
Tuotantorakennusten määrä $x_3$ <i>Industrial building quantity <math>x_3</math></i>	0,055	0,001	100,087	p < 0,001	2,043





Kuva 5. Päijät-Hämeen ja Pohjanmaan maakuntien regressiomallien residuaalit. Luokittelu perustuu residuaalien keskihajontoihin.

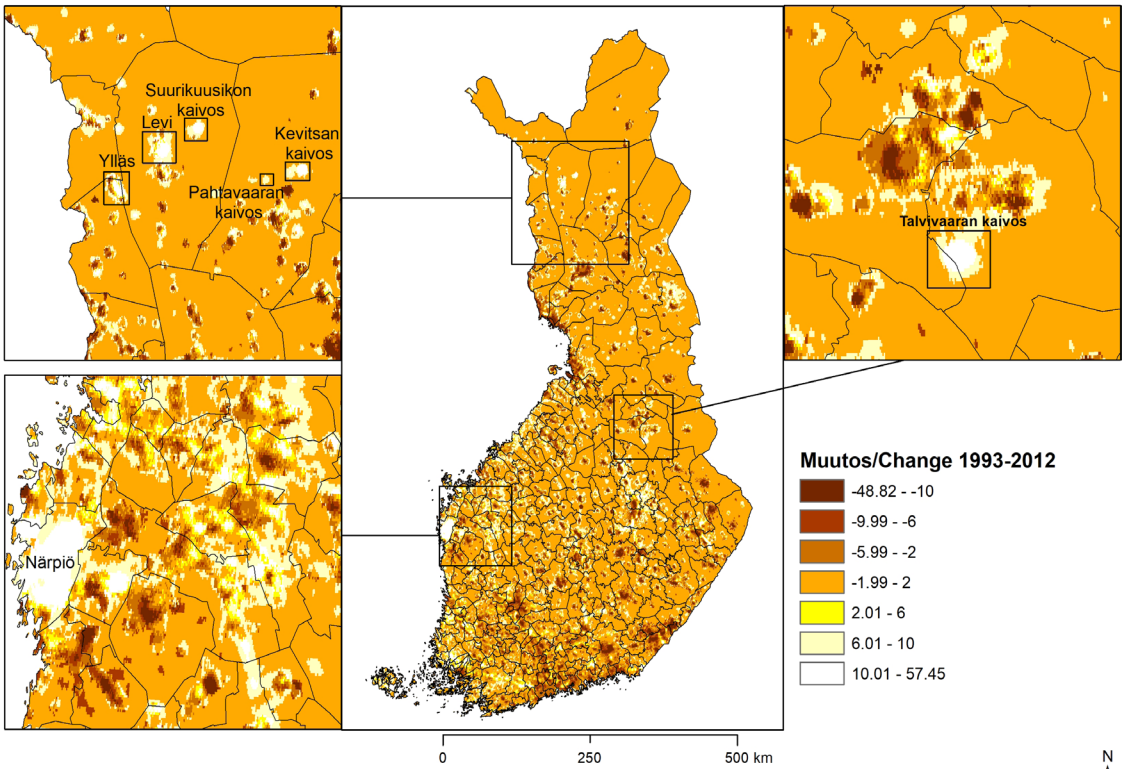
Figure 5. Residuals of the regression models of Päijät-Häme and Pohjanmaa regions. Classification is based on the standard deviations of residuals.

on taloudellisesti kannattavampaa pitää kasvatuslampuja päällä halvemman yösähkön vuoksi

Läpinäkyvistä ikkunoista ja katoista valoa pääsee karkaamaan ympäristöön, mutta valon karkaamista voidaan vähentää käyttämällä verhoja, joita asennetaan yleensä vain kasvihuoneiden seinille suorien valopäästöjen vähentämiseksi naapurustoon (Lyytimäki & Rinne 2013: 98). Kasvihuoneiden kattoja ei yleensä peitetä, joten suoraan ylöspäin suuntautuvia valopäästöjä niillä ei vähennetä. Lisäksi verhoihin investoiminen voi olla viljelijälle kallista, eivätkä ne välttämättä hyödytä itse viljelyä (Lyytimäki & Rinne 2013: 98). Yleistyneet led-valaisimet kuluttavat huomattavasti vähemmän sähköä eivätkä tuota juurikaan lämpöä (Kaukoranta ym. 2011; Dueck ym. 2012), joten valaistuksen tehoa on voitu lisätä. Led-valojen yleistymisen voi

osaltaan selittää Närpiön alueen lisääntyntä kirkkautta.

