



Vaasan yliopisto  
UNIVERSITY OF VAASA

Venla Laine

# **Ympäristotaloudellisen Kuznetsin käyrän testaus Suomessa**

Päästöttömän energiantuotannon ja kaupungistumisen vaikutus  
kasvihuonekaasupäästöihin maakuntatasolla

Laskentatoimen ja rahoituksen yksikkö  
Taloustieteen Pro gradu -tutkielma  
Taloustieteen maisteriohjelma

Vaasa 2025

---

**VAASAN YLIOPISTO****Laskentatoimen ja rahoituksen yksikkö**

<b>Tekijä:</b>	Venla Laine		
<b>Tutkielman nimi:</b>	Ympäristötaloudellisen Kuznetsin käyrän testaus Suomessa: Päästöttömän energiantuotannon ja kaupungistumisen vaikutus kasvihuonekaasupäästöihin maakuntatasolla		
<b>Tutkinto:</b>	Kauppätieteiden maisteri		
<b>Oppiaine:</b>	Taloustiede		
<b>Työn ohjaaja:</b>	Jaana Rahko		
<b>Valmistumisvuosi:</b>	2025	<b>Sivumäärä:</b>	<b>70</b>

---

**TIIVISTELMÄ:**

Ilmastomuutos on maailmanlaajuinen megatrendi, joka vaikuttaa yhteiskuntien hyvinvointiin kaikkialla maailmassa. Suomi on sitoutunut ilmastolain mukaisesti tavoittelemaan hiilineutraalisuutta vuoteen 2035 mennessä. Tavoitteen saavuttaminen vaikuttaa kuitenkin yhä epätodennäköisemmältä. Ilmastomuutos on globaali ongelma, mutta sitä on tärkeää tarkastella myös paikallisella tasolla, sillä paikallisilla toimilla on suora vaikutus Suomen ilmastotavoitteiden saavuttamiseen.

Tutkielman tarkoituksena on selvittää, miten taloudellinen kehitys on vaikuttanut kasvihuonekaasupäästöjen kehitykseen Suomessa sekä millainen suhde päästöttömän energian tuotannolla ja kaupungistumisella on päästöjen määrään. Tutkielman aineisto kattaa kaikki Suomen maakunnat aikavälillä 2005–2022 sisältäen tiedot aluekohtaisista päästöistä asukasta kohden, per henkilö BKT:stä, sähköenergiantuotannosta ja kaupunkiasumisen asteesta.

Teoriaviitekehys pohjautuu Solowin kasvumalliin ja Kuznetsin teoriaan, joista muodostuu ympäristötaloudellinen Kuznetsin käyrä (*EKC*). *EKC*-hypoteesi ilmentää ympäristön tilan ja talouskasvun välistä suhdetta, ja olettaa talouskasvun alkuvaiheessa ympäristöhaittojen lisääntyvän, mutta tietyn käännekohtan jälkeen päästöjen kääntyvän laskuun. Aiempi kirjallisuus on antanut ristiriitaisia tuloksia *EKC*-hypoteesille, sillä tulokset vaihtelevat tarkasteluajanjakson, selittävien muuttujien ja alueellisen kontekstin mukaan. Kirjallisuuskatsauksessa käsitellään keskeistä *EKC*-kirjallisuutta ja esitellään tärkeimmät tutkimustulokset erityisesti Suomen, uusiutuvan energian ja kaupungistumisen näkökulmasta.

*EKC*-käyrän kaltevuuteen ja käännekohtapisteen saavuttamiseen vaikuttavat yhteiskunnan ja talouden mittakaava-, koostumus- ja tekniikkavaikutus. Suomessa energiantuotanto ja kaupungistuminen ovat keskeisiä tekijöitä näille vaikutuksille, minkä vuoksi ne sisällytetään osaksi tutkielman regressioanalyysia. Mallinnuksessa käytetään Mean Group (*MG*)- ja kiinteiden vaikutusten (*FE*)-menetelmiä, joiden avulla estimoidaan talouskasvun, päästöttömän energiantuotannon ja kaupungistumisen vaikutuksia päästöihin Suomessa maakuntatasolla.

Tutkimuksen tuloksena *EKC*-hypoteesi validoidaan eli Suomessa esiintyy käänteisen U:n mallinen suhde päästöjen ja BKT:n välillä, kun tarkastellaan asukaskohtaista aineistoa. Lisäksi päästöttömän energian tuotanto ja kaupungistuminen vaikuttavat negatiivisesti päästöihin eli ne vähentävät päästöjen määrää Suomessa. Tuloksen perusteella Suomessa tulisi lisätä ydinvoiman ja uusiutuvien energialähteiden tuotantoa. Kaupungistumisen osalta tulisi kiinnittää huomiota erityisesti julkisen infrastruktuurin kestävään kehittämiseen.

---

**AVAINSANAT:** *EKC*-hypoteesi, kasvihuonekaasupäästöt, talouskasvu, päästötön energiantuotanto, kaupungistuminen, *MG*-estimointi

## Sisällys

1	Johdanto	5
2	Teoriaviitekehys	8
2.1	Kestävä talouskasvu ja EKC-hypoteesi	8
2.2	Energiantuotanto ja kasvihuonekaasupäästöt	17
2.3	Kaupungistuminen ja kasvihuonekaasupäästöt	21
3	Aiempi kirjallisuus	25
3.1	Keskeinen EKC-kirjallisuus	25
3.2	Suomi osana EKC-kirjallisuutta	28
3.3	Uusiutuva energiamuuttuja EKC-kirjallisuudessa	33
3.4	Kaupungistumismuuttuja EKC-kirjallisuudessa	36
4	Aineisto	40
4.1	Päästölaskenta	40
4.2	Selittävät muuttujat	42
5	Menetelmä	46
5.1	Mallin määrittely	46
5.2	Poikkileikkausriippuvuuden testaus	47
5.3	Estimointi	49
6	Tulosten analysointi	52
6.1	Aineiston testaus	52
6.2	MG-mallin estimointi	53
6.3	Kiinteiden vaikutusten (FE)-mallin estimointi	57
7	Johtopäätökset	59
	Lähteet	61

## Kuviot

<b>Kuvio 1.</b>	Ympäristotaloudellinen Kuznetsin käyrä.	14
<b>Kuvio 2.</b>	Mittakaava-, koostumus- ja tekniikkavaikutus EKC-käyrälle.	16
<b>Kuvio 3.</b>	Aiemmat EKC-hypoteesin tulokset Suomessa.	31
<b>Kuvio 4.</b>	Asukaskohtainen päästöpolku maakunnittain 2005–2022.	41
<b>Kuvio 5.</b>	Maakuntakohtainen BKT per capita.	43
<b>Kuvio 6.</b>	Keskimääräinen kaupunkiasumisaste vuosina 2005–2022.	45

## Taulukot

<b>Taulukko 1.</b>	Aiemmat EKC-hypoteesin tulokset Suomessa.	32
<b>Taulukko 2.</b>	Kaupungistumisen ja päästöjen väliset suhteet.	36
<b>Taulukko 3.</b>	Kaupungistumisen ja päästöjen välisen suhteen vaikuttavat tekijät.	38
<b>Taulukko 4.</b>	Muuttujien kuvaukset ja tietolähteet.	40
<b>Taulukko 5.</b>	CO <sub>2</sub> muuttujan ominaisuudet.	42
<b>Taulukko 6.</b>	Selittävien muuttujien ominaisuudet.	43
<b>Taulukko 7.</b>	Pesaranin poikkileikkausriippuvuustestin tulokset.	52
<b>Taulukko 8.</b>	MG-mallin estimoinnin tulokset.	53
<b>Taulukko 9.</b>	Kiinteiden vaikutusten regressiomallin tulokset.	58

## 1 Johdanto

IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) on kansainvälinen ilmastopaneeli, joka kokoaa yhteen tiedeyhteisöjen tuottaman tutkimustiedon ilmastonmuutoksesta. IPCC:n uusin *AR6 Synthesis* raportti (2023) osoittaa ilmastonmuutoksen olevan hälyttävä. Ihmisten toiminta on yksiselitteisesti aiheuttanut ilmastonmuutoksen: maailmanlaajuiset kasvihuonekaasupäästöt ovat jatkaneet kasvuaan kestäättömällä energian- ja maankäytöllä sekä kulutus- ja tuotantomalleilla (IPCC, 2023, s. 42). Ilmastonmuutos vaikuttaa jo nyt moniin sää- ja ilmastoäärimmäisyyksiin ympäri maailmaa, ja tulevaisuudessa se uhkaa hyvinvointia kaikkialla. Ihmisen aiheuttaman muutoksen haittavaikutukset voimistuvat jatkuvasti, ja jokaisen lämpenemisasteen lisäyksen myötä ääri-ilmiöt yleistyvät ja korostuvat (IPCC, 2023). Ilmastonmuutoksen ratkaiseminen on välttämätöntä ja nykyiset toimet eivät sellaisenaan ole olleet riittäviä.

Suomea on aikaisemmin pidetty lähtökohtaisesti ilmastonmuutoksen hillitsemisen ja sääntelyvaatimuksien edelläkävijämaana. Suomen hallitus on asettanut ilmastolain mukaisesti tavoitteeksi olla hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2022). Vaikuttaa kuitenkin yhä epätodennäköisemmältä, että Suomi voisi realistisesti saavuttaa omat tavoitteensa. Valtioneuvoston (2024) skenaarioselvityksen mukaan Suomi ei tule saavuttamaan hiilineutraalisuustavoitetta vuoteen 2035 mennessä nykyisellä ilmasto- ja energiapolitiikalla.

Ilmastonmuutos on globaali ongelma, mutta sitä on tärkeää tarkastella myös paikallisella tasolla, jossa päätöksenteko ja toimet ovat helpommin toteutettavissa. Ilmastovuosikertomuksessa painotetaan kuntien roolin olevan avainasemassa Suomen hiilineutraalisuus tavoitteen saavuttamisessa (Ympäristöministeriö, 2023, s. 77). Suomen Ympäristökeskus (2022, s. 37) on tutkinut maakuntien roolia ja vaikuttavuutta hiilineutraalisuustavoitteiden saavuttamisessa ja korostaa raportissaan maakuntatason toimijoiden tärkeimpänä tehtävänä alueellisten ilmastotekojen mahdollistamista ja koordinoimista. Alueellisilla toimilla voidaan vaikuttaa suoraan hiilidioksidipäästöihin ja siten kansallisten ilmastotavoitteiden saavuttamiseen. Suomen ilmastotavoitteiden

saavuttaminen vaatii yhteistyötä valtion, maakuntien ja kuntien tasolla (Suomen Ympäristökeskus, 2022, s. 37).

Ilmastonmuutoksen hillitseminen ja siihen sopeutuminen aiheuttavat merkittäviä kustannuksia yhteiskunnille, millä on suora vaikutus talouteen. Talouskasvu ja uusiutumattomien resurssien liikkakäyttö ovat puolestaan osa ilmastonmuutoksen taustasyistä. On kriittistä selvittää, voidaanko talouskasvun avulla myös korjata aiheutettuja ympäristöhaittoja (Leal & Marques, 2022, s. 14). Tämän tutkielman tavoitteena on selvittää, miten taloudellinen kehitys on vaikuttanut kasvihuonekaasupäästöjen kehitykseen Suomen maakunnissa vuosina 2005–2022.

Lisäksi tutkimus selvittää, miten päästöttömän energiantuotanto ja kaupungistuminen vaikuttavat maakuntien päästömääriin Suomessa. Talouskasvu on perinteisesti ollut vahvasti sidoksissa energian kulutukseen ja energia on yksi tärkeimmistä talouskehityksen ajureista (Siddik ja muut, 2021). Fossiilisten polttoaineiden käyttö vaikuttaa suoraan kasvihuonekaasupäästöihin ja on yksi merkittävimmistä ilmansaasteiden aiheuttajista (Siddik ja muut, 2021, s. 103). Ydinvoiman ja uusiutuvien energialähteiden käyttö ja tarjonnan riittävyys kasvavaan energiankysyntään nähden ovat kiistanalaisia kysymyksiä ja energiapolitiikan ytimessä. Energiasiirtymällä voidaan suoraan vaikuttaa Suomessa tuotettuihin päästömääriin.

Kaupungistumisen ja päästöjen välinen suhde on puolestaan monimutkainen ja riippuvainen useista tekijöistä ja olosuhteista. Tämä korostaa tarvetta tutkia, miten kaupungistuminen vaikuttaa päästöihin erityisesti Suomen kontekstissa. Valtioneuvoston (2024) skenaariolaskelmien mukaan suurinta epävarmuutta Suomen hiilineutraalisuustavoitteen saavuttamisessa aiheuttaa maankäyttösektorin hiilinielukehityksen epävarmuus. Kaupungistumisen myötä tapahtuvat rakennemuutokset sekä energiankulutuksen kehitys vaikuttavat suoraan Suomen päästöjen taakanjakosektoreihin, ja siten ne ovat keskeisessä roolissa ilmastotavoitteiden saavuttamisessa.

Tutkielman teoriaviitekehys pohjautuu Kuznetsin (1955) esittämään hypoteesiin, jossa oletetaan talouden aluksi kasvaessa tuloerojen lisääntyvän, mutta myöhemmin yhteiskunnan kehittyessä taas tuloerojen uskotaan laskevan. Ympäristotaloudellinen Kuznetsin käyrähypoteesi (*Environmental Kuznets curve, EKC*) kuvastaa päästöjen ja talouden välistä suhdetta käänteisessä U:n muotoisessa mallissa, jossa päästöt aluksi lisääntyvät, mutta myöhemmässä vaiheessa siirtyvät laskuun talouden yhä kasvaessa. Suurin osa aiemmasta empiirisestä tutkimuksesta ympäristön ja talouden välisestä suhteesta on keskittynyt hyödyntämään EKC-teoriaa talouden ympäristölle aiheuttamien haittavaikutusten tarkastelussa (Esposito, 2023, s. 558). EKC-hypoteesi on laajasti käytetty, mutta tulokset ovat muuttujista, alueesta ja aikavälistä riippuen vaihtelevia, mistä johtuen tutkimusta on edelleen mielekästä jatkaa. Aiemmat tutkimukset pohjautuvat pitkälti maaryhmien tarkasteluun, ja Suomesta erityisesti aluetasolla on ainoastaan vähän tutkimustietoa saatavilla.

Tutkielma jakautuu seitsemään osaan, joiden avulla pyritään selittämään tutkimuskysymyksiä teoreettinen tausta ja analysoimaan tutkielman tulokset. Tutkimuksen teoriaviitekehys kattaa kestävän talouskasvun ja EKC-hypoteesin, energian tuotannon ja kasvihuonekaasupäästöt sekä kaupungistumisen vaikutukset päästöihin. Kirjallisuuskatsaus pohjautuu EKC-kirjallisuuden tarkasteluun eri näkökulmista. Neljäs kappale esittelee tutkielman aineiston ja viides kappale menetelmän. Lopuksi analysoidaan empiirisen osion tulokset ja esitellään tutkielman johtopäätökset.

## 2 Teoriaviitekehys

Ympäristötaloustiede on noussut 2000-luvulla yhdeksi taloustieteen keskeisimmistä tutkimussuunnista, kun ympäristöongelmat ja ilmastonmuutos ovat vahvistuneet yhdeksi aikamme merkittävimmäksi megatrendiksi. Nykyinen talouskasvun ja kulutuksen malli ei ole pitkällä aikavälillä kestävä, mikä ilmenee muun muassa ilmaston liiallisena lämpenemisenä. Siksi talouskasvun ja kehityksen tarkastelu ympäristön näkökulmasta on tärkeämpää kuin koskaan aikaisemmin.

Talouskasvun taustalla vaikuttaa makrotaloudellinen Solowin (1956) kasvumalli. Talouden kasvumalli voidaan laajentaa mallintamaan myös päästöt ja huomioimaan rajalliset resurssit osana talouskasvua, jolloin puhutaan laajennetusta vihreästä Solowin kasvumallista. Vihreä Solowin kasvumalli antaa pohjan EKC-hypoteesille, jonka avulla tarkastellaan talouskasvun ja päästöjen välistä suhdetta.

EKC-hypoteesin toteutumiseen ja käyrän kaltevuuteen vaikuttavat talouden mittakaavavaikutukset sekä niin kutsutut koostumus- ja tekniikkavaikutukset. Energiantuotannon muutokset ja kaupungistuminen muokkaavat suoraan talouden ja yhteiskunnan rakennetta, sen koostumusta ja teknologista kehitystä. Teoriaosiossa tarkastellaan päästöjen ja talouskasvun, päästöjen ja energiankulutuksen sekä päästöjen ja kaupungistumisen välisiä yhteyksiä.

### 2.1 Kestävä talouskasvu ja EKC-hypoteesi

Ympäristön ja talouden välistä suhdetta on tulkittu vuosien saatossa tiedon lisääntyessä monesta eri näkökulmasta. Meadowsin ja muiden (1972) tutkielma Kasvun rajat on ympäristötaloustieteen klassikkoteos. Meadows ja muut (1972) analysoivat ihmiskunnan kasvun pitkän aikavälin seurauksia planeetan rajallisilla resursseilla. Tulokset olivat selvät: ihmiskunnan väestön sekä kulutuksen kasvu on eksponentiaalista, kun puolestaan käytössämme olevat maapallon resurssit ovat rajallisia ja mahdollisesti

ehtyvät nopeasti kulutuksen kasvun myötä. Kulutuksen jatkuva kasvu johtaa ympäristön kantokyvyn ylittymiseen, joka johtaa pitkällä aikavälillä resurssikriisiin (Meadows ja muut, 1972). Ympäristötaloustieteen alkuvaiheessa resurssinäkökulma ja ihmiskunnan kasvu ovat olleet keskiössä, ja teoria on keskittynyt selittämään, miten taloudellinen toiminta vaikuttaa ympäristön kantokykyyn ja luonnonvarojen kestävyys. Myöhemmin painopiste on kuitenkin siirtynyt resurssien tarkastelusta ympäristön ja talouden suhteen laajempaan tarkastelunäkökulmaan.

Taloustieteessä ympäristön ja talouskasvun välinen suhde voidaan jakaa karkeasti kahteen vastakkaiseen näkemykseen: talouskasvun katsotaan joko väistämättä heikentävän ympäristöä tai olevan edellytys ympäristönsuojelulle (Haukioja & Kaivo-oja, 1998). Talouden ja ympäristön välinen negatiivinen suhde korostuu taantumien aikana. Ajankohtainen tutkimusesimerkki on koronapandemia, jonka aikana talous koki yllättävän, syvän ja äkillisen taantumien. Taantumien aikana CO<sub>2</sub>-päästöjen laskun arvioitiin olevan mahdollisesti nopeinta sitten toisen maailmansodan päättymisen (Nguyen ja muut, 2021). Energiankysynnän lasku, teollisuuden hidastuminen sekä kaupunki- ja lentoliikenteen supistuminen vähensivät maailmanlaajuisia päästöjä merkittävästi, samoin kuin liike- ja asuinrakennusten energiankulutuksen väheneminen (Nguyen ja muut, 2021, s. 2–3). Äkillisellä ja voimakkaalla taloudellisella taantumalla oli selvästi myönteinen vaikutus ympäristön tilaan sekä paikallisella että globaalilla tasolla. Tämä ilmiö korosti taloudellisen taantumien ja kulutuksen vähenemisen johtavan päästöjen laskuun ainakin lyhyellä aikavälillä.

Beckerman (1992) esittää näkökulman, joka haastaa oletuksen talouden ja ympäristön välisestä negatiivisesta yhteydestä. Beckermanin (1992) mukaan on selkeää näyttöä siitä, että vaikka talouskasvu usein heikentää ympäristön tilaa alkuvaiheessa, paras ja todennäköisesti ainoa tapa saavuttaa kestävä ympäristönsuojelu useimmissa maissa on vaurastuminen. Maiden tulee olla rikkaita yhteiskuntia, jotta ne pystyvät investoimaan tehokkaasti ympäristöystävällisiin teknologioihin sekä asettamaan tarvittavia politiikkoja, joilla parannetaan ympäristön tilaa. Beckermanin (1992) mukaan talouskasvu ei ole

välttämättä ristiriidassa ympäristönsuojelun kanssa, vaan voi pitkällä aikavälillä edistää sitä.

Taloukasvua voidaan tarkastella Solowin kasvumallin avulla. Solowin (1956) kasvumalli selittää taloudellisen kasvun pitkän aikavälin kehitystä pääoman, työvoiman ja säästöjen avulla. Mallin keskeinen ajatus on, että pääoman kertymä (investoinnit) ja työvoiman kasvu vaikuttavat suoraan bruttokansantuotteen (BKT) ja kulutuksen tasoihin pitkällä aikavälillä (Sørensen & Whitta-Jacobsen, 2022). Kaavoissa mallinnettuna Solowin mallin perusmuotoinen yhtälö, jossa on esitettyä tuotantofunktio Cobb-Douglas muodossa (1), pääomantuottoaste (2), palkkataso (3), säästäminen (4), pääoman kertymä (5) ja työvoiman kasvu (6) (Sørensen & Whitta-Jacobsen, 2022, s. 62):

$$Y_t = BK_t^\alpha L_t^{1-\alpha}, \quad (1)$$

$$r_t = \alpha B \left( \frac{K_t}{L_t} \right)^{\alpha-1}, \quad (2)$$

$$w_t = (1 - \alpha) B \left( \frac{K_t}{L_t} \right)^\alpha, \quad (3)$$

$$S_t = sY_t, \quad (4)$$

$$K_{t+1} - K_t = S_t - \delta K_t, K_0 \text{ annettuna} \quad (5)$$

$$L_{t+1} = (1 + n)L_t, L_0 \text{ annettuna}, \quad (6)$$

missä kertoimia  $\alpha$ ,  $B$ ,  $s$ ,  $n$  ja  $\delta$ . Endogeenisiä muuttujia  $Y_t, K_t, L_t, r_t, w_t$  ja  $S_t$ .

