



AEI-raportti

Kohti päästötöntä liikennettä Helsingissä

**Skenaariotarkastelu autokannan sähköistymisestä ja tarkastelu CO2-
päästöttömän henkilöautoliikenteen alueesta 2035**

Sisällysluettelo

Tausta ja empiirisen työn päätulokset	3
CO₂-päästöttömän alueen periaatteellista tarkastelua	5
Kvantitatiivinen tarkastelu	6
Kuvaileva analyysi Helsingin henkilö- ja pakettiautokannasta	6
Autokannan kehityksen ennuste	10
Kuvaileva analyysi autojen haltijoista Helsingissä	14
Lyhyesti kansainvälisistä verrokeista	20
Lähteet	22

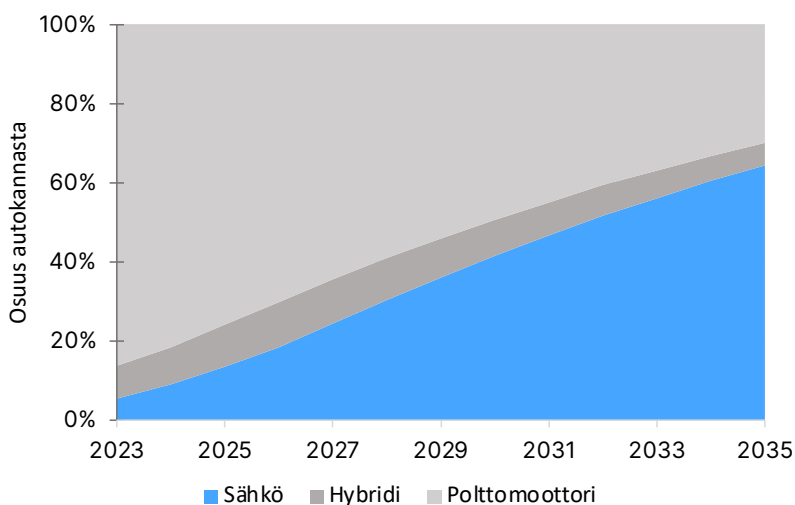
Tausta ja empiirisen työn päätulokset

1. ”Helsingin kaupungin tavoitteena on olla hiilineutraali vuonna 2030, nollata päästöt vuoteen 2040 mennessä ja olla hiilnegatiivinen sen jälkeen.”¹ Tavoitteen saavuttaminen edellyttää nopeaa päästöjen vähentämistä kaikilla sektoreilla. Liikennesektorin osalta tavoitellaan 69 % päästöjen vähentämistä 2005 vuoden tasosta vuoteen 2030 mennessä. 2040 tavoite on nollapäästöinen liikenne. Liikenteen tapauksessa tavoite on rajattu Helsingin kaupungin rajojen sisällä tapahtuvaan liikenteeseen.
2. Vaikka kuluttajilla ja yrityksillä on muitakin sopeutumistapoja, on selvää, että tavoitteen saavuttaminen nojaa voimakkaasti alueen henkilöautokannan sähköistymiseen. Päätöksenteon pohjaksi Helsingin kaupunki on päättänyt selvittää erilaisten keinojen toimivuutta ja vaikutuksia. Tässä työssä tarkastellaan millaisia vaikutuksia olisi koko Helsingin kaupungin maantieteellisen alueen määrittelyllä henkilöautojen osalta CO₂-päästöttömäksi vuonna 2035. Käytännössä tämä tarkoittaisi CO₂-päästöjä tuottavien henkilöautojen käytön kieltämistä kyseisellä alueella.
3. Tässä selvityksessä Aalto-yliopiston taloustieteen työryhmä² tarkastelee edellä kuvattua kieltoa empiirisesti ja periaatteellisesti. Kaupungin asettamien päästövähennystavoitteiden kannalta kiinnostavaa on myös selvittää, millaisia vaikutuksia tällaisesta kiellosta olisi vuoteen 2030 mennessä, mikäli asiasta voitaisiin päättää ja tiedottaa jo hyvissä ajoin ennen sen voimaantuloa.