Yuki Akiyama (2012) on tutkinut yövalaistusta Japanissa satelliittiaineistosta. Hänen tuloksissaan valoisuuden määrään vaikutti eniten tiestö ja vähi-ten väestö. Meidän regressiomallianalysissämme väestötiheys selitti radianssia eniten. Erot johtuvat nähdäksemme paitsi alueesta myös aineistosta. Akiyaman (2012) tutkimus perustui DMSP-OLS-aineistoon, jossa ruudut saavat vertailuarvoja havaitun valoisuuden perusteella 6-bittiselle skaalalle, eli pikselit voivat saada arvoja nollan ja 63 välillä. Meidän käyttämämme VIIRS DNB -aineisto puolestaan on tallennettu 32-bittiseksi, jolloin mahdollisia pikselin arvoja on yli neljä miljardia, joten sillä päästään tarkempiin tuloksiin. Akiyaman laatimat residuaalien karttaesitykset ovat sa-



Kuva 6. Yövalaistuksen muutos Suomessa ajanjaksolla 1993–2012. DN-arvojen muutokset.  
 Figure 6. Change in the night illumination in Finland, 1993–2012. Changes in DN values.

Taulukko 4. Yövalaistuksen muutokset ajanjaksolla 1993–2012 pinta-aloina ja pikseliarvon (DN) muutoksina.  
 Table 4. Change in night illumination in the period of 1993–2012 shown by changes in area and pixel values (DN).

Öisen keinovalon muutos 1993–2012 (DN) <i>Change in night-time lights 1993–2012 (DN)</i>	Pinta-ala (km <sup>2</sup> ) <i>Area (km<sup>2</sup>)</i>	Muutos yhteensä (DN) <i>Total change (DN)</i>
Vähentynyt (-1 – -48) <i>Decreased (-1 – -48)</i>	46 103	-541 305
Ei muutosta (0) <i>No change (0)</i>	241 196	0
Lisääntynyt (1–57) <i>Increased (1–57)</i>	49 145	716 809
Yhteensä <i>Total</i>	336 444	175 504

Taulukko 5. Yövalaistuksen radianssi maankäyttöluokittain Suomessa vuonna 2015.  
 Table 5. Night illumination radiance by land use types in 2015.

Maankäyttömuoto/maanpeite (Corine 2012) <i>Land use/land cover (Corine 2012)</i>	Alueiden radianssi (nW/sr/cm <sup>2</sup> ) <i>Radiance of areas (nW/sr/cm<sup>2</sup>)</i>	Pinta-ala (km <sup>2</sup> ) <i>Area (km<sup>2</sup>)</i>
Satama-alueet <i>Port areas</i>	49,2	48,3
Liikennealueet <i>Road and rail networks and associated land</i>	47,2	3,1
Taajamien viheralueet ja puistot <i>Green urban areas</i>	33,5	66,7
Teollisuuden ja palveluiden alueet <i>Industrial or commercial units</i>	30,7	656,4
Rakennustyöalueet <i>Construction sites</i>	18,6	10,7
Väljästi rakennetut asuinalueet <i>Discontinuous urban fabric</i>	10,9	3 265,3
Urheilu- ja vapaa-ajan toiminta-alueet <i>Sports and leisure facilities</i>	9,9	143,4
Kaatopaikat <i>Dump sites</i>	9,8	84,9
Lentokenttäalueet <i>Airports</i>	7,6	87,9
Maa-ainesten ottoalueet <i>Mineral extraction sites</i>	3,6	235,2
Vesireitit <i>Water courses</i>	3,3	607,1
Hedelmäpuu- ja marjapensasviljelmät <i>Fruit trees and berry plantations</i>	2,3	0,9
Merenrantakosteikot <i>Salt marshes</i>	1,7	148,6
Pellot <i>Non-irrigated arable land</i>	1,5	15 464,7

mansuuntaisia kuin tutkimuksessamme, eli virheen määrä kasvaa kaupunkien keskustojen lähetyvillä, mutta ympäröivien alueiden vähäisempää valoisuuden määrää malli pystyy selittämään melko hyvin lukuun ottamatta poikkeuksellisen suuria päästökohteita.