Yhtälöissä  $Y_t$  on kokonaistuotanto,  $K_t$  pääomakanta ja  $L_t$  työvoima ajanhetkellä  $t$ .  $B$  edustaa kokonaistuottavuutta ja  $\alpha$  pääoman osuutta tuotannosta. Tilamuuttujien pääoman  $K_0$  ja työvoiman  $L_0$  alkuarvot ovat osa mallia vakioina sellaisena kuin ne on esitetty (Solow, 1956). Endogeeniset muuttujat puolestaan eivät ole ennalta annettuja vaan niiden arvo määräytyy mallinnuksen muiden muuttujien perusteella. Solowin (1956) mallin mukaan toimet, joita voidaan tehdä taloukasvun edistämiseksi ja pysyvän korkeamman tulotason saavuttamiseksi ovat säästämisasteen kasvattaminen, työvoiman kasvuvauhdin vähentäminen, pääoman kulutusasteen vähentäminen eli tehokkaampi investointi ja teknologisen tason kehitys.

Solowin malli on keskeinen makrotalouden mallinnus talouskasvulle. Malli ei kuitenkaan huomioi rajallisia resursseja vaan olettaa ympäristöresurssien olevan loppumattomia (Hassler & Krusell, 2018). Brockin ja Taylorin (2010) mallintama vihreä Solowin kasvumalli (*Green Solow model*) yhdistää ja laajentaa perinteisen Solowin kasvumallin ympäristötaloustieteeseen. Vihreä kasvumalli huomioi rajalliset resurssit sekä päästöt osana yksinkertaistettua talouskasvumallinnusta. Vihreässä Solowin kasvumallissa esitetään säästämisen- ja päästövähennysvalinnat eksogeenisesti määrättyinä eli annettuina arvoina mallin ulkopuolelta (Brock & Taylor, 2010, s. 133–134). Tämä oletus korostaa mallissa vähenevän rajatuoton ja teknologisen kehityksen roolia osana ympäristön laadun ja talouskasvun välistä suhdetta. Brockin ja Taylorin (2010, s. 134) vihreän Solowin kasvumallissa esitettyä tuotantofunktio (7), pääoman kertymä (8) sekä työvoiman ja teknologian kasvu (9) ennen ympäristönlaadun sisällyttämistä osaksi mallia:

$$Y = F(K, BL), \quad (7)$$

$$K = sY - \delta K, \quad (8)$$

$$L = nL, \quad B = gB. \quad (9)$$

Funktioissa  $B$  edustaa työvoimatehokkuuden kasvua ja  $n$  väestönkasvua. Mallin olettaessa säästämistason  $s$  olevan kiinteä eksogeeninen muuttuja tuotanto syntyy vakioisen skaalatuoton ja koveran tuotantofunktion kautta, jossa tuotantoon käytetään tehokasta työvoimaa ja pääomaa (Brock & Taylor, 2010). Koverassa tuotantofunktiossa tuotannon lisäyksen hyöty hidastuu, kun pääoman määrä kasvaa, mikä ilmenee laskevana rajatuottona. Pääoma kertyy säästöjen kautta ja kuluu nopeudella  $\delta$  (Brock & Taylor, 2010, s. 134) Työvoimatehokkuuden kasvunopeus on merkitty  $gB$ -muuttujalla.

Päästöjen vaikutuksen mallintamiseksi oletetaan jokaisen taloudellisen toiminnan yksikön  $F$  tuottavan  $\Omega$  yksikköä päästöjä tuotannon ulkoishaittavaikutuksena (Brock & Taylor, 2010, s. 134). Ilmakehään asti päätyvän saasteen määrä voi kuitenkin poiketa tuotetusta määrästä, jos osa päästöistä vähennetään (*abatement*). Mallinnuksen

oletuksena on, että päästövähennystoimet noudattavat vakioskaalatuottoja eli vaikutus kasvaa suorasti samassa suhteessa kuin talous ja vähennyksen eteen tehdyt toimet ( $F_A$ ) (Brock & Taylor, 2010). Päästövähennys määritellään matemaattisesti kasvavana ja koverana funktiona kokonaislaajuuden ( $F$ ) ja päästövähennysten eteen tehtyjen panosten ( $F_A$ ) kautta (Brock & Taylor, 2010, s. 134). Jos päästövähennystaso  $A$  poistaa  $\Omega A$  yksikköä päästöjä tuotetusta määrästä, ilmakehään päätyvä saaste voidaan määritellä kaavoilla:

$$\text{päästöt} = \text{tuotetut päästöt} - \text{vähennetyt päästöt}, \quad (10)$$

$$E = \Omega A(F, F^A), \quad (11)$$

$$E = \Omega F \left[ 1 - A\left(1, \frac{F^A}{F}\right) \right], \quad (12)$$

$$E = \Omega F \alpha(\theta), \quad (13)$$

$$\text{missä, } \alpha(\theta) \equiv \left[ 1 - A\left(1, \frac{F^A}{F}\right) \right] \text{ ja } \theta = \frac{F^A}{F}.$$

Yhtälö 12 seuraa siitä, että  $A$  on lineaarisesti homogeeninen ja yhtälö 13 määritelmästä, jossa  $\theta$  edustaa taloudellisen toiminnan osuutta, joka on omistettu päästövähennyksille. Brock ja Taylor (2010, s. 135) olettavat intensiivisen päästöfunktion täyttävän ehdon  $\alpha(0) = 1$ ,  $\alpha'(\theta) < 0$  ja  $\alpha''(\theta) > 0$ . Oletus on lähtöisin tuotantofunktion koverasta muodosta ja rajakustannuksista (Brock & Taylor, 2010). Päästövähennyksen rajahyöty on positiivinen, mutta laskeva. Oletukset päästöistä ja päästövähennyksistä yhdistetään Solowin kasvumalliin. Päästövähennyksien huomioiminen mallinnuksessa kuitenkin muuttaa kulutuksen tai investointien käytettävissä olevaa tuotosta tuotannosta  $Y$ , jolloin yhtälö esitetään muodossa (Brock & Taylor, 2010, s. 135):

$$Y = (1 - \theta)F. \quad (14)$$

Jotta vihreän kasvumallin mukainen eksogeeninen teknologinen kehitys kasvattaisi tehokasta työvoimaa nopeudella  $gB$ , oletetaan myös päästövähennysteknologian kehittyvän eksogeenisesti vähentäen päästöintensiteettiä  $\Omega$  nopeudella  $gA > 0$ .

Laajennettu vihreä Solowin kasvumalli esitettyinä tuotannon (15), pääoman (16) ja päästöjen (17) intensiivisessä yksikkömuodossa:

$$y = f(k)[1 - \theta], \quad (15)$$

$$k = sf(k)[1 - \theta] - [\delta + n + gB]k \quad (16)$$

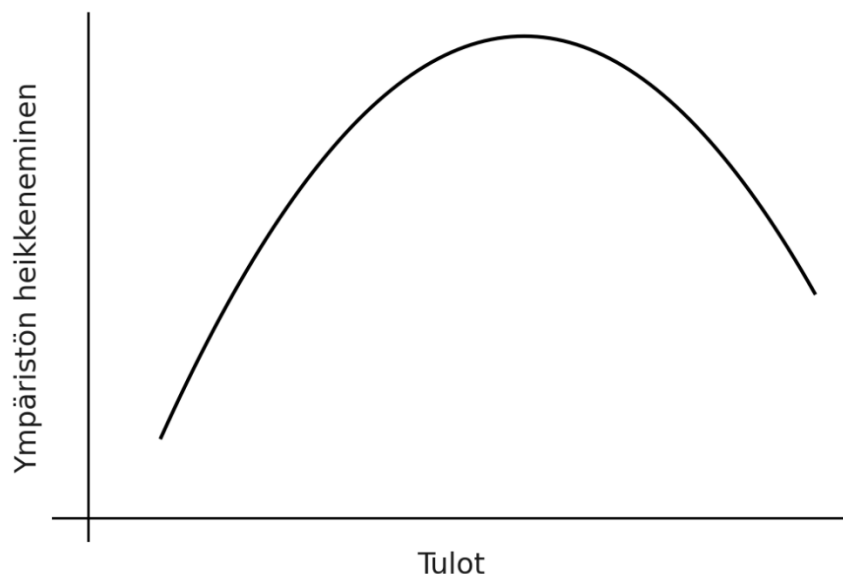
$$e = f(k)\Omega\alpha(\theta) \quad (17)$$

$$\text{missä, } k = \frac{K}{BL}, y = \frac{Y}{BL}, e = \frac{E}{BL} \text{ ja } f(k) = F(k, 1).$$

Malli pyrkii selittämään taloudellisen kasvun ja ympäristön laadun välisen yhteyden ottaen huomioon päästöt ja päästövähennyksiin käytetyt panokset. Teknologisen kehityksen ja työvoiman tehokkuuden rooli nähdään keskeisenä mahdollistavana tekijänä kasvuille. Jotta päästöt vähenisivät ja ympäristön tila paranisi, päästövähennysteknologian kehityksen on oltava nopeampaa kuin talouden kokonaiskasvu (Brock & Taylor, 2010, s. 136). Ympäristön tilan parantuminen riippuu siitä, kuinka nopeasti uudet ja tehokkaammat teknologiat pystyvät vähentämään ulkoishaittavaikutuksena syntyviä päästöjä verrattuna talouden kasvuvauhtiin. Vihreä Solowin kasvumalli antaa matemaattisen pohjan EKC-hypoteesille.

EKC-hypoteesi on nimetty ja johdettu Kuznetsin (1955) havainnollistaman hypoteesin pohjalta. Kuznets (1955) tarkasteli tutkimuksessaan pitkän aikavälin muutoksia tuloeroissa talouskasvun edetessä. Hypoteesin mukaan taloudellisen kasvun alkuvaiheessa tuloerot kasvavat, mutta yhteiskunnan kehittyessä eriarvoisuus vähenee. Tämä luo käännekohdan, jonka jälkeen talouskasvu ja eriarvoisuus eivät enää seuraa samaa kehityspolkua (Kuznets, 1955). Vastaavanlainen käänteisen U:n mallinen käyrä voidaan soveltaa myös ympäristön tilan heikkenemisen ja talouskasvun väliseen suhteeseen. Ympäristön heikkeneminen lisääntyy aluksi talouskasvun mukana, mutta

tietyn tulotason jälkeen ympäristön tila alkaa parantua. Näin talouden ja ympäristön heikkenemisen välille muodostuu käänteisen U:n muotoinen käyrä (ks. kuvio 1). EKC-hypoteesin tarkoituksena on ilmentää pitkän aikavälin suhdetta ympäristövaikutusten ja talouskasvun välillä (Dinda, 2004, s. 434).



**Kuvio 1.** Ympäristötaloudellinen Kuznetsin käyrä (mukaillen Dinda, 2004, s. 434).

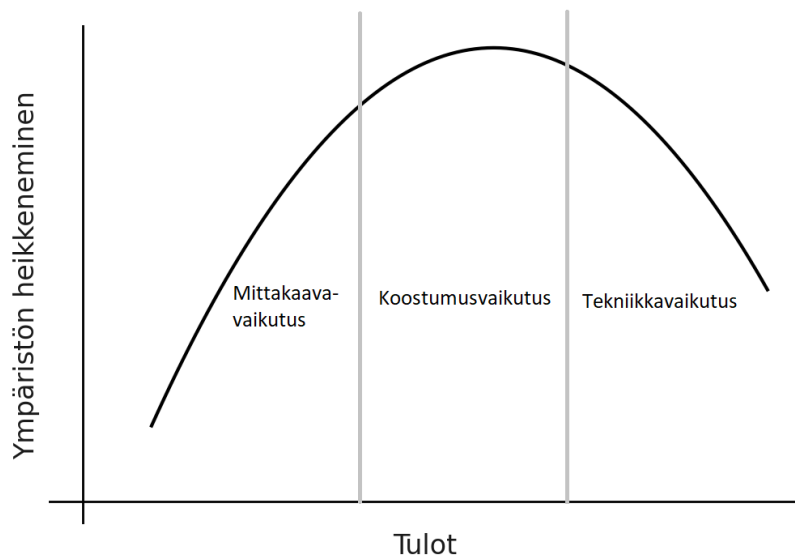
EKC-käyrää voidaan tarkastella rajakustannusten (*MC*) ja rajahyödyn (*MB*) vuorovaikutusten avulla (Dinda, 2004, s. 440). Rajahyöty kuvaa talouskasvun tuottamaa hyvinvoinnin lisäystä, kun taas rajakustannus kuvaa ympäristön heikkenemisestä aiheutuvia haittoja. Vaikuttavia päätekijöitä EKC-käyrän kaltevuuteen on tunnistettu olevan ainakin kolme: mittakaavavaikutus, koostumusvaikutus ja tekniikkavaikutus (Sarkodie & Strezov, 2019).

Mittakaavavaikutuksella tarkoitetaan taloudellisen kehityksen seurauksena syntyvää ympäristötilan heikentymistä, joka ilmenee talouskasvun kielteisenä vaikutuksena ympäristölle (Leal & Marques, 2022, s. 4). Kasvava tuotantomäärä edellyttää luonnonvarojen ja tuotoksien laajempaa hyödyntämistä kysynnän tyydyttämiseksi, millä on negatiivinen vaikutus ympäristölle (Sarkodie & Strezov, 2019).

Mittakaavavaikutuksessa näkyy myös energian kulutuksen kasvu tuotannon kasvaessa, mikä on ympäristölle suoraan negatiivinen ulkoishaittavaikutus, jos energiantuotanto pohjautuu fossiilisiin polttoaineisiin.

Koostumusvaikutukselle on ominaista talouden rakennemuutokset, joilla voi mahdollisesti olla joko kielteisiä tai positiivisia vaikutuksia ympäristölle (Leal & Marques, 2022, s. 4). Talouden rakenteen keskittyessä maatalousvaltaiseen sekä hiili- ja energiaintensiivisiin teollisuudenaloihin on ympäristön tilan heikkeneminen todennäköistä (Sarkodie & Strezov, 2019). Päästö- ja energiaintensiivisten alojen osuuden laskiessa kokonaistuotannosta ympäristön heikkeneminen alkaa vähentyä. Rakennemuutos näkyy muun muassa palveluvaltaisten sektoreiden osuuden kasvaessa taloudessa, millä on lähtökohtaisesti positiivinen vaikutus ympäristölle (Sarkodie & Strezon, 2019, s. 131). Palvelu- ja teknologiaintensiiviset sektorit ovat yleisesti vähemmän päästöintensiivisiä kuin teollisuus- ja maataloussektorit, mikä johtuu pääsääntöisesti pienemmästä materiaalisesta tuotannosta, alhaisemmasta energiankulutuksesta ja korkeammasta työvoimaintensiteetistä. Rakennemuutoksessa talouskasvu siirtyy sektoreilta toiselle, jolloin vähemmän saastuttavien elinkeinorakenteiden osuus kasvaa ja talouskasvu johtaa ympäristön laadun säilyttämiseen tai mahdollisesti parantumiseen (Bilgili ja muut, 2016).

EKC-käyrä voidaan jakaa kahteen osaan, joista ensimmäinen on aikainen vaihe, jossa tulotaso ja päästöt kasvavat, ja mittakaavavaikutuksen rooli on merkittävä tekijä määrittämään suoran kaltevuutta. Käännekohtapisteen jälkeen on käyrän myöhempi vaihe, jolloin päästöt siirtyvät laskevalle suoralle. Kun EKC-käyrällä siirrytään laskevalle suoralle tulojen yhä kasvaessa, oletetaan, että ympäristön laadun paraneminen alkaa (Dinda, 2004, s. 434). Mahdollisuus siirtyä EKC-käyrän laskevalle suoralle vaatii kestävästä talouskasvusta ja kehitystä, minkä koostumusvaikutus yhdessä tekniikkavaikutuksen kanssa mahdollistavat. Kuviossa 2 on esitelty mittakaava-, koostumus- ja tekniikkavaikutusten merkitys EKC-käyrän muodostumisen eri vaiheissa.



**Kuvio 2.** Mittakaava-, koostumus- ja tekniikkavaikutus EKC-käyrälle (mukaillen Bilgili ja muut, 2016, s. 839).

Tekniikkavaikutus on ympäristölle positiivinen, sillä se mahdollistaa resurssien tehokkaamman käytön, vähäpäästöisemmät tuotantomenetelmät ja puhtaamman energian hyödyntämisen (Sarkodie & Strezov, 2019). Sen ansiosta voidaan tuottaa sama tai jopa suurempi määrä tuotoksia ympäristöystävällisemmin uusien kehittyneiden teknologioiden avulla. Taloustieteessä teknologinen kehitys nähdään usein talouskasvun keskeisenä ajurina, ja innovaatiot voivat edistää sekä tuottavuutta että kestävyttä. Mitä suurempaa valtion varallisuus ja talouskasvu ovat, sitä enemmän resursseja on käytettävissä teknologiseen kehitykseen ja vihreisiin investointeihin, mikä puolestaan voi edistää talouskasvun ja ympäristöhaittojen eriytymistä toisistaan (Bilgili ja muut, 2016).

Osa taloustieteilijöistä uskoo myös tulojouston ympäristön laadun kysynnälle vaikuttavan EKC-käyrän käännekohtapisteeseen (Sarkodie & Strezov, 2019). Puhtaan ympäristön laadukysynnän tulojoustolla tarkoitetaan sitä, että talouden kehittyessä yhteiskunnan painopiste siirtyy intuitiivisesti kulutuksen määrän sijasta sen laatuun (Leal & Marques, 2022, s. 4). Ympäristön laadun kysyntä eli arvostus muuttuu suhteessa tulojen muutokseen (Sarkodie & Strezov, 2019, s. 131). Ympäristötietoisuuden kasvaessa ihmiset ovat valmiita panostamaan enemmän ympäristöystävällisiin vaihtoehtoihin, ja

resurssit ohjautuvat aktiivisemmin kestäväen kehityksen tavoitteisiin. Kysyntä puhtaasta ympäristöstä kasvaa tulotason noustessa ja yhteiskunnat painostavat enemmän päättäjiä suojelemaan ympäristöä (Bilgili ja muut, 2016). Tällöin tulojoustolla on positiivinen vaikutus ympäristölle ja EKC-käyrän käännekohta saavutetaan nopeammin.

United Nations General Assembly 1987 on määritellyt kestäväen kehityksen määritelmän seuraavasti: "Kestävä kehitys on kehitystä, joka tyydyttää nykyhetken tarpeet viemättä tulevilta sukupolvilta mahdollisuutta tyydyttää omat tarpeensa" (suomennos Ympäristöministeriö, 2023). Myös Meadows ja muut (1972) esittävät luonnonvarojen resurssiongelman ratkaisemiseksi kestävää kasvua, jossa talouden ja väestön kasvua hillitään hallitusti luonnonvarojen säilyttämiseksi. Ilman kestäviä ympäristöystävällisiä ratkaisuja talouden rakenteessa ja teknologisessa kehityksessä talouskasvu johtaa ympäristön saastumiseen väestön ja tuotantomäärien kasvaessa.

Tutkielman ensimmäiseksi hypoteesiksi asetetaan EKC-hypoteesi, sillä Suomen oletetaan jo tehneen merkittäviä toimia ympäristöystävällisemmän talouskasvun saavuttamiseksi muun muassa sääntelyn, tukien, innovaatioiden ja rakennemuutoksien avulla.

*H1:* Päästöjen ja talouskasvun välillä on käänteisen U:n mallinen yhteys (EKC-hypoteesi).

Tutkielmassa uusiutuvan energian ja kaupungistumisen mukaan ottaminen EKC-malliin voidaan tulkita olevan tapa mallintaa suoraan koostumus- ja tekniikkavaikutuksia näiden tekijöiden osalta. Seuraavassa kappaleessa tarkastellaan energian suhdetta päästöihin.

## **2.2 Energiantuotanto ja kasvihuonekaasupäästöt**

Fossiiliset polttoaineet, jotka viittaavat perinteiseen tai uusiutumattomaan energiaan, ovat orgaanisen hiilen muotoja, jotka ovat muodostuneet maan pinnan alla maankuoren voimakkaan lämmön ja paineen vaikutuksesta (Siddik ja muut, 2021, s. 105). Eniten

käytettyjä fossiilisia polttoaineita ovat hiili, öljy ja maakaasu. Globaalisti fossiilisten polttoaineiden kulutus on lisääntynyt 64 prosenttia ja tuotanto yli 67 prosenttia aikavälillä 1990–2019 (Siddik ja muut, 2021, s. 117). Energian tuotannolla ja kulutuksella on merkittävä vaikutus kasvihuonekaasupäästöihin, sillä niiden käyttö lisää kasvihuonekaasupäästöjen määrää ilmakehässä (Siddik ja muut, 2021). Globaaleista kasvihuonekaasupäästöistä lähes 34 prosenttia syntyy energiasektorin toiminnasta (IPCC, 2023, s. 44).

Energialla on merkittävä rooli talouskasvussa, ja erityisesti teollistumisen aikana se on ollut keskeinen talouskasvun mahdollistaja (Stern, 2011, s. 30). Ekinsin ja muiden (2022, s. 1) mukaan tulojen kasvu lisää energian kysyntää, mikä korostaa energian ja talouskasvun välistä yhteyttä. Talouskasvu kasvattaa energian kysyntää, ja toisaalta energian saatavuus edistää talouskasvua, mikä muodostaa kaksisuuntaisen kausaliteettisuhteen energian ja talouskasvun välille. Sen sijaan energian ja päästöjen välillä on yksisuuntainen kausaliteettisuhte, sillä energialla on vaikutusta päästöihin muttei päästöillä suoraa vaikutusta energiaan. Talouskasvun avulla voidaan kuitenkin edistää uusiutuvien energiamuotojen käyttöä ja kehitystä (Leal & Marques, 2022, s. 13), mikä voi muuttaa vaikutusten luonteen negatiivisesta positiiviseksi.