Autokannan kehittymisen ennuste

4. Sähköautojen osuus tarkasteluvuosina 2030 ja 2035 on herkkä kahdelle tekijälle:
 - Sähköautojen osuus Helsingissä eri vuosina käyttöön otetuista uusista ja käytetyistä autoista.
 - Autokannan uusiutumisenopeus, eli kuinka paljon uusia ja uudehkoja käytettyjä autoja Helsingissä otetaan käyttöön
5. Autokannan kehittymisen ennusteesta nähdään, että tilanteessa, jossa autokannan uusiutumisenopeus säilyy ennallaan ja uusia ja käytettyjä sähköautoja alkaa virrata Helsinkiin asetettujen oletusten mukaisesti³, päästään 65 % sähköautojen osuuteen autokannasta vuonna 2035 ja 42 % osuuteen vuonna 2030.
6. Ennusteesta nähdään myös, että 90 prosentin sähköautojen osuuteen autokannasta vuonna 2035 pääseminen edellyttää vaihtoehtoisesti Helsinkiin tulevien uusien ja käytettyjen autojen käyttövoimateknologioiden osuuksien nykyistä selvästi nopeampaa muuttumista sähköautoiksi tai autokannan uusiutumisenopeuden rivakkaa kasvua. Maltillisemmat muutokset riittävät, mikäli nämä muutokset tapahtuisivat yhtä aikaa.

Käyttövoimien osuus autokannasta, perusskenaario



1 <https://helsinginilmastoteot.fi/city-act/helsingin-ilmastotavoitteet-ja-seuranta/>

2 Raportin kirjoittaneeseen Aalto-yliopiston taloustieteen työryhmään ovat kuuluneet professori Matti Liskin johdolla, Aksel Hermanson, Janne Laitila, Oskari Nokso-Koivisto, Eero Nurmi ja William Ogden.

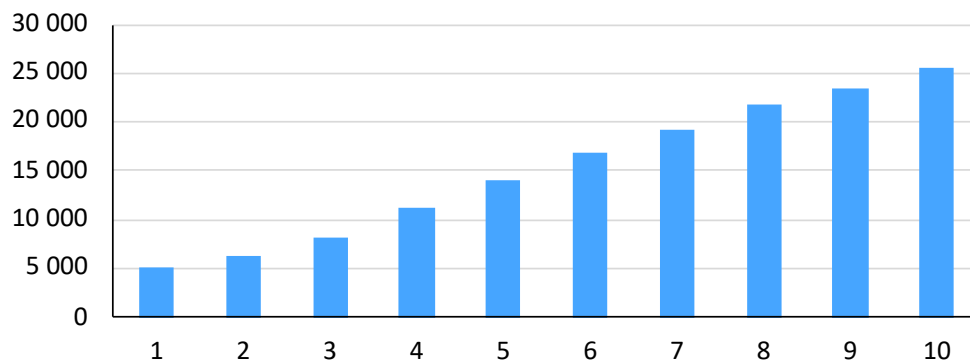
3 Oletukset avattu raportissa jaksossa Autokannan kehityksen ennuste. Yhtenä perusskenaarion oletuksena on, että kaikki vuonna 2028 ja myöhemmin Helsinkiin hankittavat uudet autot ovat täyssähköautoja.