Jonathan Bennie ja kumppanit (2014) ovat havainneet Euroopan kattavassa tutkimuksessaan DMSP-OLS-aineistosta, että vuosien 1995 ja 2010 välillä vähentyneen valaistuksen alueita olisi Suomessa enemmän kuin lisääntyneen valaistuksen alueita. Syiksi kirkkauden vähenemiseen Euroopassa he mainitsevat talouden ja erityisesti kaivannaisteollisuuden heikentymisen sekä parantuneen energiatehokkuuden valaistuksessa. He myös huomauttavat, että koska OLS-sensorin spektraalinen erotuskyky on herkimmillään 500–800 nanometrillä aallonpituuksilla, valaistuksen tyyppin muutokset, kuten hehkulamppuista led- tai loisteputkilamppuihin siirtyminen, voivat virheellisesti näyttäytyä kirkkauden vähenemisenä. Aineisto oli heidän tutkimuksessaan rajattu leveyspiiriin 65° N eteläpuolelle, joten pohjoista Suomea heidän tutkimuksensa ei koskenut.

Verrattaessa vuosien 1993 ja 2012 DMSP-OLS-rastereita Suomen osalta, havaitaan, että valaistuksen määrä ja intensiteetti ovat selkeästi kasvaneet (taulukko 4). Kuitenkin paikoitellen keinovalon määrä näyttää vähentyneen. Osaa vähentyneestä keinovalosta eivät selitä ainakaan tievalaistuksen yösammutukset, sillä satelliitin ylilentoaika on noin kello 20–21 paikallista aikaa, ja yösammutukset alkavat aikaisintaan puolenyön aikoihin (Maanteiden... 2011). Syitä voivat olla esimerkiksi Bennien ja kumppaneiden (2014) esiintuomat seikat, kuten talouden heikentyminen erityisesti globaalin talouslaman seurauksena, valaisintyyppin muutokset ja energiatehokkuuteen panostaminen. Uudet valonlähteet Pohjois- ja Itä-Suomessa ovat pääosin hiihtokeskuksia ja kaivoksia, kun taas kasvihuoneviljelyn laajeneminen on lisännyt keinovalon lähteitä erityisesti Pohjanmaalla ja Länsi-Suomessa. Tulkintaa vaikeuttaa aineistojen saatavuus ja kattavuus, sillä Suomen pohjoisen sijainnin ja revontulien aktiivisuuden johdosta satelliittiaineisto ei liene täysin virheetöntä.

Ruututietokannan aineistojen monipuolisempi hyödyntäminen paremman regressiomallin luomiseksi voisi auttaa valopäästöjen syiden ja aiheuttajien tarkempaa selvitystä saamista. Esimerkiksi ruututietokannan aineistossa oleva työpaikkojen lukumäärä pystyi alustavien analyysien mukaan selittämään melko hyvin keinovalon määrää niillä alueilla, joilla ei ole niin paljon asukkaita.

Vaikka tässä tutkimuksessa on keskitytty yhtä kaupunkia huomattavasti suurempaan alueeseen, ja

valopäästöjen aiheuttajaksi luokitellut maankäyttömuodot kuvaavat koko Suomen tilannetta, ovat tulokset samansuuntaisia kuin Helga Kuechlyn ja kumppanien (2012) saamat tulokset, jotka perustuvat tarkkaan ilmakehän aineistoon Berliinistä: satama-, teollisuus- ja liikennealueet tuottavat hyvin korkeita arvoja verrattuna esimerkiksi asuinalueisiin. Suurin eroavaisuus Kuechlyn ja kumppanien (2012) tuloksiin on puistojen valopäästöissä, jotka olivat heidän tutkimuksessaan kirkkaudeltaan ja päästösuudeltaan selvästi alhaisemmat kuin teollisuuden ja palveluiden päästöt. Tätä saattaa selittää osaltaan käyttämämme satelliittidatan karkeampi resoluutio, joka saattaa nostaa joidenkin taajamien viheralueiden ja puistojen alueiden arvoa liian korkeaksi Suomessa, erityisesti jos nämä alueet sijaitsevat kaupunkikeskusten välittömässä läheisyydessä.