Uusiutuva energia määritellään energialähteeksi, joka on ehtymätön eikä kulu loppuun jatkuvasta käytöstä huolimatta (Holloway, 2021, s. 249). Uusiutuvia energiamuotoja ovat aurinkoenergia, tuuli- ja vesivoima, biomassa sekä geoterminen energia (Amposah ja muut, 2014, s. 462; Holloway, 2021, s. 249). Uusiutuvia energiamuotoja on käytetty yhteiskunnissa jo ennen teollista vallankumousta ja usein kehityksen alkuvaiheessa uusiutuvan energian käyttö on jopa yleisempää kuin pitkälle kehittyneissä valtioissa (Tahvonen & Salo, 2001, s. 1381). Uusiutuvan energian tuotannosta ei synny lainkaan suoria kasvihuonekaasupäästöjä, mutta tuotantolaitosten rakentamisesta ja kuljetuksesta voi syntyä päästöjä (Amposah ja muut, 2014, s. 462). Epäsuorien päästöjen määrä on kuitenkin hyvin pieni verrattuna fossiilisten polttoaineiden päästöihin (Amposah ja muut, 2014, s. 462).

Uusiutuvien energiamuotojenkin välillä on merkittäviä eroja tehokkuuden ja ympäristövaikutusten suhteen. Esimerkiksi vesivoima on sähkön tuotannon kannalta tehokkain uusiutuva energianlähde (Amposah ja muut, 2014). Sen sijaan merituulivoiman elinkaaren aikaiset päästöt ovat alhaisimpia kaikista uusiutuvista energiamuodoista (Amposah ja muut, 2014). Amposah ja muut (2014, s. 466) korostavat aurinkosähkön (*photovoltaic, PV*) suurta potentiaalia vastata energiantarpeeseen maailman väestön lisääntyessä, sillä sen saatavuus on käytännössä rajatonta, kunhan sitä opitaan hyödyntämään.

Lähes 80 prosenttia maailman energiantuotannosta perustuu edelleen fossiilisiin polttoaineisiin (Siddik ja muut, 2021, s. 105), vaikka fossiilisten polttoaineiden haittavaikutukset ja uusiutuvan energian hyödyt ovat hyvin tiedostettuja. Kuitenkin uusiutuvan energian kapasiteetti on kasvanut ennätysvauhtia viimeisten kahden vuoden aikana (International Energy Agency, 2024, s. 7), mikä viittaa mahdolliseen siirtymään kohti uusiutuvien energialähteiden laajempaa hyödyntämistä lähitulevaisuudessa. Kralovan ja Sjöblomin (2010, s. 409–410) arvion mukaan vuoteen 2040 mennessä jopa puolet energiasektorista voisi pohjautua uusiutuvasta energiasta.

Ehtyvien luonnonvarojen hyödyntämisen optimaalista tasoa ja hintakehitystä voidaan tarkastella Hotelling säännön avulla (Cotrina-Teatino & Marquina-Araujo, 2024, s. 1). Harold Hotelling (1931) säännön mukaan uusiutumattoman luonnonvaran hinnan tulee markkinatasapainossa kasvaa korkokannan mukaisesti, jotta resurssin arvo maksimoi tuoton pitkällä aikavälillä. Kilpailullisilla markkinoilla optimaalinen ehtymisnopeus saavutetaan, kun resurssin hinnassa otetaan huomioon inflaation lisäksi myös marginaaliset louhintakustannukset, jotka syntyvät, kun yksi yksikkö uusiutumattomasta luonnonvarasta on käytetty (Cotrina-Teatino & Marquina-Araujo, 2024, s. 1–2). Näin ollen ehtyvän luonnonvaran hinnan tulisi nousta sen vähentyessä, mikä kannustaa siirtymään uusiutuvien luonnonvarojen käyttöön. Fossiilisten polttoaineiden louhinta käy pitkällä aikavälillä yhä haastavammaksi, kalliimmaksi ja energiaa vaativammaksi,

mikä heikentää saatavan energian määrää suhteessa louhintaan käytettyihin resursseihin (Brook ja muut, 2014).

Uusiutuvien energialähteiden lisäksi on CO<sub>2</sub>-päästöttömiä sekä vähähiilisiä vaihtoehtoja, kuten ydinvoima, jotka voivat osaltaan vähentää fossiilisten polttoaineiden kysyntää tarjoamalla vaihtoehtoisia kulutus- ja tuotantovaihtoehtoja (Muellner ja muut, 2021). Erityisesti sähköntuotanto ydinvoimalla on hyvin kiistelty aihe. Osa tieteellisistä artikkeleista jopa kiistää ydinvoiman päästöttömyyden, kun toiset nostavat sen esille ratkaisuksi Pariisin ilmastopimuksen mukaisten tavoitteiden saavuttamisessa (Muellner ja muut, 2021, s. 1–2). Ydinvoima tuotetaan hallitulla ketjureaktiolla, jossa neutronit halkaisevat fissioituvien aineiden, kuten uraanin ytimiä vapauttaen suuren määrän lämpöenergiaa, joka jatkaa ketjureaktiota törmäämällä uusiin uraaniatomeihin (Hubbert, 1956, s. 30). Ydinvoiman tuotannosta ei synny lainkaan suoria kasvihuonekaasupäästöjä, mutta ydinvoimaloiden rakentaminen on hyvin päästöintensiivistä ja lisäksi ydinvoiman tuotantoon tarvitaan uraania, jonka kaivaminen ja jalostaminen on ympäristölle kuormittavaa (Sovacool, 2008).

Brookin ja muiden (2014) artikkelin mukaan ydinvoima on ainoa päästötön energiamuoto, jolla on kykyä tuottaa modernien teollisten yhteiskuntien tarvitsema energiamäärä kestävästi ja luotettavasti pitkällä aikavälillä. Ydinvoiman puolustajat usein vetoavat siihen, ettei uusiutuvilla energiamuodoilla pysty täysin vastaamaan kokonaisenergian kysyntään ilman varaenergianlähteitä, sillä uusiutuvia energiamuotoja on haastavaa varastoida (Mathew, 2022, s. 5). Varaenergianlähteet pohjautuvat usein fossiilisiin polttoaineisiin (Brook ja muut, 2014, s. 9). Forsbergin (2009) mukaan kestävä energiantuotanto vaatii ydinvoiman, fossiilisten polttoaineiden ja uusiutuvien energiamuotojen yhteiskäyttöä. Ydinvoiman rooli sähköntuotannossa nähdään erityisen tärkeänä, silloin kun uusiutuvien energiamuotojen tuotanto on hetkellisesti vähäistä esimerkiksi vähätuulisten tai -aurinkoisten sääolosuhteiden aikana (Forsberg, 2009). Forsbergin (2009) mukaan olisi parempi tukea energiamuotojen yhteiskäyttöä kuin tarkastella niitä pelkästään kilpailevina tuotteina.

Ydinvoima kohtaa kritiikkiä erityisesti sen rakentamisvaiheen ongelmakohdista – rakentaminen on usein hidasta ja kallista, ja lisäksi se aiheuttaa merkittäviä päästöjä (Mez, 2012). Vaikka ydinvoiman kannattajat korostavat sen luotettavuutta, rakentamisvaiheen ongelmat kuten Olkiluodon ydinvoimalan mittavat viivästyksset ja lisäkustannukset Suomessa, herättävät kritiikkiä (Mez, 2012). Mez (2012, s. 62) tuo esiin myös eettiset ongelmat ydinvoiman yhteydestä ydinaseisiin ja kyseenalaistaa ydinvoiman vastuullisuuden, vaikka se tuotettaisiinkin ympäristölle kestävästi.

Sovacool (2008) puolestaan nostaa esiin laitosten toiminnan ja uraanin laadun vaihtelut, jotka vaikeuttavat ydinvoiman kokonaispäästöjen arviointia ja haastavat sen käsitteenä ”päästöttömänä” energialähteenä. Sovacoolin ja muiden (2020) tutkimus osoittaa, että kansalliset investoinnit ydinvoimaan eivät yleensä liity merkittävästi alhaisempiin hiilidioksidipäästöihin, toisin kuin uusiutuvat energialähteet. Lisäksi Sovacool ja muut (2020) havaitsivat, että ydinvoiman ja uusiutuvien energialähteiden investoinnit syrjäyttävät toisiaan, mikä heikentää molempien potentiaalista ilmastohyötyä. Ydinvoima kohtaa niin kritiikkiä kuin kannatustakin energiasektorilla, minkä takia sen kokonaisvaikutuksia ympäristölle on mielekästä tutkia lisää.

Tutkielman toisena hypoteesina esitetään, että päästöttömän energiantuotannon lisääntyminen vähentää päästöjä. Toisin sanoen oletus on, mitä suurempi on päästöttömän energian osuus koko energiantuotannosta, sitä alhaisemmat ovat Suomessa esiintyvät päästöt.

*H2: Päästöttömän energian tuotanto vaikuttaa negatiivisesti päästöihin.*

### **2.3 Kaupungistuminen ja kasvihuonekaasupäästöt**

Kaupungistuminen on taloudellisesta ja sosiaalisesta modernisaatiosta johtuva ilmiö (Poumanyvong & Kaneko, 2010, s. 434). Kaupungistuminen on prosessi, jossa

maaseudun työvoimaa siirtyy kaupunkialueelle. Myös maaseutualueen rakenteellinen muutos kaupunkialueeksi on osa kaupungistumista (Poumanuvong ja Kaneko, 2010). Kaupungistumisilmiöllä on useita vaikutuksia niin talouden kuin vastuullisuuden näkökulmasta, mutta tutkielmassa rajataan tarkastelu kaupungistumisen ja ilmastonmuutoksen välisen suhteen tarkasteluun päästöjen näkökulmasta.

Globaalilla tasolla voidaan todeta, että väestö kasvaa eksponentiaalisesti ja ihmiset tarvitsevat lisää asuinpaikkoja, mikä näkyy kaupunkialueiden kasvussa ja tihentymisessä (Pham ja muut, 2020). Phamin ja muiden (2020, s. 7) mukaan kaupungistuminen on jatkuvasti lisääntynyt Euroopan maissa, mikä on lisännyt hiilidioksidipäästöjen määrää. Suomessa väestön kasvu ei kuitenkaan ole nouseva trendi, mutta silti kaupungistumisen ennakoitaan jatkuvan ja väestön siirtyvän yhä enenevässä määrin suuriin kaupunkiseutuihin (Valtioneuvosto, 2022).

Kaupunkien kehittäminen vaikuttaa ympäristöön paikallisella, alueellisella ja maailmanlaajuisella tasolla muuttaen maisemia sekä kuluttamalla resursseja niin lähialueelta kuin kauempaa tuotuna (Alberti, 1999). Kaupungistuminen tuo mukanaan erilaista resurssien käyttöä verrattuna maaseutumaiseen asutukseen ja vaikutukset näkyvät niin vedessä, ilmassa kuin maankäytössäkin (Parikh & Shukla, 1995). Ehrhardt-Martinez (1998) argumentoi, että kaupungistumisen ja päästöjen välinen suhde voi mahdollisesti noudattaa EKC-hypoteesin mukaista käyrää. Ehtona on kaupungistumisen yhteydessä tapahtuva modernisaatio, joka johtaa parannuksiin tehokkuudessa ja resurssien käytössä sekä johtamisessa (Ehrhardt-Martinez, 1998).

Kaupunkien ympäristömuutosteoria (*Urban environmental transition theory*) olettaa kaupungistumisen ympäristövaikutusten riippuvan ja vaihtelevan maan kehitystason ja varallisuuden mukaan (Poumanyong & Kaneko, 2010). Maiden ominaispiirteet vaihtelevat ja vaikuttavat eri varallisuustasoilla kaupungistumisen ympäristövaikutuksiin. Alberti (1999) nostaa esille kaupunkien johtamisjärjestelmien tärkeyden ympäristöpaineiden hallitsemisessa, kun rakenteellinen muutos on käynnissä.

Kaupungistuminen vaikuttaa ihmisten käyttäytymiseen, kaupunkien rakenteeseen ja siten myös kotitalouksien energiankäyttöön (Poumanyong & Kaneko, 2010), millä on suora vaikutus päästöihin. Yhtä yhtenäistä teoriaa päästöjen ja kaupungistumisen välisestä suhteesta ei kuitenkaan ole muodostettu, sillä tutkimustulokset aiheesta ovat olleet vaihtelevia maiden kehitystason mukaan (Poumanyong & Kaneko, 2010).

Yleisesti kaupungistumisen nähdään lisäävän energiankulutusta, mikä puolestaan voi lisätä päästöjen määrää ja heikentää ympäristön tilaa. Kaupungistumisilmiön ja päästöjen välinen suhde ei kuitenkaan ole näin yksiselitteinen, sillä kaupunkialueiden rakenteella, suunnittelulla ja teknologisilla ratkaisuilla on merkittävä vaikutus siihen, millaisia ympäristövaikutuksia kaupungistumisesta lopulta syntyy. Kaupunkien kehittäminen tarjoaa myös mahdollisuuksia muun muassa mittakaavaetuihin ja luonnonvarojen säilyttämiseen (Alberti, 1999).

Tiiviin kaupunkikehityksen uskotaan parantavan ympäristön tilaa todennäköisemmin kuin hajanaisen esikaupunkikehityksen, kun verrataan eri kaupungistumisen muotoja (Alberti, 1999). Tiiviisti rakennettujen alueiden etu syntyy resurssien hyödyntämisestä ja liikennepäästöjen vähäisyydestä. Tiiviin kaupungin teoria vaatii kuitenkin onnistuakseen riittävää kaupunkien infrastruktuurin tukemista, jotta mahdollisuudet vähentää päästöjä julkisesta infrastruktuurista, liikenteestä ja sähkönkulutuksesta ovat realistiset toteutua (Poumanyong & Kaneko, 2010). Toisaalta tiiviisti rakennettu alue yleisesti sisältää vain vähän luonnontilassa olevia alueita, mikä vaikuttaa suoraan ilmastonmuutokseen ja biodiversiteettiin, vaikka päästöjä saataisiinkin vähennettyä rakennemuutoksilla. Maankäytön muutokset, joissa hävitetään metsää rakennuksien ja uusien alueiden tieltä, johtavat hiilidioksidin vapautumiseen ilmakehään, mikä lisää kasvihuonekaasuilmiötä (Parikh & Shukla, 1995).

Kaupungistumisteorian perusteella ei voida asettaa yhtä selkeää hypoteesia tutkielmalle, minkä takia kolmas hypoteesi jaetaan kahteen osaan, jossa on kaksi kilpailevaa oletusta:

*H3a:* Kaupungistuminen vaikuttaa negatiivisesti päästöihin.

*H3b:* Kaupungistuminen vaikuttaa positiivisesti päästöihin.

Hypoteeseista toinen hyväksytään ja toinen hylätään tutkielman empiiristen tuloksien perusteella. Seuraavassa osiossa tarkastellaan EKC-hypoteesia aiemman kirjallisuuden pohjalta.

### 3 Aiempi kirjallisuus

Ympäristön ja talouden välistä yhteyttä tarkastelevat tutkimukset, erityisesti EKC-hypoteesin näkökulmasta ovat osoittaneet merkittävää vaihtelevuutta tuloksissaan. EKC-hypoteesi on osoittautunut käyttökelpoiseksi, mutta kiistanalaiseksi työkaluksi ympäristön ja talouden välisen suhteen analysoinnissa. Kirjallisuuskatsauksessa syvennytään aihealueen keskeiseen kirjallisuuteen sekä sen kohtaamaan kritiikkiin ja tarkastellaan EKC-kirjallisuutta myös ajankohtaisesti Suomen, uusiutuvan energian ja kaupunkiasumisen näkökulmat huomioiden.

#### 3.1 Keskeinen EKC-kirjallisuus

Tutkimukset ympäristön ja talouden välisestä suhteesta juontavat juurensa 1990-luvulle. Merkittävä urauurtava EKC-kirjallisuuden alkuperäistutkimus on Grossmanin ja Kruegerin (1991) tutkimus, jossa tarkastellaan Pohjois-Amerikan vapaakauppasopimusta (NAFTA) ympäristönäkökulmasta. Tutkimus on ensimmäinen, joka havaitsi, ettei talouskasvu johda aina ympäristön tilan huonontumiseen (Balado-Naves ja muut, 2018, s. 267). Grossman ja Krueger (1991) löysivät käänteisen U:n muotoisen yhteyden, jossa talouskasvun alkuvaiheessa saastuminen kasvaa, mutta tulotason noustessa se alkaa vähentyä. Saastumista mitattiin SO<sub>2</sub> päästöillä. Lisääntyvä kauppa voi luoda uusia mahdollisuuksia ympäristöystävällisille aloille ja vauhdittaa ympäristöystävällisempää teknistä kehitystä sekä tehokkuutta (Grossman & Krueger, 1991). Grossman ja Krueger (1991) nostivat esille talouskasvun ja päästöjen välisen suhteen yhteydestä tärkeiksi tekijöiksi mittakaavan, rakenteen ja teknologian vaikutuksen.

Myös Shafik ja Bandyopadhyay (1992) löysivät käänteisen U:n muotoisen yhteyden ilmansaasteiden ja talouskasvun välille 1990-luvun alussa. Kaikki tutkimuksen kymmenenestä ympäristöindikaattorista eivät kuitenkaan noudattaneet tätä käyrää, ja tulos oli tilastollisesti merkitsevästi voimassa ainoastaan kahden ympäristöindikaattorin osalta (Safik & Bandyopadhyay, 1992). Lisäksi Panayotou (1994) vahvistaa EKC-

hypoteesin mukaisen suhteen päästöjen ja talouskasvun välille ja nostaa johtopäätöksissä esille ympäristölainsäädännön tärkeyden tuloksen toteutumisessa. EKC-käyrän kaltevuuteen vaikuttivat politiikan vääristymät kuten luonnonvarojen alihinnoittelu sekä tuet hiili- ja energiaintensiiviselle rakentamiselle (Panayotou, 1994). Nämä kolme 1990-luvun alun tutkimusta Grosmanin ja Kruegerin (1991) tutkimus tärkeimpänä ovat aihealueen kirjallisuuden keskeisiä peruslähteitä, jotka ovat luoneet pohjan EKC-kirjallisuuden kehitykselle.

Maailmanpankin *World Development* 1992-raportissa todettiin, että jossain tapauksissa EKC-hypoteesin mukainen tulos on esiintynyt, kun taas toisissa todisteita ei esiinny ollenkaan (Stern ja muut, 1996, s. 1152). Empiiriset tutkimukset ympäristön ja talouden välisestä suhteesta ovat yleistyneet, mutta tutkimuksien tulokset ovat olleet vaihtelevia eikä yhtä yhtenäistä tulosta ole vahvistettu. EKC-kirjallisuus on saanut osakseen myös kritiikkiä, jota esittelevät muun muassa Stern ja muut (1996) kriittisessä tarkastelussaan sekä Dinda (2004) laajassa EKC-hypoteesi kirjallisuusselvityksessään.

Stern ja muut (1996) tarkastelevat kriittisesti EKC-hypoteesin testaamista ja estimointia. Ongelmana nähdään yksisuuntainen kausaliiteettisuhde, jossa talouskasvu vaikuttaa ympäristön laatuun, mutta ei päinvastoin (Stern, 1996, s. 1155). Toiseksi keskeiseksi kritiikin kohteeksi nousee oletus kauppasuhteista, jotka eivät oletuksen mukaan vaikuta ympäristön tilaan (Stern ja muut, 1996). Todellisuudessa viennillä ja tuonnilla on suuri vaikutus niin talouden kuin ympäristökin tilaan.

Taloudellisen kasvun ja ympäristön tilan välinen suhde on ollut pitkään kiistanalainen tutkimusaihe. Dindan (2004) EKC-selvitys keskittyy havainnollistamaan ja kokoamaan yhteen aikaisempien empiiristen tutkimuksien tietämystä. Dinda (2004, s. 447) nostaa EKC-hypoteesin toteutuksen haasteeksi vaikeuden määrittää tekijöitä, jotka todellisesti hallitsevat ympäristön ja talouden välisen käyrän muotoa. Etenkin alkuvaiheen EKC-kirjallisuudessa selittäviä muuttujia päästöjen kehitykselle on ollut hyvin vähän talouskehityksen lisäksi, jos ollenkaan.

EKC-hypoteesin empiiriset tutkimukset eivät vastanneet 2000-luvulla ja sitä ennen kysymykseen mitkä tekijät aiheuttavat saasteiden määrän laskun käännekohdan jälkeen (Dinda, 2004, s. 447). Tämä on tehnyt poliittisten vaikutusten suunnitellusta hankalaa. Olemassa olevasta kirjallisuudesta 2000-luvulla käy selvästi ilmi, että suurin osa maailman väestöstä on edelleen nousevalla käyrällä ja käännekohta ei ole vielä saavutettu (Dinda, 2004, s. 447). On siis vaikea todeta, että päästöt todella vähentyisivät talouden kasvaessa, jos käännekohta ei ole saavutettavissa tai se on hyvin kaukana tulevaisuudessa.

Useimmissa tutkimuksissa on käytetty materiaalina poikkileikkausaineistoa ja tutkittu maaryhmiä yksittäisten maiden sijasta (Dinda, 2004, s. 449). Ensimmäinen sukupolvi ympäristötutkimuksia 1990–2000-luvuilla keskittyi ympäristön ja per henkilö tulojen väliseen tarkasteluun ilman muiden muuttajien tarkempaa huomioon ottamista (Balado-Naves ja muut, 2018, s. 267). Tämä on osaltaan vaikuttanut siihen, miksi tulokset ovat usein ristiriitaisia. Uudempi tutkimuskenttä 2010-luvulta eteenpäin on laajentanut hypoteesin käyttöä myös muihin selittäviin muuttujiin, joka on tehnyt malleista kattavampia ja lisännyt selitysasteen monipuolisuutta. Paljon käytettyjä regressiomallin selittäviä muuttujia talouskehityksen ohella ovat muun muassa energian kulutus, globalisaatio, kaupungistuminen, inhimillinen pääoma ja kaupankäynnin avoimuus (Gormus & Aydin, 2020, s. 27905).