7. Jos ennusteessa käytettyjä oletuksia dramaattisempia muutoksia sähköautojen osuuksissa Helsinkiin tuotavista autoista tai autokannan uusiutumisessa ei tapahdu, tavoitteeseen pääsemiseksi vaaditaan uutta ohjausta, kuten esimerkiksi tämän selvityksen tarkastelemaa päätöstä CO₂-päästöttömän alueen käyttöönotosta.
8. Yksinkertaistetusti voidaan sanoa, että CO₂-päästöjä tuottavien autojen kieltö vuonna 2035 vaikuttaa suoraan ainoastaan henkilöihin, joilla on polttomoottoriauto ja jotka eivät ilman kieltoa olisi vaihtamassa polttomoottoriautoaan sähköautoon ennen vuotta 2035. Näin ollen ennusteesta voidaan suoraan nähdä, kuinka suureen joukkoon helsinkiläisistä kieltö ei vaikuta. Ennusteen avulla voidaan tarkastella myös sitä, kuinka suureen joukkoon sääntely vaikuttaa, eli niihin, jotka eivät olisi ilman kieltoa vaihtamassa autoaan sähköiseksi.
9. Helsingin laajuinen CO₂-päästötön alue vaikuttaa markkinoiden kautta kaikkiin autonomistajiin Suomessa. Sähköautojen kysynnän kasvaessa Suomessa olevien sähköautojen hinnat nousevat ja polttomoottoriautojen hyödynnettävyyden vähentyessä polttomoottoriautojen hinnat laskevat. Tässä työssä näitä vaikutuksia ei kvantifioitu.

Tulonjako

10. Datasta nähdään, että suurituloisilla on ratkaisevasti enemmän autoja kuin pienituloisilla. Datasta nähdään myös, että suurituloiset ajavat selvästi uudemmilla autoilla kuin pienituloiset. Myös sähköautot Helsingissä ovat tulleet voimakkaasti painottuen ylempiin tuloluokkiin.
11. Analyysin perusteella näyttää siltä, että tarkasteltu kieltö vaikuttaisi hyvätuloisten joukossa vain pieneen osaan, koska he näyttävät joka tapauksessa vaihtavan sähköautoon ennen määräaikaa. Kiellon taloudelliset vaikutukset kohdistuisivat todennäköisesti erityisesti pienituloisiin autoilijoihin, joita on kuitenkin varsin pieni joukko, koska hyvin pienellä osalla pienituloisista kotitalouksista on auto.

Helsingin autolliset kotitaloudet tulokymmenyksittäin



Vaikutukset henkilöautomarkkinoihin Helsingin ulkopuolella

12. Helsingin laajuisen CO₂-päästöttömän alueen käyttöönotto vaikuttaisi Helsingin ulkopuolella suoraan ja automarkkinoiden kautta. Suora vaikutus kohdistuisi niihin Helsingin ulkopuolisiin ihmisiin, jotka autoilevat Helsingin alueella. Heille syntyisi kannuste vaihtaa sähköautoon tai sopeutua muulla tavoin kieltoon.
13. Epäsuorasti Helsingin kieltö vaikuttaisi muun Suomen autokantaan automarkkinoiden välityksellä. Helsingissä käytössä olleet polttomoottoriautot siirtyisivät todennäköisesti käyttöön Helsingin ulkopuolelle ajettavaksi, niiltä osin kuin kyseisillä autoilla on vielä käyttöikä jäljellä. On kuitenkin varsin todennäköistä, että nämä autot syrjäyttäisivät muualta Suomesta heikompiuntoisia ja todennäköisesti enemmän päästäviä vanhempia autoja, jolloin tämänkin mekanismin kautta kiellon nettovaikutus päästöihin kansallisesti olisi myönteinen. Lopulta Helsingin autokannan nopeampi sähköistäminen todennäköisesti nopeuttaisi koko Suomen autokannan sähköistymistä.

CO₂-päästöttömän alueen periaatteellista tarkastelua

Onko CO₂-päästöjä tuottavien autojen kieltäminen 2035 tehokas sääntelykeino?