## Yhteenveto

Yövalaistuksen määrää selittävät parhaiten väestötiheys ja valaistujen teiden määrä. Alueellisten regressiomallien selitysasteet olivat pääosin hyviä, mutta niissä oli myös suurta vaihtelua. Kuitenkin Pohjanmaata lukuun ottamatta kaikissa maakunnissa alueellisen mallin selitysaste oli yli 28 prosenttia, ja puolessa maakunnista selitysaste ylitti 50 prosentin rajan. Mallin selittävät muuttujat eivät kyenneet luotettavasti ennustamaan korkeita radianssin arvoja, joten niiden ennustamiseksi olisi löydettävä suuria valonlähteitä paremmin selittäviä muuttujia tai mallirakenteita. Malli onnistui ennustamaan hyvin esimerkiksi asutuksesta aiheutuvaa valoa, sillä väestötiheys selitti vuonna 2015 lähes kolmanneksen Suomen kattavan mallin valopäästöistä, mutta suuria valopäästöjä aiheuttavien maankäyttöluokkien alueilla ei ole juuri lainkaan väestöä. Siksi valaistuksen määrää pitäisi selittää myös muilla muuttujilla. Tuotantorakennusten osoitetieto lisäsi regressiomallin selitysastetta hieman, mutta mahdollisissa jatkotutkimuksissa on tarpeen käyttää validimpia tuotantoa ja liikennealueita kuvaavia muuttujia. Lineaarisen regressiomallin sijaan saattaisivat kehittyneemmät regressiomallit (mm. epälineaariset, GWR ja Kernel-tasoitettut mallit) soveltua paremmin ennustamaan valoisuuden määrän vaihtelua ja erityisesti sen korkeita arvoja silloin kun arvot perustuvat johonkin muuhun kuin väestötiheyteen.

Muutosanalyysi vuodesta 1993 vuoteen 2012 paljasti, että kaupungeissa suhteellinen valaistuksen määrä on pysynyt lähes ennallaan tai laskeutunut, mutta kaupunkien ympärillä olevissa asutuskeskitymissä valaistuksen määrä on pääosin kas-

vanut. Tätä selittävät esimerkiksi väestön ja samalla asutuksesta johtuvan valaistuksen hajaantuminen kaupunkien ympäryskuntiin. Uusia valonlähteitä on syntynyt myös syrjäisille alueille, esimerkiksi Lappiin ja Kainuuseen, kaivostoiminnan laajenemisen tuloksena, mutta myös matkailukohteiden valaistus on kasvanut. Matkailun ja valaistuksen lisääntymisiin liittyy keskinäisiä ongelmatekijöitä. Revontulet ovat monelle syy matkustaa pohjoiseen, mutta lisääntyvä valaistuksen määrä vaikeuttaa niiden näkemistä varsinkin majoituspaikkojen välittömässä läheisyydessä. Esimerkki osoittaa, että valaistuksen suunnittelu on varsin tärkeää haja-asutusalueillakin.

Maankäyttömuotoja vertailtaessa ihmistoiminnan alueet erottuvat selkeästi luonnontilaisemista maankäyttömuodoista. Lisäksi joidenkin luonnontilaisten alueiden ihmistoiminnan alueita korkeammat radianssiarvot johtuvat todennäköisesti valitun maankäyttöluokan heterogeenisyydestä. Tällöin esimerkiksi vesireittien suhteellisen korkeaa keskiarvoa selittää jokin varrella oleva asutus ja muu ihmistoiminta. Tarkempaan aineistoon perustuva maankäyttömuotojen valopäästöjen kartoitus voisi auttaa tunnistamaan tarkemmin joidenkin maankäyttömuotojen osuutta valopäästöjen tuottajina. Karkean resoluution vuoksi esimerkiksi teiden valopäästöt voivat vaikuttaa pinta-alaltaan suhteettoman suurilta yli 300 metrin spatiaalisella resoluutiolla verrattuna esimerkiksi yhden metrin resoluutioon.