Purcel (2020) on tarkastellut laajaa joukkoa EKC-tutkimuksia 2010-luvulta erityisesti kehittyvien maiden näkökulma huomioiden. EKC-kirjallisuudessa vallitseva yleinen käsitys on, etteivät kehittyvät maat pysty saavuttamaan käyrän käännekohtakohta yhtä todennäköisesti kuin kehittyneet maat (Purcel, 2020, s. 587). Tämä ei kuitenkaan ole täysin validi väite enää 2020-luvulla, sillä käänteisen U:n mallinen käyrä on löydetty toistuvasti myös kehittyvien maiden osalta (Purcel, 2020, s. 587). Muun muassa Kiinan alueelle keskittyvistä tutkimuksista löytyy kaikkia mahdollisia tuloksia EKC-käyrälle: U:n muotoinen käyrä, käänteinen U, lineaarinen suhde, N-muotoinen suhde ja käänteinen N (Purcel, 2020, s. 617).

Purcel (2020, s. 592) nostaa Dindan (2004) tavoin tärkeäksi määritellä EKC-yhtälöön talouskasvun lisäksi muuttujia, joilla on oikeasti todellista vaikutusta päästöihin. Myös Lealin ja Marquesin (2022) kriittinen kirjallisuuskatsaus EKC-kirjallisuuteen nostaa esille tuloksien moninaisuuden tarkastellessaan 200 artikkelia aikaväliltä 1998–2022. Moninaiset selittävät muuttujat ja laaja joukko tutkimuksia eri alueilta selittävät osaltaan tuloksien vaihtelua. Silti EKC-hypoteesi jatkaa suosiotaan kritiikistä ja yksimielisen tuloksen puutteesta huolimatta yhtenä käytetyimpänä mallina ympäristön ja talouden välisen suhteen tarkastelukeinona.

### **3.2 Suomi osana EKC-kirjallisuutta**

EKC-kirjallisuutta esiintyy enemmän maaryhmittäin kuin yksittäistä maata tutkivassa tarkastelussa. On olemassa kuitenkin joukko tutkimuksia, jotka keskittyvät Suomen näkökulman tarkasteluun. Myös Pohjoismaihin rajautunutta tutkimustietoa on saatavilla. Yksi ensimmäisistä Suomea tarkastelevista tutkimuksista on Kunnaksen ja Myllyntausen (2007) tutkimus EKC-hypoteesista. Kunnaksen ja Myllyntausen (2007) tutkimus rajautui sisältämään hiilidioksidi-, happo-, ja rikkidioksidipäästöjen kehityksen aikavälillä 1800–2003. EKC-hypoteesi hyväksyttiin tutkimuksessa käänteisessä U:n muotoisessa mallissa ainoastaan rikkidioksidipäästöjen osalta. Tämä tulos on Kunnaksen ja Myllyntausen (2007, s. 115) mukaan linjassa aikaisempien tutkimustuloksien kanssa: EKC-hypoteesia on hyväksytty enemmän rikkidioksidipäästöjen kuin hiilidioksidipäästöjen osalta.

Suomessa rikkidioksidipäästöjen laskun taustalla on teollisuusprosessien muutokset erityisesti 1970-luvulla. Teollisuusprosesseja muutettiin lähtökohtaisesti ainoastaan taloudellisista syistä, mutta prosessin muutos johtikin myös rikkidioksidipäästöjen laskuun (Kunnas & Myllyntaus, 2007, s. 117). Talouskehitys kasvoi entisestään, kun prosessimuutoksen myötä resursseja säästy ja ulkoishaittavaikutteiset päästöt vähenivät samalla, jolloin positiivinen vaikutus kertaantui moninkertaiseksi eri ulottuvuuksia tarkasteltaessa. Prosessimuutoksien taustalla vaikuttaa tekninen kehitys, jolla on suora vaikutus EKC-hypoteesin toteutumiseen ja käyrän kaltevuuteen.

Hiilidioksidipäästöjen osalta talouskehitys ja päästöt ovat kulkeneet suhteellisen samaa polkua Suomessa. Muun muassa 1990-luvun alun taantuman aikana päästöt vähenivät selvästi, kun talouskehitys hetkellisesti heikkeni (Kunnas & Myllyntaus, 2007, s. 109). Kunnas ja Myllyntaus (2007, s. 109–110) löysivät vahvan korrelaation energian käytön ja bruttokansantuotteen välille. Energian kulutus on kasvanut Suomessa tasaisesti suhteessa BKT:n kasvuun 1800-luvulta eteenpäin 2000-luvulle (Kunnas & Myllyntaus, 2007, s. 103). Energiankulutus puolestaan näkyy vahvasti päästöjen määrässä, eikä energiankulutuksessa tai hiilidioksidipäästöissä näy laskevaa trendiä Kunnaksen ja Myllyntausen 2000-luvun alun tutkimuksen tuloksissa.

EKC-käyrää on tutkinut Suomessa myös Georgeshu ja Kinnunen (2024) kuitenkin yksittäisten päästöjen sijaan ekologisella jalanjäljellä aikavälillä 1990–2021. Ekologinen jalanjälki määrittellään tuotantokykyisen maa- ja vesiekosysteemin alana, joka vaaditaan tuottamaan tietyn väestön kuluttamat resurssit ja käsittelemään tämän väestön jätteet, riippumatta siitä, missä maa ja vesi sijaitsevat (Rees, 2000, s. 371). Tutkimuksessa ekologista jalanjälkeä selitetään per henkilö mitatun BKT:n lisäksi suorilla ulkomaisilla investoinneilla ja energian kulutuksella (Georgeshu & Kinnunen, 2024). EKC-hypoteesia ei ole hyväksytty tutkimuksessa vaan päinvastoin ekologisen jalanjäljen ja bruttokansantuotteen välille on löytynyt U:n muotoinen suhde käänteisen suhteen sijaan. Georgeshu ja Kinnunen (2024, s. 6–8) vahvistavat kuitenkin yhden omista hypoteeseistaan: ulkomaiset suorat sijoitukset vähentävät ympäristön pilaantumista pitkällä aikavälillä Suomessa.

Pohjoismaita ovat tutkineet Kar (2023) sekä Urban ja Nordensvärd (2018). Molemmat tutkimuksista tarkastelevat Pohjoismaita yksilöitynä maatasolle ja hiilidioksidipäästöjä selitetään BKT:n lisäksi energian kulutuksella. Tutkimuksien tulokset kuitenkin eroavat. Urban ja Nordensvärd (2018) hyväksyvät EKC-hypoteesin Suomessa, kun päästöt on esitetty per henkilö muodossa. EKC-hypoteesi hylätään Suomessa, kun selitettävänä muuttujana on henkilöä kohden määritelmän sijasta tarkasteltuna kokonaispäästöt

(Urban & Nordensvärd, 2018). Kokonaispäästöjä tarkasteltaessa päästöt noudattavat aluksi käänteisen U:n muotoista käyrää, mutta tietyllä BKT:n tulotasolla tapahtuu selkeä muutos päästöissä kasvavaan suuntaan (Urban & Nordensvärd, 2018, s. 9). Tulos viittaisi siihen, että käänteisen U:n muotoisen käyrän sijaan esiintyisi N-muotoinen kuvaaja, jossa päästöt kääntyvät uudelleen nousuun. Karin (2023) tutkimuksessa Suomi ei puolestaan saa tilastollisesti merkitsevää tulosta lainkaan. Suomi on tutkimuksen ainut maa Pohjoismaista, joka ei saa tilastollisesti merkitsevää tulosta (Kar, 2023).

Urbanin ja Nordensvärdin (2018) tutkimustulos osoittaa EKC-hypoteesille hyväksynnän Tanskassa, Islannissa ja Ruotsissa kokonaishiilidioksidipäästöjen osalta. Kun päästöjä tutkitaan per henkilö tasolla, Suomen lisäksi EKC-hypoteesi hyväksytään Tanskassa, Islannissa ja Ruotsissa. Norjassa EKC-hypoteesia ei hyväksytä lainkaan (Urban & Nordensvärd, 2018). Myös Kar (2023) hylkää EKC-hypoteesin Norjan osalta U:n mallisen käyrän esiintyessä. Karin (2023) tutkimus on linjassa myös Islannin ja Tanskan osalta Urbanin ja Nordensvärdin (2018) tutkimuksen tuloksen kanssa, sillä maille EKC-hypoteesi on hyväksytty. Ruotsin osalta EKC-hypoteesia ei ole hyväksytty Karin (2023) tutkimuksessa, mikä eroaa Urbanin ja Nordensvärdin (2018) tutkimustuloksesta.

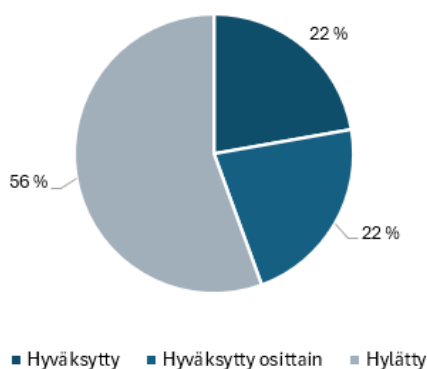
Aiemmista tuloksista poiketen Aydin ja muut (2023) eivät hyväksy EKC-hypoteesia Tanskassa. Aydinin ja muiden (2023) tutkimuksessa tarkastellaan EKC-hypoteesia kymmenessä Euroopan maassa, ja siinä huomioidaan uusiutuvan energian kulutus, energia T&K-investoinnit sekä vihreät patentit. EKC-hypoteesi hyväksytään ainoastaan Suomen osalta (Aydin ja muut, 2023, s. 110). Aydinin ja muiden (2023) tutkimuksen mukaan Suomi on saavuttanut EKC-käyrän käännekohtan ja on nyt käyrän laskevalla osuudella. EKC-hypoteesin Suomen osalta hyväksyvät myös Churchill ja muut (2018) tutkiessaan OECD-maita aikavälillä 1870–2014. Suomi ei ole kuitenkaan vielä saavuttanut käännekohtapistettä Churchillin ja muut (2018, s. 396) tutkimuksen mukaan.

Churchillin ja muiden (2018) tutkimuksessa analysoidaan OECD-maita yhdessä, jolloin EKC hypoteesi saa hyväksytyn tuloksen sekä maita yksilöityinä erikseen, jolloin EKC-

hypoteesin tulokset ovat vaihtelevat. Tutkimuksen 20 maasta vain viidelle hyväksyttiin käänteinen U:n muotoinen suhde päästöjen ja BKT:n välille. Suomen, Ranskan ja Yhdysvaltojen käänteiset U:n muotoiset käyrät ovat kaikki tilastollisesti merkitseviä ja muodoltaan melko lähellä toisiaan, sillä maiden käännekohtapiste esiintyy hyvin korkealla tulotasolla (Churchill ja muut, 2018, s. 396). Tulos viittaa siihen, että käännekohtapistettä on vaikea saavuttaa ja muuttaa päästöjen kehityksen suuntaa talouden kasvaessa.

Churchillin ja muiden (2018) tavoin myös Bilgili ja muut (2016) ovat tutkineet OECD-maita yhdessä ja erikseen. Bilgilin ja muiden (2016) tutkimus tukee pitkälti Churchillin ja muiden (2018) havaintoja, sillä paneeliaineiston perusteella EKC-hypoteesi voidaan hyväksyä. Yksittäisten maiden tarkastelussa esiintyy kuitenkin hajontaa tuloksien osalta. Suomen osalta EKC-hypoteesia ei hyväksytty (Bilgili ja muut, 2016, s. 842). Tutkimuksessa tuodaan esiin, että maat, joille hyväksytään EKC-hypoteesi vaihtelevat tulotasoiltaan suuresti. Tämä eroaa Churchillin ja muiden (2018) tutkimuksen tuloksessa, jossa käännekohta saavutettiin ainoastaan korkealla tulotasolla. Esimerkiksi Suomi, Kanada ja Yhdysvallat luokitellaan Bilgilin ja muiden (2016) tutkimuksessa korkean tulotason maiksi, mutta niissä EKC-hypoteesia ei hyväksytty. Sen sijaan Turkki, joka kuuluu matalamman tulotason maihin täyttää EKC-hypoteesin hyväksynnän ehdot. Tutkimuksessa kuitenkin hyväksytään EKC-hypoteesi myös kaikille Pohjoismaille lukuun ottamatta Suomea.

Aiemmat EKC-hypoteesin tutkimustulokset Suomen osalta



**Kuvio 3.** Aiemmat EKC-hypoteesin tulokset Suomessa.

**Taulukko 1.** Aiemmat EKC-hypoteesin tulokset Suomessa.

<b>EKC-hypoteesi</b>	<b>Lähde</b>	<b>Lisätiedot</b>
Hyväksytty	Aydin ja muut (2023) Churchill ja muut (2018)	
Osittain hyväksytty	Kunnas & Myllyntaus (2007) Urban & Nordensvärd (2018)	Rikkidioksidipäästöjen osalta hyväksytty Per henkilö tasolla hyväksytty
Hylätty	Baek (2015) Bilgili ja muut (2016) Georgescu & Kinnunen (2024) Gormus & Aydin (2020) Kar (2023)	Ei tilastollisesti merkitsevä tulos Ei tilastollisesti merkitsevä tulos U:n muotoinen EKC-käyrä Ei tilastollisesti merkitsevä tulos

Kuvio 3 ja taulukko 1 esittävät aiemman EKC-kirjallisuuden tuloksia, joiden pohjalta voidaan todeta Suomen aiemman EKC-kirjallisuuden tuloksien olevan vaihtelevia, kuten EKC-kirjallisuudessa globaalillakin tasolla. Myös tilastollista merkitsemättömyyttä esiintyy Suomea tarkasteltaessa niin EKC-hypoteesin hyväksynnän kuin muiden selittävien muuttujien osalta, joka viittaa mahdollisesti aineiston kanssa esiintyviin haasteisiin. Tarkastelluista tutkimuksista 56 prosenttia hylkäsi EKC-hypoteesin Suomessa ja puolestaan 44 prosenttia tutkimuksista hyväksyi EKC-hypoteesin ainakin tiettyjen muuttujien osalta eri aikavälejä tarkastellessa (ks. kuvio 3).

Aiemman kirjallisuuden perustella Suomi ja sen verrokkimaat, eli Pohjoismaat näyttävät kykenevän vähentämään päästöjä talouskasvun jatkuessa. Tämä ei kuitenkaan toistu yksiselitteisesti kaikissa tutkimuksissa vaan päinvastoin tulokset ovat jakautuneita. Teoriaosuudessa asetettuun *H1*-hypoteesiin liittyen voidaan todeta, että jos aineiston analyysi tuottaa tilastollisesti merkitsevän tuloksen on hypoteesin hyväksyminen todennäköistä. Toisaalta aiemmat tutkimustulokset ovat olleet ristiriitaisia, minkä vuoksi EKC-hypoteesin tarkastelu Suomen osalta on mielekästä selvittää.

### 3.3 Uusiutuva energiamuuttuja EKC-kirjallisuudessa

Leal ja Marques (2022, s. 7) vahvistavat energiamuuttujan olevan eniten käytetty lisämuuttuja selittävänä tekijänä EKC-hypoteesissa, sillä sen vaikutus ympäristölle on niin merkittävä. Energiamuuttujan käyttö toistuu myös Suomea tarkastelevissa tutkimuksissa, ja lähes kaikissa kirjallisuuskatsauksen tutkimuksissa on käytetty energiamuuttujaa osana EKC-hypoteesia. Energian kulutuksella on suora vaikutus päästöihin, joka osoitetaan todeksi teorian lisäksi myös empiiristen tutkimuksien osalta.

Bilgiliin ja muiden (2016) kirjallisuuskatsauksen mukaan EKC-kirjallisuudessa käytetään energiamuuttujana toistuvasti useammin kokonaisenergian kulutusta tai fossiilisen energian kulutusta kuin uusiutuvaan energiaan pohjautuvia muuttujia tarkasteltaessa energian vaikutusta. Tämä voi vaikuttaa tutkimustuloksiin ja johtopäätöksiin energian roolista talouskehityksessä. Leal ja Marques (2022, s. 7) nostavat kuitenkin esille EKC-kirjallisuuden kehityssuunnan siirtyvän energian kokonaiskulutuksen tarkastelusta kohti laajempaa ja monipuolisempaa energialähteiden analysointia, mikä edistää tarkempaa ymmärrystä energiamuuttujasta osana EKC-hypoteesia.

Empiiriset tulokset energiasta ovat selkeitä. Energian kokonaiskulutuksen kasvu yleisesti heikentää ympäristön laatua (Georghu & Kinnunen, 2024). Uusiutuvan energian osuuden kasvu energian kokonaiskulutuksesta puolestaan vähentää CO<sub>2</sub>-päästöjä niin lyhyellä kuin pitkällä aikavälillä (Bilgili ja muut, 2016; Pham ja muut, 2020). Khanin ja muiden (2018) tutkimus osoittaa, että uusiutuvan energian hyödyntäminen muun muassa veden jalostamisessa vähentää merkittävästi kasvihuonekaasupäästöjä. Väestön kasvaessa makean veden jalostamiseen kuluu yhä enemmän energiaa, ja jos kaikki jalostaminen toteutettaisiin jatkossa fossiilisilla polttoaineilla, olisi vaikutukset ilmastolle erittäin negatiiviset (Khan ja muut, 2018). Uusiutuvien energiamuotojen hyödyntäminen nähdään välttämättömänä toimenä päästöjen vähentämisessä.

Yaon ja muiden (2019) tutkimustulos osoittaa, että 10 prosentin kasvu uusiutuvan energian kulutusasteessa vähentää kasvihuonekaasupäästöjen määrää yleisesti noin 1,6

prosenttia, mutta maakohtaisia eroja voi esiintyä. Uusiutuvan energian kulutuksen edistäminen auttaa maata saavuttamaan EKC-käyrän käännekohtapisteen nopeammin (Yaon ja muut, 2019). Lopez-Menendezin ja muiden (2014) mukaan Euroopassa EKC-hypoteesi hyväksytään todennäköisemmin maissa, joissa uusiutuvien energiamuotojen osuus on suurta.

Pohjoismaita tarkasteltaessa on tärkeää huomioida, että vaikka ne käyttävät laajasti uusiutuvaa energiaa ja vähemmän fossiilisia polttoaineita kuin monet muut maat, on niiden energian kulutuksen määrä erittäin suurta per henkilö tasolla mitattuna (Kar, 2023, s. 1647). Energian kulutukseen vaikuttavat muun muassa Pohjoismaiden viileä ja haastava ilmasto sekä korkea elintaso, mitkä vaativat runsaasti energiaa. Energian kulutus on edelleen valtava osa maiden kokonaispäästöjä. Bruttokansantuotteen kasvun ohessa myös energian kulutus per henkilö tasolla mitattuna on kasvanut niin ennen kuin jälkeen 2000-luvun (Kunnas & Myllyntaus, 2007; Urban & Nordensvärd, 2018). Pohjoismaiden päästöt eivät kuitenkaan ole kasvaneet yhtä radikaalisti kuin maiden bruttokansantuotteet aikavälillä 1960–2014 (Urban & Nordensvärd, 2018). Päästöjen pienempää kasvua suhteessa BKT:n kasvuun selitetään juuri energiasiirtymän avulla, jossa Pohjoismaat ovat olleet edelläkävijöitä verrattuna muihin maihin (Urban & Nordensvärd, 2018).

Pohjoismaiden EKC-hypoteesien tuloksissa esiintyy hajontaa, ja tätä eroa selitetään pitkälti energiamuuttujan eroilla. Pohjoismaita tarkasteltaessa havaitaan, että Tanskalle hyväksytään EKC-hypoteesin mukainen tulos toistuvasti useammin kuin muille maille (ks. mm. Baek, 2015; Bilgili ja muut, 2016; Churchill ja muut, 2018). Tanskassa käytetään laajasti uusiutuvaa energiaa suhteessa energian kokonaiskulutukseen, minkä nähdään olevan merkittävä syy hypoteesin hyväksynnälle (Kar, 2023). Norjassa puolestaan hylätään EKC-hypoteesin validointi toistuvasti (ks. mm. Churchill ja muut, 2018; Kar, 2023; Urban & Nordensvärd, 2018). Norjan U:n muotoista suhdetta päästöjen ja BKT:n välillä selitetään sen vahvalla riippuvuudella öljyntuotantoon ja -kulutukseen (Urban & Nordensvärd, 2018). Norjan vahva riippuvuussuhde öljynjalostamiseen vähentää

panostusta uusiutuvien energiamuotojen kehitykseen ja käyttöön verrattuna muihin Pohjoismaihin. Suomen energiaportfoliota pidetään laajasti jakautuneena eri energiamuotojen välille, jonka nähdään osaltaan selittävän Suomen vaihtelevaa ja usein tilastollisesti merkitsemätöntä tulosta (Kar, 2023).

Energiaan kohdistuvat T&K-investoinnit ilmenevät ympäristölle positiivisesti ainakin Suomea tarkasteltaessa (Aydin ja muut, 2023). Energiainvestointeihin voi kuitenkin liittyä rebound-vaikutus (*rebound effect*), jolloin energiatehokkuuden parantamiseen tähtäävä investointi johtaa odottamattomasti aiempaa suurempaan energian kulutukseen (Stern, 2011, s. 40–41). Vaikutus voi tapahtua, vaikka energiainvestoinnin tavoitteena olisi nimenomaan vähentää energiankulutusta tai alentaa sen hintaa. Rebound-vaikutuksen oletetaan yleisimmin ilmenevän mikrotaloudellisella tasolla, mutta energiainvestoinneilla voi olla myös merkittäviä makrotaloudellisia vaikutuksia. Näitä vaikutuksia syntyy esimerkiksi silloin, kun energiainvestoinnin seurauksena energiakustannukset laskevat, mikä puolestaan kasvattaa talouden reaalityuloja. Kasvaneet reaalityulot lisäävät kulutuskysyntää koko taloudessa, mikä johtaa suurempaan energiankulutukseen tuotannon kasvaessa (Stern, 2011, s. 41).

Suomi on kuitenkin panostanut voimakkaasti uusiutuvan energian teknologioiden kehitykseen, mikä on vähentänyt sen riippuvuutta haitallisista fossiilista energialähteistä (Georgesu & Kinnunen, 2024, s. 6). Phamin ja muiden (2020) mukaan uusiutuvan energian osuuden kasvua kokonaistuotannosta ja positiivista vaikutusta ympäristölle vahvistavat EU:n vihreä siirtymä ja teknologinen kehitys. Yaon ja muut (2019) puolestaan painottavat, että siirtymä fossiilisista polttoaineista kohti uusiutuvia energiamuotoja on pitkäaikainen prosessi, minkä tulee näkyä myös tavoitteiden asetannassa.

Yhteenvetona voidaan todeta energiamuuttujan olevan tärkeä osa EKC-hypoteesia niin globaalisti kuin Pohjoismaidenkin saralla. Lealin ja Marquesin (2022, s. 7) mukaan energian kulutuksen analysointi on kehittynyt vuosien varrella, mikä näkyy myös EKC-hypoteesin arvioinnin kehityksessä. Energian alkuperään ja tuotantomuotoon

keskitytään yhä enenevässä määrin. EKC-hypoteesin hyväksynnän todennäköisyyttä lisäävät yhteiskunnan energiarakenne, jossa energiatehokkuus on korkea ja laadukasta, energian kulutus pientä sekä uusiutuvien energiamuotojen ja ydinvoima osuus kokonaisenergiantuotannosta merkittävä (Purcel, 2020, s. 623).

### 3.4 Kaupungistumismuuttuja EKC-kirjallisuudessa

Kaupungistumismuuttujan hyödyntäminen ei ole yhtä yleistä kuin energiamuuttujan käyttö EKC-hypoteesin tarkastelussa ja lisäksi kaupungistumismuuttajan sisältäviä tutkimuksia ei ole yhtä paljon saatavilla. Väestön rakennetta ja sosiaalisia ilmiöitä tarkastellaan kuitenkin usein EKC-kirjallisuudessa muuttujien väestö, kaupungistuminen, sukupuolijakauma, ikäjakauma ja globalisaatio avulla (Leal & Marques, 2022). EKC-kirjallisuuden ja kaupungistumisteorian tavoin ei yhtä yhtenäistä tulosta löydetä päästöjen ja kaupungistumisen välille vaan muuttujien välinen suhde nähdään monitahoisempana (ks. taulukko 2).

**Taulukko 2.** Kaupungistumisen ja päästöjen väliset suhteet.

Havainto	Selitys
Kaupungistuminen lisää päästöjä	Energian kulutus kasvaa
Kaupungistuminen vähentää päästöjä	Julkinen infrastruktuuri tehostuu

Colen ja Neumayerin (2004) tutkimus vahvistaa kaupungistumismuuttujan monimutkaisuutta, sillä tutkimustulokset osoittavat kaupungistumisen ja hiilidioksidipäästöjen välille merkitsevän positiivisen suhteen, kun puolestaan rikkidioksidipäästöjen osalta ei saada samaa tulosta. Ainoastaan hiilidioksidipäästöjen nähtiin kasvavan kaupungistumisen yhteydessä ei kaikkien kasvihuonekaasupäästöjen (Cole & Neumayer, 2004). Tämä viittaa siihen, että kaupungistumisen vaikutus päästöihin voi olla kaasu- tai päästötyyppikohtaista.

Colen ja Neumayerin (2004) tavoin Parikh ja Shukla (1995) korostavat kaupungistumisen ja energiankulutuksen välistä positiivista korrelaatiota. Parikh ja Shukla (1995) nostavat tuloksissaan esille kaupungistumisen lisäävän energian kulutusta erityisesti sähkön näkökulmasta, mikä puolestaan lisää päästöjen määrää. Selitykseksi esitetään kaupunkialueella asuvan väestön yleisesti korkeampaa elintasoja ja suurempaa palveluiden kulutusta verrattuna maaseudulla asuviin (Parikh & Shukla, 1995).

York (2007) puolestaan tutkii kaupungistumista EKC-hypoteesin avulla, mutta ei validoi käännteistä U:n muotoista suhdetta, sillä talouskasvun ja kaupungistumisen nähtiin vaikuttavan energian kulutukseen kasvavana suorana. On epäselvää, milloin kaupungistumisen mittakaavaedut ja positiiviset ulkoisvaikutukset ympäristölle olisivat niin merkittävät, että ne ylittäisivät kiistattomat haittavaikutukset (Parikh & Shukla, 1995). Kaupungistuminen ei automaattisesti johda päästöjen laskuun EKC-hypoteesin tavoin, vaan tulos on riippuvainen maan kehityksen tasosta.

Phamin ja muiden (2020) tutkimus tarkastelee väestön, vaurauden ja teknologisen kehityksen ympäristövaikutuksia Euroopan maissa. Tutkimuksen tulos osoittaa kaupungistumisen heikentävän ympäristön tilaa pitkällä aikavälillä (Pham ja muut, 2020). Lyhyellä aikavälillä kaupungistuminen ei aiheuttanut haittaa ympäristön tilalle vaan päinvastoin, kaupungistumismuuttujan kerroin oli lyhyellä aikavälillä negatiivinen, joka viittasi pienempään ympäristön laadun heikkenemiseen ja samalla CO<sub>2</sub>-päästöjen laskuun (Pham ja muut, 2020). Phamin ja muiden (2020) tulos osoittaa maan kehityksen tason lisäksi myös tarkasteluajanjakson tärkeyden ja riippuvuuden tulokseen.

Wangin ja muiden (2015) tutkimustulos OECD-maista on ristiriidassa Phamin ja muiden (2020) sekä Yorkin (2007) tutkimustuloksen kanssa. Wang ja muut (2015) osoittavat hiilidioksidipäästöjen kasvavan kaupungistumisen alkuvaiheessa, mutta kääntyvän laskuun pitkällä aikavälillä, vaikka kaupungistuminen yhä lisääntyisi. Wangin ja muiden (2015) tutkimuksen tulos osoittaa käännteisen U:n muotoisen suhteen kaupungistumisen ja CO<sub>2</sub>-päästöjen välille kymmenen prosentin merkitsevyytasolla. EKC-hypoteesi

kaupungistumisen ja päästöjen välille on siis hyväksytty poiketen Yorkin (2007) tutkimuksesta. EKC-hypoteesin validointia voidaan pitää tutkimuskohtaisena ja vaihtelevana. Kaupungistumismuuttujan eroja voidaan selittää siihen vaikuttavilla tekijöillä, jotka ovat listattu taulukossa 3.

**Taulukko 3.** Kaupungistumisen ja päästöjen välisen suhteen vaikuttavat tekijät.

Suhteeseen vaikuttavat tekijät	Kuvaus
Kaupungistumisen vaihe	alkuvaihe – myöhempi vaihe
Aikaväli	lyhyt – pitkä
Maan / alueen kehityksen taso	heikko – korkea
Päästötyyppi	eri päästöajit reagoivat eri tavoin
Tutkimusmenetelmä	käytetty metodologia, asetettu hypoteesi, yleistettävyys, merkitsevyys

Myös Chenin ja muiden (2008) tutkimustulos osoittaa kaupungistumisilmiön ympäristöhuolille helpotusta. Tutkimus Kiinasta osoittaa, että kaupungistuminen voi johtaa energian kulutuksen vähenemiseen tehostetun julkisen infrastruktuurin ansiosta etenkin kehittyvissä maissa (Chen ja muut, 2008). Tulos viittaa siihen, että tietyt kaupungistumisen piirteet, kuten infrastruktuurin tehokkuuden parantuminen, voivat lieventää sen negatiivisia ympäristövaikutuksia. Myös kaupungistumisessa lisääntyvä modernisaatio voi lisätä tietoisuutta, jolloin ympäristöhaasteita on helpompi ratkoa mitä pidemmälle maan kehitys etenee (Poumanyong & Kaneko, 2010).

Liddle (2004) puolestaan osoittaa tutkimuksessaan kaupungistumisen ja liikenteen kehityksestä, että tiivisti asutuilla kaupunkialueilla, on vähemmän henkilökohtaista liikenteen kysyntää, mikä vähentää yksityisautoilun määrää ja sitä kautta liikenteen päästöjä huomattavasti. Jos kaupungistumisen nähdään vähentävän päästöjä, tapahtuu se useimmiten julkisen infrastruktuurin ja liikenteen avulla. Toisaalta Liddle (2004) hylkää EKC-hypoteesin tarkastellessaan OECD-maita ja Yhdysvaltoja tulotason ja autoilun välillä. Tulotason kasvu ja autoilun määrä ei siis noudata käännteistä U:n muotoista käyrää, vaan tulotason kasvaessa autoilun määrä ei saavuta käännekohtapistettä, minkä jälkeen se

kääntyisi laskuun. Voidaan siis todeta, ettei tulotason kasvu johda yksityisautoilun laskuun, mutta kaupungistuminen puolestaan voi laskea sitä.

Oleson ja muut (2013) ovat tutkineet kaupungistumisen, lämpöstressin ja ilmastonmuutoksen välisiä vuorovaikutussuhteita. Tulokset osoittavat, että ilmastonmuutos on lisännyt korkeaa lämpöstressiä aiheuttavien päivien ja öiden määrää sekä maaseudulla että kaupungeissa (Oleson ja muut, 2013, s. 537). Ilmastonmuutos näkyy siis niin maaseudulla kuin kaupungeissakin. Oleson ja muut (2013, s. 537) nostavat esille tuloksien vaihtelun riippuen siitä, miten lämpöstressiä mitataan. Myös Wang ja muut (2015) tuovat esille kirjallisuuskatsauksensa yhteydessä, että tutkimuksien tulosten merkittävyys sekä kertoimien jyrkkyys on riippuvainen tutkittavan maan kehityksen tasosta sekä alueellisesta jaosta. Tulokset vaihtelevat siis eri maiden kehityksen tason, kaupungistumisvaiheen, tarkasteluajanjakson ja -paikan sekä tutkimusmenetelmän mukaan, mikä osoittaa, että kaupungistuminen voi eri tilanteissa joko lisätä tai vähentää päästöjä. Tuloksien yhtenäisyyden puute korostaa tarvetta tarkastella kaupungistumisen ja päästöjen suhdetta kontekstisidonnaisesti ja huomioida sekä lyhyen että pitkän aikavälin vaikutukset.

## 4 Aineisto

Tutkielman aineisto on paneelidatamuotoinen aineisto, joka sisältää 19 maakuntaa aikavälillä 2005–2022 (18 vuotta). Tutkielmassa kasvihuonekaasupäästöjä sekä bruttokansantuotetta mitataan asukaskohtaisesti eli maakuntakohtaiset luvut ovat suhteutettu per henkilö määrään. Kaupungissa-asuvien määrää mitataan prosenttiosuudella suhteessa maaseudulla asuviin ja päästötöntä energiantuotantoa puolestaan prosenttiosuudella suhteessa koko energiantuotantoon. Taulukossa 4 on määritelty aineiston muuttujat sekä niiden lyhenteet, tarkemmat kuvaukset ja tietolähteet.

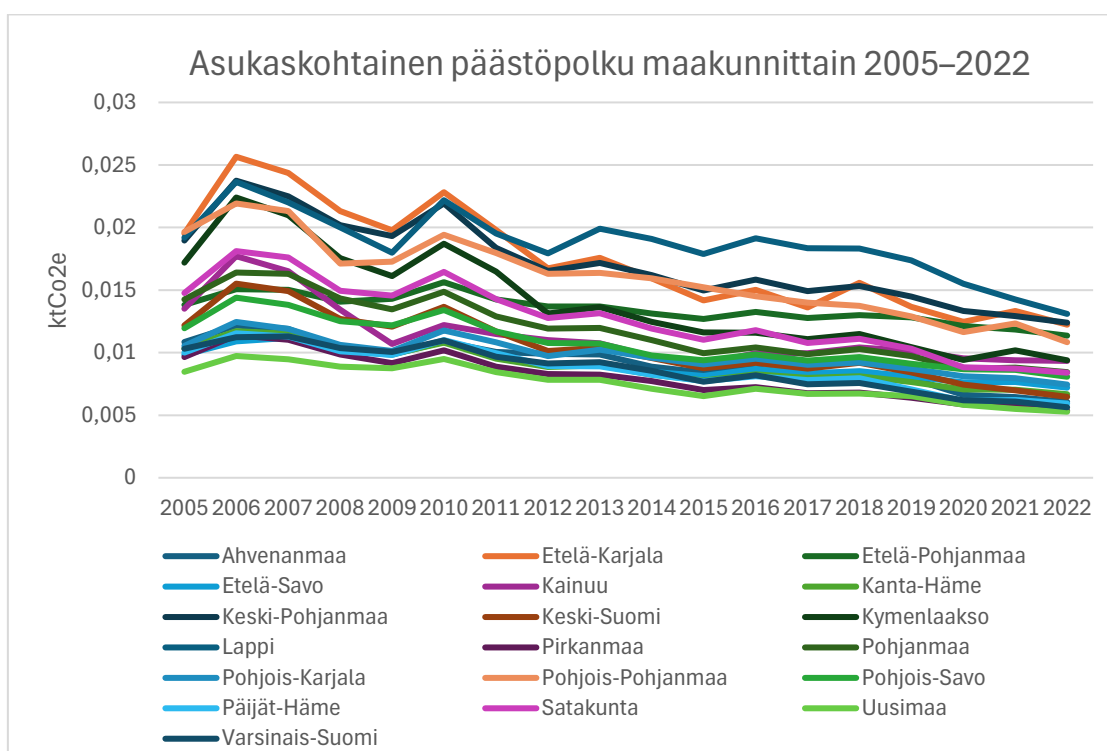
**Taulukko 4.** Muuttujien kuvaukset ja tietolähteet.

Muuttuja	Lyhenne	Selitys	Tietolähde
<i>Selittävä muuttuja</i>			
Päästöt	CO <sub>2</sub>	Kasvihuonekaasupäästöt (ktCO <sub>2</sub> e per asukas)	Suomen Ympäristökeskus (2024)
<i>Selittävät muuttujat</i>			
Bruttokansantuote	BKT	Bruttokansantuote (käypiin hintoihin, eur per asukas)	Tilastokeskus (2024a)
Päästötön energiantuotanto	PET	Vesi-,tuuli-, ja ydinvoiman tuotantoosuus koko sähkön tuotannosta (prosenttiluku)	Energiateollisuus (2024)
Kaupunkiasumisaste	KAA	Kaupunkialueella asuvien osuus (prosenttiluku)	Tilastokeskus (2024b)

### 4.1 Päästölaskenta

Alueelliset päästötiedot on laskenut Suomen Ympäristökeskus (SYKE) käyttöperusteisella päästölaskennan menetelmällä. Suomessa käytetään Alas-mallia, joka on käyttöperusteinen alueellinen laskentatapa. SYKE:n (Lounasheimo ja muut, 2020, s. 83) määritelmän mukaan käyttöperusteisella tarkoitetaan: ”alueellisen päästölaskennan rajausta, jossa osa päästöistä lasketaan niiden tuotantopaikkakunnan ja osa alueella tapahtuvan kulutuksen mukaan”. Päästöt lasketaan sektoreittain hiilidioksidi-, metaani- ja dityppioksidipäästöille sekä F-kaasuille (Lounasheimo ja muut, 2020, s. 13). Laskenta

sisältää kaikki merkittävät kasvihuonekaasupäästöt Suomessa. Kaikki päästöyksiköt muunnetaan ilmastoa lämmittävältä vaikutukseltaan vastaavaksi määräksi hiilidioksidia ja esitetään hiilidioksidiekvivalentteina (Lounasheimo ja muut, 2020, s. 13). Tämän takia selitettävä muuttuja on nimetty CO<sub>2</sub> nimiseksi. SYKE:n käyttämät muuntokertoimet ovat kansainvälisen laskentamalli GPC-standardin (*Global Protocol for Community-scale Greenhouse Gas Emission Inventories*) mukaisia (Lounasheimo ja muut, 2020, s. 10). Alas-laskentamalli vastaa GPC-standardin perustasoa, sisältäen lisäksi maatalouden, mutta poissulkien lentoliikenteen (Lounasheimo ja muut, 2020, s. 13).



**Kuvio 4.** Asukaskohtainen päästöpolku maakunnittain 2005–2022.

Aineisto sisältää vuodet 2005–2022 rajautuen maakuntakohtaisiin päästöihin asukastasolla. Tämä on pisin aikaväli, jolla Suomessa on laskettu alueellisesti maakuntakohtaiset päästöt. Päästöt esitetään kt CO<sub>2</sub>e arvossa. Kuviosta 4 nähdään, että alueellisten päästöjen trendi on ollut laskeva kaikissa maakunnissa pitkällä aikavälillä. Pienimmät asukaskohtaiset kasvihuonekaasupäästöt havainnoidaan Uudellamaalla, jossa väkiluku on puolestaan Suomen maakunnista suurin. Asukasta kohden esiintyviä

päästöjä on havaittu kyseisellä aikavälillä eniten Etelä-Karjalassa, Lapissa ja Keski-Pohjanmaalla. Keskihajonta CO<sub>2</sub>-muuttujan osalta on suurta, sillä maakuntien päästöt vaihtelevat huomattavasti, ja joidenkin maakuntien päästöt ovat yli kaksinkertaisia verrattuna toisiin (ks. taulukko 5). Maakuntakohtaisten päästöjen tarkastelu on tärkeää, sillä EKC-hypoteesin tulokset ovat tarkimmat pitkällä aikavälillä ja paikallisia päästöjä tarkasteltaessa (Purcel, 2020, s. 594).

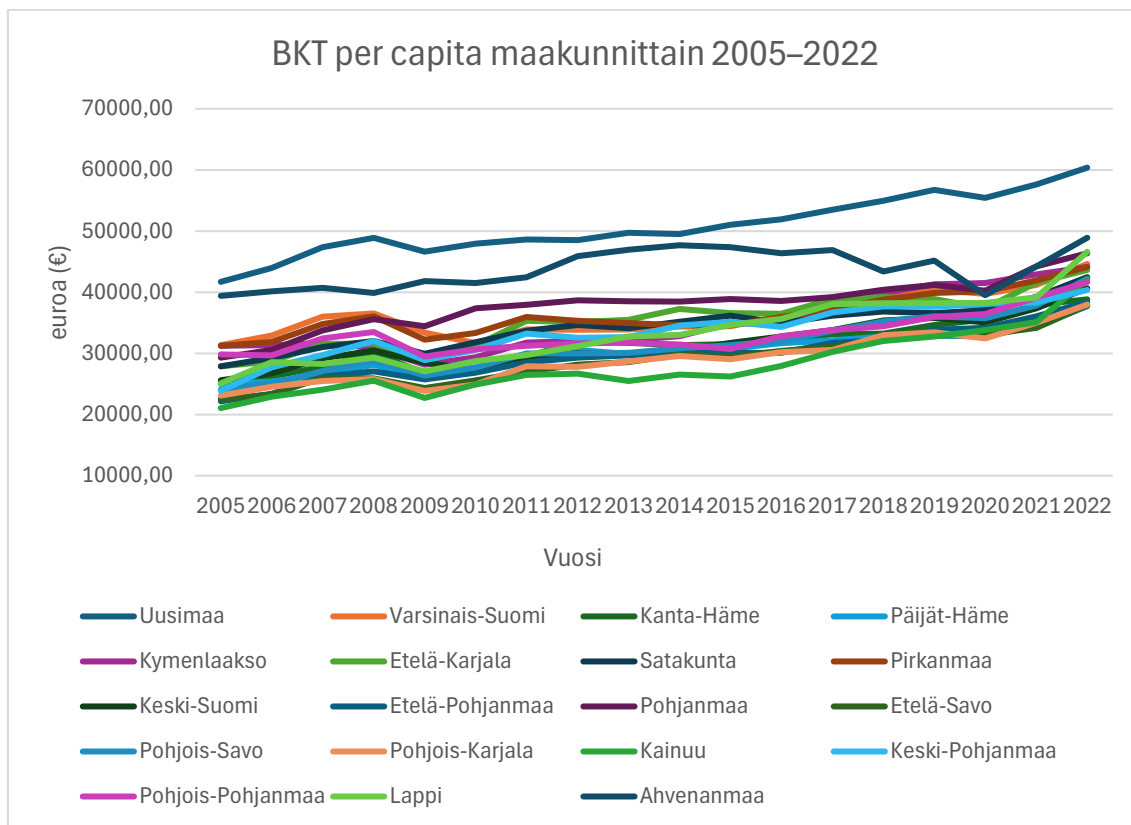
**Taulukko 5.** CO<sub>2</sub> muuttujan ominaisuudet.