Jatkossa olisi hyödyllistä selvittää, miten eniten valopäästöjä aiheuttavien toimintojen ja maankäyttömuotojen tilanne voitaisiin parhaiten ratkaista menettämättä valaistuksen tuomia hyötyjä. Lisäksi voitaisiin tutkia, onko valoisuuden määrässä havaittavissa muutoksia satelliittiaineiston perusteella sen jälkeen, kun valaistusjärjestelmää kehitetään joillain alueilla. Jos valaistuksessa siirrytään laajasti myös sinisestä valosta suodatettuihin valkoisiin led-valaisimiin, on aineisto todennäköisesti kerättävä jollain muulla tavalla, koska nykyisten satelliittien havaitsemat aallonpituudet eivät havainnoi sinisen valon kasvua.

## Kiitokset

Artikkelin viimeistelyn on osittain rahoittanut Strategisen tutkimuksen neuvosto (Suomen Akatemia, projekti 312703). Kirjoittajat kiittävät *Terra*-lehden anonyymeja arvioitsijoita rakentavasta ja nopeasta palautteesta.

## KIRJALLISUUS

- Akiyama, Y. (2012). Analysis of light intensity data by the DMSP/OLS satellite image using existing spatial data for monitoring human activity in Japan. *Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 1–2: 25–30, 2012.
- Amaral, S., A. Monteiro, G. Camara & J. Quintanilha (2006). DMSP/OLS night-time light imagery for urban population estimates in the Brazilian Amazon. *International Journal of Remote Sensing* 27: 5, 855–870.
- Bauer, S., S. Wagner, J. Burch, R. Bayakly & J. Vena (2013). A case-referent study: light at night and breast cancer risk in Georgia. *International Journal of Health Geographics* 2013 12: 23. 10 s.
- Bennett, M. & L. Smith (2017). Advances in using multitemporal night-time lights satellite imagery to detect, estimate, and monitor socioeconomic dynamics. *Remote Sensing of Environment* 192, 176–197.
- Bennie, J., T. Davies, J. Duffy, R. Inger & K. Gaston (2014). Contrasting trends in light pollution across Europe based on satellite observed night time lights. *Scientific reports* 4: 3789.
- Cinzano, P., F. Falchi & C., Elvidge (2001). The first world atlas of the artificial night sky brightness. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 328: 3, 689–707.
- Dueck, T. A., J. Janse, B. A. Eveleens, F. L. K. Kempkes, & L. F. M. Marcelis, (2012). Growth of tomatoes under hybrid LED and HPS lighting. *Acta Horticulturae* 952, 335–342.
- Elsahragty, M. & J.-L. Kim (2015). Assessment and Strategies to Reduce Light Pollution using Geographic Information Systems. *Procedia Engineering* 118, 479–488.
- Elvidge, C., K. Baugh, J. Dietz, T. Bland, P. Sutton & H. Kroehl (1999). Radiance calibration of DMSP-OLS low-light imaging data of human settlements. *Remote Sensing of Environment* 68: 1, 77–88.
- Falchi, F., P. Cinzano, D. Duriscoe, C. Kyba, C. Elvidge, K. Baugh, B. Portnov, N. Rybnikova & R. Furgoni (2016). The New World Atlas of Artificial Night Sky Brightness. *Science Advances* 2: 6, e1600377.
- Garcia-Saenz, A., A. Sanchez De Miguel, A. Espinosa, A. Valentín, N. Aragonés, J. Llorca, P. Amiano, V. Martín Sánchez, M. Guevara, R. Capelo, A. Tardón, J. J. Jiménez-Moleón, A. Roca-Barceló, B. Pérez-Gómez, T. Dierssen-Sotos, T. Fernández-Villa, C. Moreno, J. García-Pérez, G. Castaño Vinyals, M. Pollán, M. Aubé & M. Kogevinas (2018). Evaluating the association between artificial light-at-night exposure and breast and prostate cancer risk in Spain