Muuttuja	Havainnot	Keskiarvo	Keskihajonta	Min	Max
CO <sub>2</sub>	342	0,117933	0,0041353	0,0052814	0,0256575

## 4.2 Selittävät muuttujat

Tutkielman selittävät muuttujat ovat bruttokansantuote, kaupunkiasumisaste ja päästöttömän energian tuotanto. Selittäviksi muuttujiksi on pyritty valitsemaan mahdollisimman oleellisia muuttujia päästöjen muodostumisen kannalta Suomessa, jotta tulokset olisivat mahdollisimman käyttökelpoisia ja vakaita (Metsämuuronen, 2009). Tutkielman tilastot bruttokansantuotteesta sekä kaupungistumisasteesta on kerätty Tilastokeskukselta (2024a, 2024b).

Tutkielman aineiston bruttokansantuote on mitattuna euroissa käyppiin hintoihin, ja suhteutettu maakunnan asukaslukuun. Asukasta kohden lasketussa bruttokansantuotteessa on nähtävillä pienehköä nousevaa trendiä pitkällä aikavälillä kaikissa muissa havaintoryhmissä poissulkien Ahvenanmaan (ks. kuvio 5). BKT muuttujan minimi ja maksimi arvoissa on nähtävissä suhteellisen suuri ero aineistossa, lukujen ollessa pienimmällään 21 000 euroa per henkilö ja suurimmillaan yli 60 000 euroa per henkilö mitattuna (ks. taulukko 6). BKT muuttujan ääriarvot vaihtelevat yli kaksinkertaisesti keskiarvon ollessa noin 34 000 euroa.



**Kuvio 5.** Maakuntakohtainen BKT per capita.

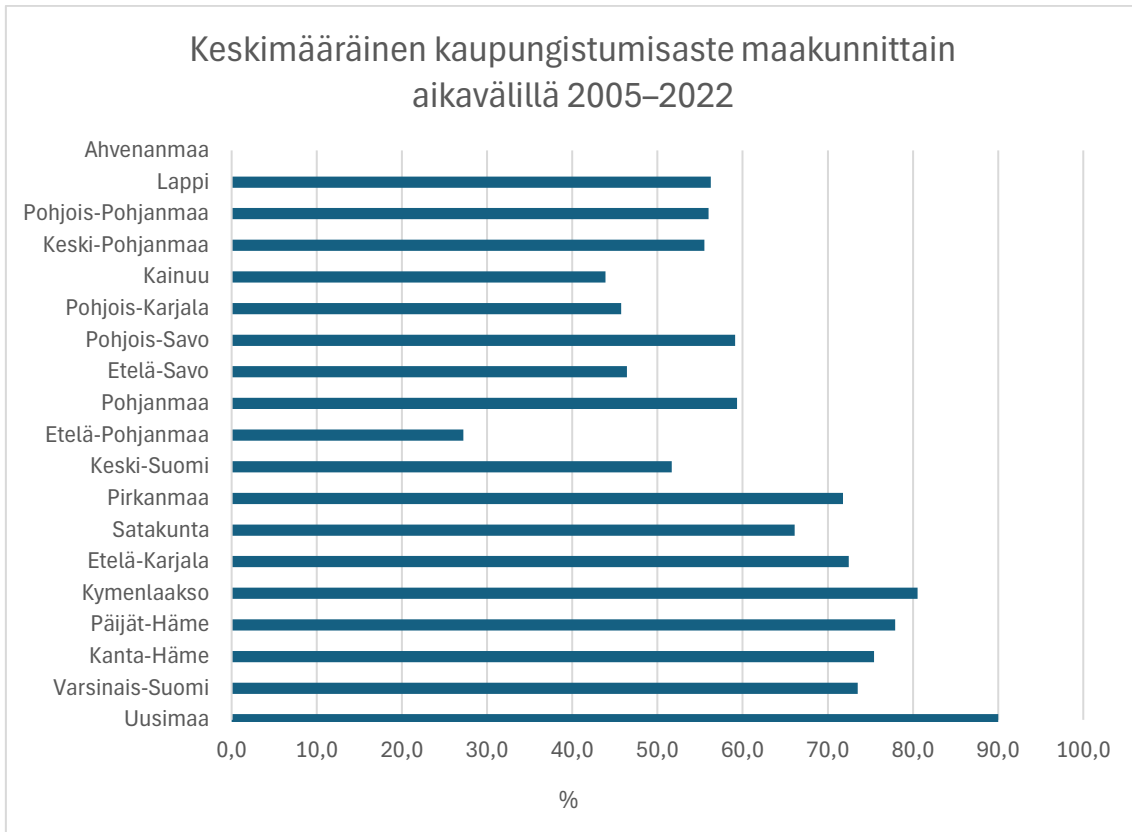
**Taulukko 6.** Selittävien muuttujien ominaisuudet.

Muuttuja	Havainnot	Keskiarvo	Keskihajonta	Min	Max
BKT	342	34241,91	6753,894	21057	60375,8
KAA	342	58,36784	20,33681	0	91,1
PET	342	40,54711	31,70478	0,1153403	100

Päästöttömän energian tuotannon aineisto on Energiateollisuuden (2024) koostama. Energiamuuttujan tarkasteluun valittiin sähköntuotanto, sillä tuotantomäärät ovat selkeästi ja luotettavasti saatavilla alueellisena tietona. Kulutusperusteisessa mittauksessa on haastavampaa selvittää energian todellinen jakautuminen alueellisesti, sillä kuluttajilla on vapaus valita energiansa myös asuinalueen ulkopuolelta. Tutkimusaineiston alueellisessa sähköntuotannossa on huomioitu vesi-, tuuli- ja ydinvoima sekä yhteistuotanto, kaukolämpö ja erillinen lämpövoima sähköntuotannossa. Tutkielman aineisto ei huomioi aurinkoenergian tuotantoa.

Tutkielman energiamuuttuja päästöttömän energian osuudesta rajautuu sisältämään uusiutuvien energiamuotojen lisäksi ydinvoiman, sillä tutkielmassa halutaan selvittää, miten ydinvoima käyttäytyy uusiutuvien energiamuotojen kanssa päästöjen näkökulmasta. Brook ja muut (2014) pitävät tutkimuksessaan ydinvoimaa ainoana päästöttömänä energiatuotannonmuotona, jolla on todellista kapasiteettia vastata kysyntään. Ydinvoima on kahdessa maakunnassa Uudellamaalla ja Satakunnassa merkittävin sähköenergiatuotannon muoto tutkimusaineiston perusteella, jolloin sillä on myös merkittävä vaikutus tuloksiin. Tarkasteltaessa tuotannon volyymeja ydinvoiman tuotanto on vuonna 2022 yli 16 000 GWh (gigawattituntia) Satakunnassa, kun puolestaan tuuli- tai vesivoiman tuotantomäärät eivät nouse missään maakunnassa yli 5000 GWh:n. Ydinvoiman mittakaava on siis aineistossa merkittävästi suurempi kuin muiden uusiutuvien energialähteiden tuotantomäärät.

Kun tarkastellaan päästöttömän energian tuotantoprosenttia maakunnissa, siinä havaitaan esiintyvän vaihtelua 11 prosentista 100 prosenttiin (ks. taulukko 6). Keskiarvolta sähkön kokonaistuotannosta päästötöntä on noin 40,5 prosenttia Suomessa. Ahvenanmaa erottuu aineistossa poikkeuksena BKT:n trendin lisäksi myös muiden muuttujien minimini ja maksimi arvoissa, sillä Ahvenanmaan sähköenergiatuotannosta päästöttömän tuotannon osuus on toistuvasti lähes 100 prosenttia suuren tuulivoimatuotannon takia. Tuulivoiman osuus sähköntuotannosta on suurempi Ahvenanmaalla kuin muissa maakunnissa. Puolestaan kaupunkiasumisen minimiarvossa Ahvenanmaa erottuu myös selkeästi, sillä Tilastokeskuksen (2024b) aineiston mukaan Ahvenanmaalla koko väestö asuu maaseuduksi määritellyllä alueella.



**Kuvio 6.** Keskimääräinen kaupunkiasumisaste vuosina 2005–2022.

Kaupunkialueella asuvan väestön määrässä esiintyy luonnollisesti merkittäviä eroja maakuntien välillä (ks. kuvio 6 & taulukko 6) riippuen maakuntien rakenteesta. Kaupunkialueella asuvien osuudessa voidaan havaita pienehkö kasvua, mutta yleisesti trendi on säilynyt lähes samana kaupunkiasumisen ja maaseutuasumisen välillä Suomessa viimeisen 18 vuoden aikana. Tutkimusaineiston perusteella 14 maakunnassa yli puolet väestöstä asuu kaupunkialueella. Helminen ja muut (2020, s. 12) määrittelevät kaupunkialueen ja maaseutualueen eron seuraavasti: ”Kaupunkiseutujen keskustaajamia ovat yli 15 000 asukkaan taajamat. Näihin rajataan ydinkaupunkialue, joka jakautuu ulompaan ja sisempään kaupunkialueeseen. Ydinkaupunkialueen ympärille rajataan kaupungin kehysalue”. Maaseudulla asuvan väestön osuus on suurin Ahvenanmaalla, Etelä-Pohjanmaalla, Kainuussa, Pohjois-Karjalassa ja Etelä-Savossa.

## 5 Menetelmä

EKC-kirjallisuuden tutkiessa yksittäistä maata käytetään toistuvasti Pesaranin kehittämää ARDL-mallinnusta (*Autoregressive Distributed Lag model*) (Purcel, 2020). ARDL-menetelmä sisältää useita eri estimointimenetelmiä ja menetelmäosiossa tarkennetaan tutkielman aineistolle sopivimmat estimointimenetelmät EKC-hypoteesin testaamiseksi. Aineiston estimoinnilla tutkitaan pitkän aikavälin suhdetta kasvihuonekaasupäästöjen ja muuttujien BKT, KAA ja PET välillä. Ennen mallin estimointia aineistolle toteutetaan poikkileikkausriippuvuustestaus.

### 5.1 Mallin määrittely

Regressioanalyysi on tehokas työkalu oleellisten muuttujien vaikutusten tarkasteluun selitettävässä muuttujassa ja sopii hyvin tutkittavan ilmiön mallintamiseen (Metsämuuronen, 2009, s. 711). EKC-hypoteesissa ympäristön tilan heikkenemistä arvioidaan useimmiten useiden muuttujien yhtälönä, jossa esiintyy ainakin talousindikaattorimuuttuja (Georgescu & Kinnunen, 2024, s. 4). Monimuuttuja regressioyhtälön avulla saadaan selvitettyä, miten ja kuinka vahvasti selittävät muuttujat vaikuttavat päästöjen muodostumiseen. Perusmallin muodostuminen:

$$CO_2 = f(Y_{it}, Y^2_{it}, KAA_{it}, PET_{it}),$$

missä  $Y$  on BKT. (14)

Indeksi  $i$  kuvastaa maakuntaa eli ryhmää ja  $t$  vuotta eli aikasarjaa. Muuttuja KAA on kaupunkiasumisaste ja muuttuja PET päästöttömän energian tuotantoaste. BKT-muuttuja esitetään lisäksi myös sen neliönä, jonka avulla saadaan validoitua EKC-hypoteesin tulos. Regressioyhtälön tarkempi määrittely:

$$CO_2 = \beta_0 + \beta_1 * BKT_{it} + \beta_2 * BKT^2_{it} + \beta_3 * KAA_{it} + \beta_4 * PET_{it} +$$

vuositrendi +  $\mu_{it}$ .

(15)

Yhtälössä  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  ja  $\beta_4$  ovat muuttujien BKT, BKT:n neliö, KAA ja PET kertoimia.  $\beta_0$  on vakio ja  $\mu_{it}$  regression virhetermi. Monimuuttuja regressiossa vakio edustaa tilannetta, missä mikään muu muuttuja ei pysty selittämään mallia (Metsämuuronen, 2009, s. 721). Trendimuuttujan käyttö regressioyhtälössä lisää lineaarisen trenditermin, joka huomioi ajan vaikutuksen ja vähentää systemaattista vaihtelua virhetermissä. Regressioyhtälö tarvitsee aina myös virhetermin, sillä mikään malli ei pysty selittämään tilannetta täydellisesti (Metsämuuronen, 2009, s. 721). Regressioyhtälö luonnollisessa log-lineaarisessa muodossa:

$$\ln CO_2 = \beta_0 + \beta_1 * \ln BKT_{it} + \beta_2 * \ln BKT_{it}^2 + \beta_3 * KAA_{it} + \beta_4 * PET_{it} + \text{vuositrendi} + \mu_{it},$$

missä  $\ln$  luonnollinen logaritmi. (16)

Regressioyhtälön tarkastelu luonnollisen logaritmin muodossa on suotavaa, sillä se tasoittaa aineiston vaihtelua ja varmistaa tasaisemman varianssin (Lütkepohl & Xu, 2012). Logaritmuotoa käytetään korjaamaan mallista liiallista heteroskedastisuutta (Metsämuuronen, 2009, s. 731). Muuttujia KAA ja PET ei muuteta logaritmiseen muotoon, sillä muuttujien arvot ovat prosentuaalisia lukuja.

## 5.2 Poikkileikkausriippuvuuden testaus

Paneeliaineiston käyttäminen empiirisessä tutkimuksessa on hyödyllistä, sillä se mahdollistaa havainnot sekä aikasarja- että poikkileikkaavuus huomioiden (Kar, 2023, s. 1642). Paneeliainestoa kuitenkin tyypillisesti rasittaa poikkileikkausriippuvuuden ja kulmakerrointen heterogeenisyyden ongelmat, jotka voivat johtaa vinoutuneisiin ja epäjohdonmukaisiin estimaatteihin, jos tarvittavia aineiston testauksia ei tehdä ja oteta huomioon (Kar, 2023, s. 1642). Regressioanalyysin oletuksena kuitenkin on, että

selittävät muuttujat voivat korreloida keskenään, kunhan korrelaatio ei ole voimakasta (Metsämuuronen, 2009, s. 713).

Tutkielman aineistolle tehdään Pesaranin (2004) mallintama CD-testaus (*Cross-sectional dependence test*). Aineistossa saattaa olla maakuntien välistä alueellista riippuvuutta, mikä tarkoittaa, että päästöjen kehitys yhdessä maakunnassa voi mahdollisesti vaikuttaa myös muiden maakuntien kehitykseen. Lisäksi muuttujien BKT, PET ja KAA välillä saattaa esiintyä mahdollista riippuvuutta. Tämä mahdollinen poikkileikkausriippuvuus aineistossa tulee ottaa huomioon ja tarkastaa Pesaranin (2004) CD-testauksella. Pesaranin (2004) CD-testin nollahypoteesi olettaa, että poikkileikkaavuutta ei esiinny ja testi noudattaa standardinormaalijakaumaa  $\sim N(0,1)$ . Nollahypoteesi hylätään, jos p-arvo on alle 0,05 merkitsevyystasolla. Pesaranin (2004, s. 5) CD-testin matemaattinen kaava:

$$CD = \sqrt{\frac{2T}{N(N-1)} \left( \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \widehat{\rho}_{i+j} \right)}. \quad (17)$$

CD-testissä T on aikasarjan pituus ja N poikkileikkausyksiköiden lukumäärä. Testissä on tarkalleen nolakeskiarvo kiinteille T- ja N-arvoille laajassa joukossa paneelianeistomalleja (Pesaran 2004, s. 6). Tähän sisältyvät heterogeeniset dynaamiset mallit, joissa on useita katkoja kulmakerrointen ja virheiden varianssien arvoissa (Pesaran, 2004, s. 6).  $\rho_{i+j}$  on residuaalien parittaisen korrelaation otosestimaatti ja summausmerkkien avulla lasketaan kaikki mahdolliset korrelaatiokertoimet havaintoyksiköiden välillä (Pesaran, 2004, s. 4). Residuaalilla tarkoitetaan mallissa selittämättömäksi jäänyttä osaa, joka lasketaan havaitun ja ennustetun arvon erotuksena (Metsämuuronen, 2009, s. 631).

### 5.3 Estimointi

Pesaranin ja Smithin (1995) määrittelemä MG-estimaattori (*Mean Group*) mahdollistaa paneeliaineiston analysoinnin, vaikka maakuntien kulmakertoimien välillä esiintyisi heterogeenisyyttä. MG-malli estimoi kullekin poikkileikkausyksikölle oman regressiomallinsa ja laskee näiden estimaattien keskiarvon (Pesaran & Smith, 1995). MG-analyysimenetelmän avulla saadaan selvitettyä selitettävän muuttujan CO<sub>2</sub> ja selittävien muuttujien BKT, KAA ja PET väliset yhteydet. MG-estimaattorin heikko puoli on, ettei se huomioi aineiston poikkileikkausriippuvuuden esiintymistä (Churchill ja muut, 2018, s. 392). MG-estimaattori sopii aineistolle kuitenkin hyvin, sillä sen tulokset toimivat parhaiten, kun paneeliaineiston havaintoyksikköjä on paljon (Martinez-Zarzoso & Bengochea-Morancho, 2003, s. 123). MG-mallinnuksen yksinkertaistettu kaava Stata-ohjelmistossa, jossa aineiston estimointi lasketaan:

$$y_{it} = X'_{it} * b_i + u_{it}, \quad (18)$$

$$x_{it} = a2_i + \lambda_i * f_t + \gamma_i * g_t + eps_{it}, \quad (19)$$

$$u_{it} = a1_i + \lambda_i * f_t + e_{it}. \quad (20)$$

Oletuksena yksinkertainen malli, kun  $i = 1, \dots, N$  (*maakunta*) ja  $t = 1, \dots, T$  (*vuosi*), missä  $x_{it}$  ja  $y_{it}$  ovat havaittavia muuttujia,  $b_i$  on maakuntakohtainen kerroin havaittaville regressoreille ja  $u_{it}$  sisältää havaitsemattomat tekijät sekä virhetermin  $e_{it}$ . Yhtälön (20) havaitsemattomat tekijät koostuvat vakiorhmävaikutuksista  $a1_i$ , jotka kuvaavat ajassa muuttumatonta heterogeenisyyttä ryhmien välillä, sekä havaitsemattomasta yhteisestä tekijästä  $f_t$ , jolla on heterogeeniset kerrointekijät  $\lambda_i$ .

Poikkileikkausriippuvuutta mallinnuksessa voidaan vähentää aikasarjatrendin avulla. Trendimuuttujan käyttö osana regressioyhtälön mallinnusta määrittää, että jokainen ryhmäkohtainen regressio täydennetään lineaarisella trenditermillä. Lineaarinen trenditermi ottaa huomioon ajan vaikutuksen, mikä auttaa erottamaan ajan myötä

tapahtuvat muutokset muista tekijöistä ja vähentää virhetermiin jäävää systemaattista vaihtelua.

Pesaranin ja muut (1999) määrittelemä PMG-estimaattori (*Pooled Mean Group*) sallii erot lyhyen aikavälin kertoimissa, mutta rajoittaa pitkän aikavälin kertoimien olevan poikkileikkauksissa homogeeniset. Erot lyhyen aikavälin kertoimissa voivat olla muun muassa kertoimien sopeutumisnopeudessa ja virhevarianssien arvoissa (Martinez-Zarzoso & Bengochea-Morancho, 2003, s. 123). PMG-estimaattori sisältää sekä yhdistämisen (*pooling*) yhdistää useat havaintosarjajaksiköt, että keskiarvojen estimoinnin (Martinez-Zarzoso & Bengochea-Morancho, 2003, s. 123).

PMG-estimaattorin etuna on, että se antaa tulokset myös lyhyen aikavälin kertoimille. PMG-estimaattorin käyttö on tavanomaista EKC-kirjallisuudessa yhdessä MG-estimaattorin kanssa lisävarmuuden luomiseksi sekä lyhyen aikavälin trendien selvittämiseksi. PMG-estimaattorin käyttö ei kuitenkaan ole mahdollista tutkielman aineistolle, sillä 18 vuoden aikasarja ei ole riittävä PMG-mallinnukseen laskemaan lyhyen ja pitkän aikavälin kertoimia. Tällöin luotettavia ja merkitseviä tuloksia ei voida laskea PMG-mallinnuksen avulla.

Tuloksia tarkasteltaessa on hyvä ottaa huomioon EKC-kirjallisuuden kohtaama kritiikki erityisesti mallinnuksen ja menetelmän osalta. Lealin ja Marquesin (2022, s. 8–9) mukaan on perusteltua todeta, että EKC-hypoteesin validointi on herkkä ja riippuu käytetystä mallista sekä valitusta aikasarjasta ja muuttujista. Tämän takia on mielekästä käyttää useampaa estimointimenetelmää hypoteesin validoimiseksi. MG-mallinnuksen lisäksi tutkielman aineistolle on valittu sopivaksi regressioanalyysin menetelmäksi kiinteiden vaikutusten malli (FE-malli, *fixed effect*). Kiinteiden vaikutusten malli sopii erityisesti aineistolle, jonka aikasarja on pieni ja havaintoyksikköjä on paljon. Kiinteiden vaikutusten mallissa kaikki tekijöiden mahdolliset arvot ovat olleet mukana, eikä satunnaisia tekijöitä ole (Metsämuuronen, 2009, s. 1340). FE-malli ei huomioi

poikkileikkausriippuvuutta, mutta poikkileikkausriippuvuuden vaikutuksia voidaan vähentää mallintamalla trendimuuttuja mukaan estimointiin.

EKC-hypoteesin validointi saadaan selvitettyä MG- ja FE-estimoinnin avulla, kun tarkastellaan muuttujien BKT ja BKT:n potenssi kertoimia. Kaavoissa 21–25 on esitetty mahdolliset vaihtoehdot ympäristön ja talouden välisen yhteyden muodoista. Matemaattiset vaihtoehdot ympäristön tilan ja talouden välisen suhteen kertoimille ovat (Dinda, 2004, s. 440–441):

$$\beta_1 = \beta_2 = 0. \text{ Ei suhdetta } x \text{ ja } y \text{ välillä.} \quad (21)$$

$$\beta_1 > 0, \beta_2 = 0. \text{ Lineaarinen suhde } x \text{ ja } y \text{ välillä.} \quad (22)$$

$$\beta_1 < 0, \beta_2 = 0. \text{ Laskeva suhde } x \text{ ja } y \text{ välillä.} \quad (23)$$

$$\beta_1 < 0, \beta_2 > 0. \text{ U: n muotoinen suhde } x \text{ ja } y \text{ välillä.} \quad (24)$$

$$\beta_1 > 0, \beta_2 < 0. \text{ Käänteinen U: n muotoinen suhde } x \text{ ja } y \text{ välillä.} \quad (25)$$

Kaavassa  $x$  kuvastaa talousindikaattoria ja  $y$  ympäristön tilaa kuvaava indikaattori (Dinda, 2004). Kaavassa 25, missä kerroin  $\beta_1$  on positiivinen ja kerroin  $\beta_2$  negatiivinen, EKC-hypoteesi voidaan validoida, sillä se muodostaa  $x$ :n ja  $y$ :n välille käänteisen U:n muotoisen suhteen. Seuraavassa osiossa esitetään estimoinnin tulokset ja analysoidaan esitettyjen tutkimuskysymyksien ja hypoteesien tulokset.

## 6 Tulosten analysointi

Empiirisen tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, miten taloudellinen kehitys on vaikuttanut kasvihuonekaasupäästöjen kehitykseen Suomessa sekä millainen suhde päästöttömän energian tuotannolla ja kaupungistumisella on päästöjen määrään. Tutkimuskysymyksille asetettiin teoriaosuudessa hypoteesit, jonka pohjalta tuloksia analysoidaan. *H1* hypoteesi olettaa talousmuuttujan ja päästöjen välille käänteisen U:n mallisen suhteen EKC-hypoteesin tavoin. *H2* hypoteesi olettaa päästöttömän energiantuotannon vähentävän päästöjen määrää pitkällä aikavälillä. Kolmas hypoteesi *H3* jakautuu kahteen osaan, jossa on kaksi kilpailevaa oletusta. Ennen estimointia ja hypoteesien tulkintaa käydään läpi aineistolle toteutettu testaus.

### 6.1 Aineiston testaus

Pesaranin (2004) CD-testin nollahypoteesin mukaan muuttujien välillä ei esiinny poikkileikkausriippuvuutta, ja testisuure noudattaa standardinormaalijakaumaa  $\sim N(0,1)$ . Nollahypoteesi hylätään kaikkien muuttujien osalta (ks. taulukko 7), mikä osoittaa, että poikkileikkausriippuvuutta esiintyy kaikissa tarkastelluissa muuttujissa. On yleistä, että useamman selittävän muuttujan yhtälöissä esiintyy selittävien muuttujien välistä riippuvuutta (Metsämuuronen, 2009, s. 721). Poikkileikkausriippuvuus on tyypillistä myös muille paneeliaineistoille EKC-kirjallisuudessa (ks. esim. Aydin ja muut, 2023, s. 109; Churchill ja muut, 2018, s. 391; Gormus & Aydin, 2020, s. 27909; Kar, 2023, s. 1642–1643; Pham ja muut, 2020, s. 7; Wang ja muut, 2022, s. 10). CD-testin tulos poikkileikkausriippuvuudesta tulee kuitenkin huomioida mallin testauksessa.

**Taulukko 7.** Pesaranin poikkileikkausriippuvuustestin tulokset.

Muuttuja	CD-testi	p-arvo	korrelaatio	korrelaation itseisarvo
CO <sub>2</sub>	47,05	0,000	0,951	0,951
BKT	46,37	0,000	0,937	0,937
BKT <sup>2</sup>	46,59	0,000	0,942	0,942
KAA	48,77	0,000	0,986	0,986
PET	17,81	0,000	0,360	0,452

## 6.2 MG-mallin estimointi

Taulukossa 8 esitetään MG-mallin estimoinnin tulokset. Estimointimalliin sisällytettiin ryhmäkohtainen lineaarinen trendi, joka parantaa mallin selitystasetta ja vähentää aineiston poikkileikkausriippuvuutta. Kaikki muuttujat pois lukien vuositrendimuuttujan kerroin saavat tilastollisesti merkitsevän tuloksen p-arvon alittaessa 0,05 arvon. Näitä tilastollisesti merkitseviä kertoimia on siis mielekäästä analysoida tarkemmin.

**Taulukko 8.** MG-mallin estimoinnin tulokset.

					Havainnot	304
					Ryhmiä määrä	19
ln_CO <sub>2</sub>	Kerroin	Keskihajonta	z	P> z	[95 % luottamusväli]	
ln_BKT	20,78498	10,29656	2,02	0,044	0,6041004	40,96586
ln_BKT <sup>2</sup>	-0,981783	0,4814665	-2,04	0,041	-1,92544	-0,0381262
KAA	-0,076163	0,0380693	-2,00	0,045	-0,1507774	-0,0015483
PET	-0,005325	0,0012903	-4,13	0,000	-0,0078539	-0,0027960
Vuositrendi	-0,016913	0,009765	-1,73	0,083	-0,0360523	0,0022258
Keskineliövirheen neliöjuuri (RMSE):			0,0407			
Wald chi2(5):			105,41			
Tod. > chi2:			0,000			

BKT-muuttujan kerroin on positiivinen ( $\beta_1 > 0$ )  $\beta_1$  ollessa 20,785, kun taas BKT:n potenssin kerroin  $\beta_2$  -0,982 on negatiivinen ( $\beta_2 < 0$ ), mikä tukee EKC-hypoteesia menetelmäosion kaavan 25 mukaisesti. Ensimmäinen hypoteesi "H1: Päästöjen ja talouskasvun välillä on käänteisen U:n mallinen yhteys (EKC-hypoteesi)" voidaan hyväksyä kertoimien ollessa tilastollisesti merkitseviä. Suomessa maakuntatasolla käänteinen U:n muotoinen suhde ilmenee asukasta kohden lasketun BKT:n ja päästöjen välillä.

EKC-käyrän käännekohtapiste saavutetaan kohdassa 10,588, kun tarkastelussa on regressioyhtälö luonnollisten logaritmien muodossa. Käännekohta  $\ln(10,588)$  on

euroissa mitattuna 39 677, 53 € / BKT per henkilö. Tulos tarkoittaa sitä, että Suomessa on ylitetty BKT:n taso, jonka jälkeen päästöt kääntyvät laskuun. Tutkimustulos on linjassa Aydinin ja muiden (2023) sekä Urbanin ja Nordensvärdin (2018) tutkimuksien kanssa. Toisaalta tutkimustulos on ristiriidassa Churchill ja muut (2018) tutkimustuloksen kanssa, jossa Suomi ei ole vielä saavuttanut käännekohtapistettään.

Päästöttömän energiantuotannon kerroin on negatiivinen ja tilastollisesti merkitsevä p-arvon ollessa nolla. Hypoteesi ”H2: Päästöttömän energian tuotanto vaikuttaa negatiivisesti päästöihin” hyväksytään. Tämä tarkoittaa sitä, että ydinvoiman ja uusiutuvien energialähteiden tuotannon osuuden kasvu kokonaisenergian tuotannosta vähentää päästöjen määrää Suomessa. Tutkielman tulos osoittaa, että ydinvoimaa ja uusiutuvaa energiaa on hyödyllistä käyttää yhdessä, sillä se vähentää päästöjä merkittävästi.

Tulos on osittain ristiriitainen Sovacoolin ja muiden (2020) tutkimustuloksen kanssa, sillä he esittävät, että ydinvoiman ja uusiutuvan energian yhteiskäyttö ei olisi hyödyllistä, sillä se syrjäyttää keskinäisiä investointeja ja heikentää molempien energiamuotojen potentiaalista käyttöä. Suomessa maakuntatasolla päästöt kuitenkin vähenevät, kun uusiutuvaa energiaa ja ydinvoimaa tuotetaan entistä enemmän suhteessa kokonaisenergiantuotantoon. Tulos on linjassa muun muassa Bilgilin ja muiden (2016) sekä Phamin ja muiden (2020) tuloksien kanssa, sillä niissä vahvistetaan uusiutuvan energian tuotanto-osuuden kasvun suhteessa kokonaisenergiantuotantoon vähentävän päästöjen määrää ja muuttujan regressiokertoimen olevan negatiivinen.

Ydinvoiman käyttö on hyvin ajankohtainen ja kiistelty aihe osana ilmastonmuutoksen hillintää. Ympäristö- ja ilmastoministeri Mykkänen korostaa ydinvoiman roolia keskeisenä tekijänä puhtaassa siirtymässä pois fossiilisista polttoaineista (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2024). Tutkielman aineistossa ydinvoiman osuus kokonaisenergiantuotannosta oli merkittävästi suurempi kuin uusiutuvien energiamuotojen eli vesi- ja tuulivoiman osuus. Tutkielman aineiston ja samalla Suomen

päästöttömän energiantuotannon painottuessa tuotantomäärällisesti ydinvoimaan voidaan todeta ydinvoiman oleva tärkeä keino Suomen energiasiirtymässä kohti puhtaampaa energiaa. Ydinvoimalla on todellista tuotantokapasiteettia ja varastointikykyä Suomessa. Tutkielma rajautuu kuitenkin tarkastelemaan ainoastaan energiantuotannon päästömääriä eikä muun muassa tuotantolaitosten rakentamisvaiheen ulkoishaittavaikutuksia ympäristölle. Tämä tulee huomioida tulosten analysoinnissa erityisesti, kun ydinvoiman rakentaminen on hyvin energia intensiivistä.

Hallitusohjelman mukaan sähköntuotannon uskotaan kasvavan Suomessa moninkertaisesti ja toimintavarmuus on ylläpidettävä kaikissa tilanteissa (Valtioneuvosto, 2023, s. 135). Suomen energiallista omavaraisuutta pidetään tärkeänä niin turvallisuuden kuin taloudenkin näkökulmasta. Ainoastaan uusiutuvien energiamuotojen tuotannolla ja tarjonnalla on haastavaa toteuttaa toimintavarmaa sähköntuotantoa kaikissa olosuhteissa ilman fossiilisia polttoaineita. Ydinvoimat tuottavat sähköä moninkertaisesti verrattuna täysin uusiutuviin energialähteisiin, joten niillä on konkreettinen ja merkittävä rooli Suomen ilmastotavoitteiden saavuttamisessa.

Sähkönkulutuksen lisääntyessä on erityisen tärkeää panostaa tuotannon alkuperään ja ympäristöystävällisyyteen, sillä energian kulutuksen tiedetään lisäävän päästöjen määrää ja ilmaston kuormaa, jos se toteutetaan fossiilisten polttoaineiden avulla. Maakuntien energiantuotannon pitää vahvemmin siirtyä päästöttömien energiamuotojen hyödyntämiseen, jotta EKC-käyrä saataisiin jyrkempään laskuun myös tulevaisuudessa. Myös energiansiirtohävikin minimoinnin tulisi olla tärkeä kehityskohta osana energiasiirtymää.

Myös kaupunkiasumisen kerroin on negatiivinen ja tilastollisesti merkitsevä viiden prosentin merkitsevyytasolla  $p$ -arvon ollessa 0,045. Kaupungistumismuuttujan negatiivinen kerroin tarkoittaa, että kaupunkiasumisen osuuden kasvulla on päästöjä vähentävä vaikutus tutkimusaineistossa. Kaupungistumismuuttujan  $H3$  hypoteesi jaettiin teoriaosuudessa kahteen vastakkaiseen hypoteesiin:

*H3a:* Kaupungistuminen vaikuttaa negatiivisesti päästöihin.

*H3b:* Kaupungistuminen vaikuttaa positiivisesti päästöihin.

*H3a* hypoteesi hyväksytään kaupungistumisen vähentäessä päästöjen määrää. Kaupunkiasumisen positiivista vaikutusta päästöjen vähenemiselle voidaan selittää sillä, että kaupunkiasuminen mahdollistaa nykyaikaisemman ympäristön, jossa on helpompi toteuttaa tehokkuusparannuksia sekä resurssienhallintaa ja julkista kestävää infrastruktuuria (Wang ja muut, 2015, s. 708). Tutkimustulos on linjassa aiemman kirjallisuuden osalta muun muassa Chenin ja muiden (2018) sekä Wangin ja muiden (2015) tuloksien kanssa, jotka osoittavat kaupungistumisen johtavan pitkällä aikavälillä päästöjen laskuun.

Liikenne on suurin yksittäinen taakanjakosektorin päästölähde Suomessa (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2022, s. 71). Kaupunkiseudulla liikenteelle on enemmän vaihtoehtoja kuin harvaan asutuilla alueilla, kuten joukkoliikenteen mahdollisuuksia, jolloin yksityisautoilun vähentäminen on helpompaa kaupunkialueella. Myös välimatkat ovat usein selkeästi pidempiä maaseutumaisessa ympäristössä. Tämä on yksi selittävä tekijöistä päästöjen laskussa erityisesti kaupunkialueilla. Joukkoliikenneratkaistuilla voidaan edistää tiiviin ja turvallisen kaupunkiympäristön muodostumista (Kuntarahoitus, 2024). Kaupunkialueilla ja kaupunkien välisen liikenteen suunnitteluun on kuitenkin kiinnitettävä huomioita ja ohjattava nykyistä autokeskeistä järjestelmää yhä enemmän kohti kestävästä liikkumisen järjestelmästä, jotta päästöjä saadaan aidosti vähennettyä ilmastotavoitteiden mukaisesti (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2022, s. 143). Liikennepäästöjen vähentäminen vaatii entistä tiukempaa sääntelyä niin paikallisella kuin valtakunnallisella tasolla.

Kaupungistumismuuttujan tuloksen tarkastelussa tulee ottaa huomioon, että aineistossa käytetty päästölaskentametriodi huomioi myös maataloustuotannon. Maatalous keskittyy

pitkälti maaseudulle ja on toiseksi suurin takaajanjakosektori päästöille Suomessa (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2022, s. 73). Maatalous keskittyy harvaan asutuille alueille, joissa henkilöä kohden lasketut päästöt kasvavat suuriksi, kun maataloudesta tulee paljon päästöjä ja asukkaita alueella suhteessa tuotantomääriin on vähän. Kaupunkialueella ihmisiä on enemmän ja maatalouden tuotantoa vähemmän, jolloin päästöjä per henkilö tasolla syntyy vähemmän kyseisen merkittävän päästöjen taakanjakosektorin osalta.

Harvaan asutuilla alueilla tuotetaan ruokaa koko Suomen alueelle, mutta tuotannon päästöt näkyvät ainoastaan harvaan asutulle seudulle. Vaikka kaupunkiasumisen kasvu näyttäisi regressioyhtälössä vähentävän päästöjä, ei voida suoraan tulkita, että kaupunkiasuminen olisi ainoastaan positiivista ympäristölle. Toisaalta myös maataloudelle on asetettu päästövähennystavoitteet, joita Suomen tulee tavoitella, jotta Suomen hiilineutraalisuustavoitteen saavuttaminen olisi mahdollista (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2022, s. 70–71).

### 6.3 Kiinteiden vaikutusten (FE)-mallin estimointi

MG-mallinnuksen lisäksi aineistolle sovellettiin kiinteiden vaikutusten (FE)-malli tulosten luotettavuuden varmistamiseksi. Tutkielman paneeliaineisto on melko pieni aineisto etenkin aikasarjan osalta, joten on hyvä estimoida aineistoa myös toisella mallinnuksella. Eri laskentatapojen yhtenevät tulokset lisäävät tutkimustuloksen luotettavuutta ja vastaavasti eroavat tulokset kertovat aineiston ja tuloksen mahdollisesta herkkyydestä.

FE-mallin tulokset ovat yhteneviä MG-estimoinnin tulosten kanssa EKC-hypoteesin validoinnin osalta, mikä lisää analyysin kokonaisluotettavuutta. Taulukossa 9 on esitetty FE-mallin estimoinnin tulokset. MG-estimoinnin tavoin myös FE-estimointi antaa kertoimille  $\beta_1$  ja  $\beta_2$  kaavan 25 mukaisen sekä tilastollisesti merkitsevän tuloksen. Hypoteesi ”H1: Päästöjen ja talouskasvun välillä on käänteisen U:n mallinen yhteys (EKC-hypoteesi)” voidaan hyväksyä myös FE-mallinnuksen osalta. Näin ollen kiinteiden

vaikutusten malli vahvistaa EKC-hypoteesin, jossa päästöjen ja BKT:n välillä ilmenee käänteinen U:n muotoinen suhde Suomessa maakuntatasolla.

**Taulukko 9.** Kiinteiden vaikutusten regressiomallin tulokset.

					Havainnot	304
					Ryhmiä määrä	19
ln_CO <sub>2</sub>	Kerroin	Keskihajonta	z	P> z	[95 % luottamusväli]	
ln_BKT	<b>12,23806</b>	<b>3,136211</b>	<b>3,90</b>	<b>0,000</b>	<b>6,064511</b>	<b>18,4116</b>
ln_BKT <sup>2</sup>	<b>-0,5757965</b>	<b>0,1504205</b>	<b>-3,83</b>	<b>0,000</b>	<b>-0,8718951</b>	<b>-0,2796979</b>
KA	<b>0,007186</b>	<b>0,0063549</b>	<b>1,13</b>	<b>0,259</b>	<b>-0,0053235</b>	<b>0,0196956</b>
PET	<b>-0,0004708</b>	<b>0,0003877</b>	<b>-1,21</b>	<b>0,226</b>	<b>-0,001234</b>	<b>0,0002924</b>
Vuositrendi	<b>-0,042302</b>	<b>23171</b>	<b>-18,26</b>	<b>0,000</b>	<b>-0,0468632</b>	<b>-0,0377407</b>
Kokonaisselitysaste:	<b>0,0984</b>					
Sisäinen selitysaste:	<b>0,8702</b>					
Rho:	<b>0,961</b>					

KA- ja PET-muuttujien tulokset eivät olleet kiinteiden vaikutusten mallissa tilastollisesti merkitseviä p-arvojen ylittäessä 5 ja 10 prosentin merkitsevyytason (ks. taulukko 9). Vuositrendimuuttuja on FE-mallissa kuitenkin tilastollisesti merkitsevä, mikä poikkeaa myös MG-estimoinnin tuloksesta. Kaupungistuminen ja päästöttömän energian tuotanto muuttuvat hitaasti yli ajan. Koska kiinteiden vaikutusten (FE) -malli tunnistaa kertoimet ainoastaan maakunnan sisäisen ajallisen vaihtelun perusteella, ja tämä vaihtelu on hidasta, mallin estimoinnissa ei saada tilastollisesti merkitseviä tuloksia näille muuttujille. Tämän takia FE-mallinnuksen perusteella ei voida hyväksyä *H2* tai *H3* hypoteeseja poiketen MG-estimoinnin tuloksista. Tämä osoittaa myös mallien välisen eron, ja MG-estimoinnin olevan sopivin mallinnustapa tutkielman lyhyt aikasarjaiselle paneeliaineistolle.

## 7 Johtopäätökset

Tutkielman tavoitteena oli selvittää, toteutuuko EKC-hypoteesi Suomessa maakuntatasolla sekä miten päästötön energiantuotanto ja kaupungistuminen ovat vaikuttaneet päästökehitykseen vuosina 2005–2022. Tutkielman tulokset tukivat asetettuja hypoteeseja ja olivat yhdenmukaisia teorian sekä aiemman empiirisen kirjallisuuden kanssa. Tutkielma vahvistaa EKC-hypoteesin toteutumisen: Suomessa esiintyy käänteinen U:n muotoinen suhde päästöjen ja talouskasvun välillä. Tämä ei kuitenkaan tarkoita, että talouskasvu itsessään automaattisesti riittäisi vähentämään päästöjä. Jotta kasvu voisi tukea päästövähennyksiä, sen on ohjattava yhteiskuntaa kohti kestävää siirtymää.

Kestävä talouskasvu edellyttää aktiivista ympäristöpolitiikkaa, sääntelyä ja teknologista kehitystä, jotka suuntaavat muutosta oikeaan suuntaan. Ilmastonmuutoksen hillintään tarvitaan sekä kansallisia strategisia linjauksia että paikallisia päätöksiä, jotka huomioivat maakuntien erilaiset rakenteet. Jokaiselta kunnalta tulisi vaatia ilmastosuunnitelma, jossa määritellään aluekohtaiset päästövähennystavoitteet ja toimenpiteet niiden saavuttamiseksi. Lisäksi tavoitteiden ja toimenpiteiden toteutumista tulisi seurata säännöllisesti osana ilmastosuunnitelmaa. Koska kuntien ja maakuntien elinkeinorakenteet ja sijainnit eroavat toisistaan, ilmastonmuutoksen hillitsemiseen tarvittavat keinot vaihtelevat alueittain. Hallitus on esittänyt kuntien ilmastosuunnitelmien velvoittavuuden poistamista ilmastolaista sekä ilmastosuunnitelmien määrärahan lakkauttamista, mikä hankaloittaa suuresti Suomen ilmastotavoitteiden saavuttamista.

Päästöttömän energiantuotannon osuuden kasvattaminen energian kokonaiskulutuksesta vähentää päästöjä Suomessa. Ydinvoiman ja uusiutuvan energian myönteinen vaikutus päästöjen vähentämisessä korostaa niiden merkitystä Suomen energiasiirtymässä. Tämä on erityisen ajankohtaista energian saatavuuden ja hinnan ollessa yhteiskunnallisen keskustelun keskiössä. Maakuntien päästövähennysoimissa yksi vaikuttavimmista keinoista olisi muuttaa energiantuotantoa kestävämmäksi.