- (MCC-Spain study). *Environmental Health Perspectives* 126: 4, 047011.
- Gaston, K., J. Bennie, T. Davies & J. Hopkins (2013). The ecological impacts of nighttime light pollution: a mechanistic appraisal. *Biological Reviews* 88: 4, 912–927.
- Gaston, K., M. Visser & F. Hölker (2015). The biological impacts of artificial light at night: the research challenge. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 370: 20140133.
- Holopainen, M. & P. Pulkkinen (2012). *Tilastolliset menetelmät*. 360 s. Sanoma Pro, Helsinki.
- Huang, Q., X. Yang, B. Gao, Y. Yang & Y. Zhao (2014). Application of DMSP/OLS nighttime light images: A meta-analysis and a systematic literature review. *Remote Sensing* 2014: 6, 6844–6866.
- Kaukoranta, T., L. Särkkä, J. Näkkilä, A. Koivisto & K. Jokinen (2011). Kehittyvä teknologia vähentää kasvihuoneen energiankäyttöä. *Maaseudun tiede* 68: 2, 15.
- Kuechly, H., C. Kyba, T. Ruhtz, C. Lindemann, C. Wolter, J. Fischer & F. Hölker (2012). Aerial survey and spatial analysis of sources of light pollution in Berlin, Germany. *Remote Sensing of Environment* 2012: 126, 39–50.
- Liikennevirasto (2018). Avoimet aineistot. 15.8.2018. <[aineistot.liikennevirasto.fi](http://aineistot.liikennevirasto.fi)>
- Lougheed, T. (2014). Hidden blue hazard? LED Lighting and retinal damage in rats. *Environmental Health Perspectives* 122: 3, A 81.
- Lyytimäki, J. & J. Rinne (2013). *Valon varjopuolet*. 255 s. Gaudeamus, Helsinki.
- Maanteiden tievalaistuksesta osa sammutetaan keskiyöksi (2011). Liikennevirasto 16.12.2011 (viitattu 7.10.2018). <[www.liikennevirasto.fi](http://www.liikennevirasto.fi)>
- Navara, K. & R. Nelson (2007). The dark side of light at night: physiological, epidemiological, and ecological consequences. *Journal of Pineal Research* 43: 3, 215–224.
- Niemi, J. & M. Väre (2017; toim.). Suomen maa- ja elintarviketalous 2016/2017. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 17/2017. 88 s.
- NOAA = National Oceanic and Atmospheric Administration (2018). VIIRS DNB Cloud Free Composites. 15.8.2018. <[ngdc.noaa.gov](http://ngdc.noaa.gov)>
- Rees, W. G. (2013). *Physical principles of remote sensing*. 441 s. Cambridge University Press, Cambridge.
- Rich, C. & T. Longcore. (2006). *Ecological consequences of artificial night lighting*. 458 s. Island Press, Washington, D.C.
- Sánchez de Miguel, A., J. Zamorano, J. Castaño, & S. Pascual (2014). Evolution of the energy consumed by street lightning in Spain estimated with DMSP-OLS data. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer* 139, 109–117.
- Seto Lab (2018). Research data, Global intercalibrated nighttime lights. Seto Lab, Yale University. 15.8.2018. <[urban.yale.edu](http://urban.yale.edu)>
- Tiensuu, A (2010). *Uusi valaistuskirja*. 38 s. Viherympäristöliitto, Helsinki.
- Tilastotietokanta (2017). Taulukko: Vihannesviljely kasvihuoneessa muuttujina Vuosi, ELY-keskus, Muuttuja ja Laji. Luonnonvarakeskus. 4.12.2018. <[statdb.luke.fi](http://statdb.luke.fi)>
- Valosaaste – vakava ympäristöongelma? -hanke (2013). Suomen ympäristökeskus. 23.11.2017. <[www.syke.fi](http://www.syke.fi)>
- Väestörekisterikeskus (2016). Rakennusten osoitetiedot – avoin data. 15.8.2016. <[etsin.avointiede.fi](http://etsin.avointiede.fi)>
- Yhdyskuntarakenteen seurantajärjestelmä YKR (2015). Tietojen kuvaus. Suomen ympäristökeskus & Tilastokeskus.
- Zhang, Q., B. Pandey & K. Seto (2016). A Robust Method to Generate a Consistent Time Series From DMSP/OLS Nighttime Light Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 54: 10, 5821–5831.