Uusiutuvan energian investoinneilla ei kuitenkaan välttämättä ole taloudellista hyötyä lyhyellä aikavälillä kunnille, mistä herääkin kysymys olisiko kunnat valmiimpia tekemään muutoksia energiantuotantolaitoksiinsa, jos sitä tuettaisiin taloudellisesti enemmän. Aluekohtaisilla uusiutuvilla ja päästöttömillä energiahankkeilla pystytään suoraan vaikuttamaan Suomen hiilineutraalisuustavoitteiden saavuttamiseen. Teknologista kehitystä tarvittaisiin erityisesti uusiutuvien energiamuotojen varastointiratkaisuihin, jotta puhtaan energian tuotantoa voitaisiin tehostaa ja kapasiteettia kasvattaa.

Kaupungistumisen vaikutus päästöihin on lähtökohtaisesti monitulkintainen, mutta Suomen osalta sillä todettiin olevan päästöjä vähentävä vaikutus. Tämä tulos korostaa kaupunkisuunnittelun ja rakenteellisen kehittämisen merkitystä. Kaupunkialueiden suunnittelussa on tärkeää panostaa hiilineutraaleihin liikennejärjestelmiin, energiatehokkaaseen rakentamiseen ja ympäristöystävällisiin asuinalueisiin. Tutkimuksen tulos osoittaa, että Suomessa on onnistuttu kaupungistumisessa päästöjen näkökulmasta, sillä kaupunkiasumisella tuotetaan vähemmän päästöjä kuin taajaman ulkopuolella. Toisaalta kaupungistuminen voi myös aiheuttaa maankäytön muutoksia, luonnon monimuotoisuuden heikkenemistä ja muita ympäristöhaasteita, jotka eivät välttämättä ilmene suoraan päästölaskelmissa. Siksi kaupungistumisen vaikutuksia tulisi tutkia laajemmin kuin pelkästään päästöjen näkökulmasta.

Jatkotutkimuksissa olisi tärkeää siirtää painopistettä päästöjen tarkastelusta myös luonnon monimuotoisuuden arviointiin, joka jää usein hiilineutraalisuustavoitteiden varjoon. Erityisesti olisi syytä selvittää, miten kaupungistuminen vaikuttaa luonnon monimuotoisuuteen ja millä keinoilla sen suojelua voitaisiin parantaa. Lisäksi olisi hyödyllistä tutkia maakuntien ja kuntien välisiä eroja päästövähennyksissä ja tunnistaa, mitkä elinkeinorakenteeseen ja sijaintiin liittyvät tekijät selittävät näitä eroja kaupungistumisen ja energiantuotannon ohella. Tutkielman johtopäätöksenä voidaan kuitenkin todeta, että Suomessa pitäisi toteuttaa lisää toimia ilmastotavoitteiden saavuttamiseksi, ei pienentää tai siirtää tavoitteita kauemmaksi.

## Lähteet

- Alberti, M. (1999). Urban patterns and environmental performance: What do we know? *Journal of planning education and research*, 19(2), 151–164. <https://doi.org/10.1177/0739456X9901900205>
- Amposah, N., Troldborg, M., Kington, B., Aalders, I. & Hough, R. (2014). Greenhouse gas emissions from renewable energy sources: A review of lifecycle considerations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 39, 461-475. <https://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.087>
- Aydin, M., Degirmenci, T., Gurdal, T. & Yavuz, H. (2023). The role of green innovation in achieving environmental sustainability in European countries: Testing the environmental Kuznets curve hypothesis. *Gondwana Research* 118, 105-116. DOI:10.1016/j.gr.2023.01.013
- Baek, J. (2015). Environmental Kuznets curve for CO<sub>2</sub> emissions: The case of Arctic countries. *Energy Economics* 50, 13–17. doi:10.1016/j.eneco.2015.04.010
- Balado-Naves, R., Baños-Pino, J. & Mayor, M. (2018). Do countries influence neighbouring pollution? A spatial analysis of the EKC for CO<sub>2</sub> emissions. *Energy policy* 123, 266-279. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.08.059>
- Beckerman, W. (1992). Economic development and the environment: Conflict of complementarity? *Policy Research Working Paper Series (No. 961)*. The World Bank.
- Bengochea-Morancho, A. & Martínez-Zarzoso, I. (2004). Pooled mean group estimation of an environmental Kuznets curve for CO<sub>2</sub>. *Economics letters*, 82(1), 121-126. <https://doi.org/10.1016/j.econlet.2003.07.008>
- Bilgili, F., Koçak, E. & Bulut, Ü. (2016). The dynamic impact of renewable energy consumption on CO<sub>2</sub> emissions: A revisited Environmental Kuznets Curve approach. *Renewable & sustainable energy reviews*, 54, 838-845. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.080>
- Brock, W. & Taylor, M. (2010). Green Solow model. *Journal of economic growth (Boston, Mass.)*, 15(2), 127-153. <https://doi.org/10.1007/s10887-010-9051-0>

- Brook, B., Alonso, A., Meneley, D., Misak, J., Bles, T. & van Erp, J. (2014). Why nuclear energy is sustainable and has to be part of the energy mix. *Sustainable Materials and Technologies*, 1-2, 8-16. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2014.11.001>
- Chen, H., Jia, B., & Lau, S. (2008). Sustainable urban form for Chinese compact cities: Challenges of a rapid urbanized economy. *Habitat international*, 32(1), 28-40. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2007.06.005>
- Churchill, S., Inekwe, J., Ivanovski, K. & Smyth, R. (2018). The environmental Kuznets Curve in the OECD: 1870-2014. *Energy Economics* 75 (2018) 389-399. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.09.004>
- Cole, M. A., & Neumayer, E. (2004). Examining the Impact of Demographic Factors on Air Pollution. *Population and environment*, 26(1), 5-21. <https://doi.org/10.1023/b:poen.0000039950.85422.eb>
- Cotrina-Teatino, M. & Marquina-Araujo, J. (2024). Hotelling rule in non-renewable resources: A bibliometric and systematic literature review analysis. *Resources policy*, 98, 105342. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.105342>
- Dinda, S. (2004). Environmental Kuznets Curve Hypothesis: A Survey. *Ecological Economics* 49, 431-455. doi: 10.1016/j.ecolecon.2004.02.011
- Ehrhardt-Martinez, K. (1998). Social Determinants of Deforestation in Developing Countries: A Cross-National Study. *Social forces*, 77(2), 567-586. <https://doi.org/10.1093/sf/77.2.567>
- Ekins, P., Drummond, P., Scamman, D., Paroussos, L. & Keppo, I. (2022). The 1,5°C climate and energy scenarios: impacts on economic growth. *Oxford Open Energy*, 1. <https://doi.org/10.1093/ooenergy/oiac005>
- Energiategallisuus. (2024). Sähköntuotanto maakunnittain 2007–2023. Noudettu 15.11.2024 osoitteesta: <https://energia.fi/wp-content/uploads/2024/12/Sahkontuotanto-maakunnittain-2007-2023.xlsx>
- Esposito, L. (2023). Renewable energy consumption and per capita income: An Empirical analysis in Finland. *Renewable energy* 209, 558-568. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.03.139>

- Forsberg, C. (2009). Sustainability by combining nuclear, fossil, and renewable energy sources. *Progress in nuclear energy (New series)*, 51(1), 192-200. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2008.04.002>
- Georgescu, I. & Kinnunen, J. (2024). Effects of FDI, GDP and energy use on ecological footprint in Finland: An ARDL approach. *World Development Sustainability* 4, 100157. <https://doi.org/10.1016/j.wds.2024.100157>
- Gormus, S. & Aydin, M. (2020). Revisiting the environmental Kuznets curve hypothesis using innovation: New evidence from the top 10 innovative economies. *Environmental Science and Pollution Research* 27, 27904–27913. doi:10.1007/s11356-020-09110-7.
- Grossman, M. & Krueger, A. (1991). Environmental impacts of a North American free trade agreement. *National Bureau of Economic Research Working Paper Serial No. 3914*, 1–57. doi: 10.3386/w3914
- Hassler, J. & Krusell, P. (2018). Environmental macroeconomics: the case of climate change. *Handbook of environmental economics*. Vol 4. 333-394. <https://doi.org/10.1016/bs.hesenv.2018.08.003>
- Haukioja, T. & Kaivo-oja, J. (1998). Talouskasvu ja ympäristö: kestämatöntä vai kestävää kasvua teollisuusmaissa. *Kansantaloudellinen aikakauskirja*, 1, 1998. Noudettu 3.2.2025 osoitteesta: <https://www.taloustieteellinenyhdistys.fi/images/stories/kak/kak11998/kak11998haukioja.pdf>
- Holloway, M. (2021). Innovation dynamics and Policy in the energy sector: Building Global Energy Markets, Institutions, Public Policy, Technology and Culture on the Texan Innovation Example. *Chantilly: Elsevier & Technology*. <https://doi.org/10.1016/C2020-0-01005-4>
- Hotelling, H. (1931). The Economics of Exhaustible Resources. *The Journal of political economy*, 39(2), 137-175. <https://doi.org/10.1086/254195>
- Hubbert, M. (1956). *Nuclear energy and the fossil fuels* (Vol. 95). Houston, TX: Shell Development Company, Exploration and Production Research Division. Noudettu 28.12.2024 osoitteesta

[https://cmappublic.ihmc.us/rid=1176076210219\\_852008754\\_13952/Hubbert1956.pdf](https://cmappublic.ihmc.us/rid=1176076210219_852008754_13952/Hubbert1956.pdf)

- International Energy Agency. (2024). Renewables 2023 Analysis and forecasts to 2028. *IEA, Paris*. Noudettu 19.12.2024 osoitteesta <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>, Licence: CC BY 4.0
- IPCC. (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: [10.59327/IPCC/AR6-9789291691647](https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647).
- Kar, A. (2023). Investigating the environmental Kuznets curve hypothesis for CO<sub>2</sub> emissions in Nordic countries. *International Journal of Environmental Studies* 81(4), 1637–1652. <https://doi.org/10.1080/00207233.2023.2263250>
- Khan, M., Rehman, S., & Al-Sulaiman, F. (2018). A hybrid renewable energy system as a potential energy source for water desalination using reverse osmosis: A review. *Renewable & sustainable energy reviews*, 97, 456-477. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.049>
- Kralova, I. & Sjöblom, J. (2010). Biofuels—Renewable Energy Sources: A Review. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 31(3), 409–425. <https://doi.org/10.1080/01932690903119674>
- Kunnas, J. & Myllyntaus, T. (2007). The environmental Kuznets Curve Hypothesis and Air Pollution in Finland. *Scandinavian Economic History Review* 55(2), 101–127. doi:10.1080/03585520701435970.
- Kuntarahoitus. (2024). Green Impact Report 2023. Noudettu 14.3.2025 osoitteesta: <https://www.kuntarahoitus.fi/wp-content/uploads/2024/04/MuniFin-Green-Impact-Report-2023.pdf>
- Kuznets, S. (1955). Economic growth and income inequality. *American Economic Review* 45: 1– 28.
- Leal, P. & Marques, A. (2022). The evolution of the environmental Kuznets curve hypothesis assessment: A literature review under a critical analysis perspective. *Heliyon*, 8(11), e11521. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11521>

- Liddle, B. (2004). Demographic Dynamics and Per Capita Environmental Impact: Using Panel Regressions and Household Decompositions to Examine Population and Transport. *Population and environment*, 26(1), 23-39. <https://doi.org/10.1023/b:poen.0000039951.37276.f3>
- Lounasheimo, J., Karhinen, S., Grönroos, J., Savolainen, H., Forsberg, T., Munther, J., Petäjä, J. & Pesu, J. (2020). Suomen kuntien kasvihuonekaasupäästöjen laskenta. Alas-mallin menetelmäkuvaus ja laskentojen tuloksia 2005–2018. *Suomen ympäristökeskus*. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-11-5180-4>
- López-Menéndez, A. J., Pérez, R., & Moreno, B. (2014). Environmental costs and renewable energy: Re-visiting the Environmental Kuznets Curve. *Journal of environmental management*, 145, 368-373. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.017>
- Lütkepohl, H. & Xu, F. (2012). The role of the log transformation in forecasting economic variables. *Empirical economics* 42(3), 619-638. <https://doi.org/10.1007/s00181-010-0440-1>
- Mathew, M. (2022). Nuclear energy: A pathway towards mitigation of global warming. *Progress in nuclear energy (New series)*, 143, 104080. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.104080>
- Meadows, D., Randers, J., & Meadows, D. (1972). *The Limits to Growth*. New York: Universe book.
- Metsämuuronen, J. (2009). *Tutkimuksen tekemisen perusteet ihmistieteissä* (4. laitos.). International Methelp.
- Mez, L. (2012). Nuclear energy—Any solution for sustainability and climate protection? *Energy policy*, 48, 56–63. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.04.047>
- Muellner, N., Arnold, N., Gufler, K., Kromp, W. & Renneberg W. (2021). Nuclear energy – The solution to climate change? *Energy policy* 155. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112363>.
- Nguyen, X., Hoang, A., Ölçer, A., & Huynh, T. (2021). Record decline in global CO<sub>2</sub> emissions prompted by COVID-19 pandemic and its implications on future

climate change policies. *Energy sources. Part A, Recovery, utilization, and environmental effects, ahead-of-print(ahead-of-print),1-4.*

<https://doi.org/10.1080/15567036.2021.1879969>

Oleson, K., Monaghan, A., Wilhelmi, O., Barlage, M., Brunzell, N., Feddema, J. & Steinhoff, D. (2013). Interactions between urbanization, heat stress, and climate change. *Climatic change*, 129(3-4), 525-541. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0936-8>

Panayotou, T. (1994). Empirical tests and policy analysis of environmental degradation at different stages of economic development. *Pacific and Asian journal of energy* 4(1), 23-42.

Parikh, J. & Shukla, V. (1995). Urbanization, energy use and greenhouse effects in economic development: Results from a cross-national study of developing countries. *Global environmental change*, 5(2), 87-103. [https://doi.org/10.1016/0959-3780\(95\)00015-G](https://doi.org/10.1016/0959-3780(95)00015-G)

Pesaran, M. & Smith, R. (1995). Estimating long-run relationships from dynamic heterogeneous panels. *Journal of econometrics*, 68(1), 79-113. [https://doi.org/10.1016/0304-4076\(94\)01644-F](https://doi.org/10.1016/0304-4076(94)01644-F)

Pesaran, M., Shin, Y. & Smith, R. (1999). Pooled mean group estimation of dynamic heterogeneous panels. *Journal of the American Statistical Association*, 94(446), 621–634. <https://doi.org/10.1080/01621459.1999.10474156>

Pesaran, M. (2004). General Diagnostic Test for Cross Section Dependence in Panels. *IZA Discussion Paper No. 1240*. <https://doi.org/10.17863/cam.5113>

Pesaran, M. (2007). A simple panel unit root test in the presence of cross-section dependence. *Journal of applied econometrics (Chichester, England)*, 22(2), 265-312. <https://doi.org/10.1002/jae.951>

Pham, N., Huynh, T. & Nasir, M. (2020). Environmental consequences of population, affluence and technological progress for European countries: A Malthusian view. *Journal of environmental management*, 260, 110143. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110143>

- Poumanyong, P. & Kaneko, S. (2010). Does urbanization lead to less energy use and lower CO<sub>2</sub> emissions? A cross-country analysis. *Ecological economics*, 70(2), 434–444. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.09.029>
- Purcel, A. (2020). New insights into the environmental Kuznets curve hypothesis in developing and transition economies: A literature survey. *Environmental economics and policy studies*, 22(4), 585-631. <https://doi.org/10.1007/s10018-020-00272-9>
- Rees, W. (2000). Eco-footprint analysis: Merits and brickbats. *Ecological economics*, 32(3), 371-374. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(99\)00157-3](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(99)00157-3)
- Sarkodie, S., & Strezov, V. (2019). A review on Environmental Kuznets Curve hypothesis using bibliometric and meta-analysis. *The Science of the total environment*, 649, 128-145. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.276>
- Shafik, N. & Bandyopadhyay, S. (1992). Economic growth and environmental quality: Time series and cross-country evidence. *Background paper for the World development report 1992*. Washington, DC: World Bank.
- Siddik, A., Islam, T., Zaman, M. & Hasan, M. (2021). Current status and correlation of fossil fuels consumption and greenhouse gas emissions. *International Journal of Energy, Environment, and Economics*, 28(2), 103-118.
- Solow, R. (1956). A Contribution to the Theory of Economic Growth. *The Quarterly journal of economics*, 70(1), 65-94. <https://doi.org/10.2307/1884513>
- Sovacool, B. (2008). Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: A critical survey. *Energy policy*, 36(8), 2950–2963. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.04.017>
- Sovacool, B., Schmid, P., Stirling, A., Walter, G. & MacKerron, G. (2020). Differences in carbon emissions reduction between countries pursuing renewable electricity versus nuclear power. *Nature energy*, 5(11), 928-935. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-00696-3>
- Stern, D. (2011). The role of energy in economic growth. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1219(1), 26-51. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2010.05921.x>

- Stern, D., Common, M. & Barbier, E. (1996). Economic growth and environmental degradation: a critique of the environmental Kuznets curve. *World Development* 24, 1151-1160. [https://doi.org/10.1016/0305-750X\(96\)00032-0](https://doi.org/10.1016/0305-750X(96)00032-0)
- Suomen Ympäristökeskus. (2022). Maakuntien rooli ja vaikuttavat ilmastotoimet hiilineutraalin Suomen saavuttamiseksi. *Suomen ympäristökeskuksen raportteja 11 / 2022*. ISBN 978-952-11-5469-0
- Suomen Ympäristökeskus. (2024). SYKE- Kuntien ja alueiden khk-päästöt. Noudettu 1.12.2024 osoitteesta: [https://hiilineutraalisuomi.fi/fi-FI/Paastot\\_ja\\_indikaattorit/Kuntien\\_ja\\_alueiden\\_kayttoperusteiset\\_kasvihuone\\_kaasupaastot](https://hiilineutraalisuomi.fi/fi-FI/Paastot_ja_indikaattorit/Kuntien_ja_alueiden_kayttoperusteiset_kasvihuone_kaasupaastot)
- Sørensen, P., & Whitta-Jacobsen, H. (2022). *Introducing advanced macroeconomics: Growth and business cycles* (Third edition.). Oxford University Press.
- Tahvonen, O. & Salo, S. (2001). Economic growth and transitions between renewable and nonrenewable energy resources. *European economic review*, 45(8), 1379–1398. [https://doi.org/10.1016/S0014-2921\(00\)00062-3](https://doi.org/10.1016/S0014-2921(00)00062-3)
- Tilastokeskus. (2024a). Bruttokansantuote asukasta kohden alueittain, vuosittain, 2000–2022. Noudettu 14.10.2024 osoitteesta: [https://pxdata.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin\\_altp/?tablelist=true](https://pxdata.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_altp/?tablelist=true)
- Tilastokeskus. (2024b). Tunnuslukuja väestöstä alueittain, 1990–2023. Noudettu 14.10.2024 osoitteesta: [https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin\\_vaerak/statfin\\_vaerak\\_pxt\\_11ra.px/](https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_vaerak/statfin_vaerak_pxt_11ra.px/)
- Työ- ja elinkeinoministeriö. (2022). Hiilineutraali Suomi 2035 – kansallinen ilmasto- ja energiastrategia. *Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja, energia 2022:53*. Noudettu 11.11.2024 osoitteesta: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-811-0>
- Työ- ja elinkeinoministeriö. (2024). Tiedote: Ministeri Mykkänen johtaa IAEA:n ministerikokousta Wienissä – aiheena ydinalan laajenevat sovellukset. Noudettu 16.1.2025 osoitteesta: <https://tem.fi/-/ministeri-mykkanen-johtaa-iaea-n-ministerikokousta-wienissa-aiheena-ydinalan-laajenevat-sovellukset>

- Urban, F. & Nordensvärd, J. (2018). Low carbon energy transitions in the Nordic countries: Evidence from the environmental Kuznets curve. *Energies* 11(9), 2209 (1–17). doi:10.3390/en11092209
- Valtioneuvosto. (2022). Selvitys: Kestävä kaupungistuminen edellyttää liikkumisen, asumisen ja rakentamisen päästöjen vähentämistä. *Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminta valtioneuvoston viestintäosasto ympäristöministeriö tiedote 5187/2022*. Noudettu 6.1.2025 osoitteesta <https://valtioneuvosto.fi/-/selvitys-kestava-kaupungistuminen-edellyttaa-liikkumisen-asumisen-ja-rakentamisen-paastojen-vahentamista>
- Valtioneuvosto. (2023). Vahva ja välittävä Suomi: Pääministeri Petteri Orpon hallituksen ohjelma 20.6.2023. *Valtioneuvoston julkaisuja 2023:58*. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-763-8>
- Valtioneuvosto. (2024). Perusskenaariot energia- ja ilmastotoimien kokonaisuudelle kohti päästöttömyyttä (PEIKKO). *Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2024:26*. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-219-0>
- Wang, Q., Zhang, F. & Rongrong, L. (2022). Revisiting the environmental kuznets curve hypothesis in 208 counties: The roles of trade openness, human capital, renewable energy and natural resource rent. *Environmental Research* 216(3), 114637. doi:10.1016/j.envres.2022.114637
- Wang, Y., Zhang, X., Kubota, J., Zhu, X. & Lu, G. (2015). A semi-parametric panel data analysis on the urbanization-carbon emissions nexus for OECD countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 704–709. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.046>
- Ympäristöministeriö. (2023). Ilmastovuosikertomus 2023. *Ympäristöministeriön julkaisuja 2023:27*. Noudettu 11.11.2024 osoitteesta <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-361-576-2>
- Yao, S., Zhang, S. & Zhang, X. (2019). Renewable energy, carbon emission and economic growth: A revised environmental Kuznets Curve perspective. *Journal of cleaner production*, 235, 1338-1352. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.07.069>

York, R. (2007). Demographic trends and energy consumption in European Union Nations, 1960–2025. *Social science research*, 36(3), 855-872.  
<https://doi.org/10.1016/j.ssresearch.2006.06.007>