14. Sääntelyinstrumentit voidaan karkeasti jakaa kahteen kategoriaan, **markkinainstrumentteihin** ja **valintojen suoraan ohjaamiseen**.⁴ Markkinainstrumentit jättävät avoimeksi sen, mitä eri keinoja kuluttajat voivat käyttää sopeutuakseen. Valintojen suorassa ohjauksessa sääntelijä päättää sopeutumiskeinon.
15. Markkinainstrumentteja käyttämällä sääntelijän asettamaan tavoitteeseen päästään lähes kaikissa tilanteissa pienemmin kustannuksin kuin valintojen suoralla ohjaamisella. Tämä johtuu siitä, että kuluttajilla ja yrityksillä on yleensä itsellään paras tieto itselleen parhaista sopeutumiskeinoista. Markkinainstrumentti ohjaa kutakin toimijaa valitsemaan juuri itselleen tehokkaimman tavan sopeutua.
16. **CO₂-päästöjä tuottavien autojen kieltäminen saattaa vaikuttaa valintojen suoralla ohjaamiselta. Se on kuitenkin lähes markkinaehtoinen sääntelyinstrumentti, jos kuluttajilla on riittävästi aikaa sopeutua kieltoon.** Päästökauppakin on lopulta päästöjen kieltäminen, jos sillä ohjataan aikaa myöden päästöt nolliin. Tehokkuuden näkökulmasta on yhdenmukaista ohjataanko päästöt nolliin kiellolla, joka tulee voimaan 2035 vaiko päästökaupalla, joka leikkaa vuosittaisia päästöjä siten, että vuonna 2035 ei enää lasketa liikkeelle päästölupia. Kumpikaan instrumentti ei ota kantaa kuluttajien tai yritysten sopeutumiskeinoihin. Instrumentti tuottaa sitä pienemmät kustannukset, mitä pidempään kuluttajille annetaan aikaa sopeutua kieltoon.
17. Sähköautomurros on maailmanlaajuinen. Yhä suurempi osa ensirekisteröinneistä on sähköautoja. Nyt näyttää selvältä, että kohtuullisen lyhyellä aikavälillä siirrymme joka tapauksessa käyttämään autoja, jotka eivät ajon aikana tuota päästöjä. Sääntelyn kustannus tulee erityisesti siitä, että olemassa oleva pääomakanta (erityisesti autot, mutta myös esimerkiksi asuinpaikan valinnan kautta asunnot ym.) joutuu sopeutumaan nopeammin kuin ilman sääntelyä tapahtuisi.

Sopeutuminen

18. Markkinainstrumentteja käytettäessä kuluttajilla ja yrityksillä on yleensä useita erilaisia keinoja sopeutua tilanteeseen. Ajonaikaisten päästöjen vähentämiseen ja lopulta ajon aikaisten päästöjen lopettamiseen kuluttajat voivat sopeutua joko vähentämällä liikkumista tai vaihtamalla liikkumismuoto vähäpäästöiseen tai päästöttömään. Lopulta kyse voi olla esimerkiksi niin asuinpaikan kuin työpaikan valinnasta tai esimerkiksi polttomoottoriautoilun vaihtaminen joukkoliikenteeseen tai polttomoottoriauton vaihtamisesta sähköautoon.
19. On olemassa paljon empiiristä tutkimusnäyttöä siitä, että kuluttajat ja yritykset tekevät omasta näkökulmastaan taloudellisesti järkeviä päätöksiä. Tämä tukee johtopäätöstä, että voimme luottaa kuluttajien osaavan ennakoita kiellon vaikutuksia. Jos CO₂-päästöttömästä alueesta tiedotetaan riittävän monta vuotta ennen sen täytäntöönpanoa, kuluttajat ja yritykset valitsevat omasta näkökulmastaan järkevän tavan sopeutua ja siirtymä tapahtuu tehokkaasti. Sopeutuminen pitää sisällään esimerkiksi sen, missä kuluttaja päättää asua tai milloin esimerkiksi hankkii sähköauton, vai hankkiiko sähköautoa ollenkaan. Miten käytettävissä oleva aika sopeutumiselle vaikuttaa kustannuksiin, on empiirinen kysymys, jota tarkastelemme kappaleessa autojen kierron nopeudesta ja skenaariotarkasteluissa.

Vaikutusmekanismit

20. Keskeinen onnistuneen sääntelyn ominaisuus on sääntelijän ja sääntelyn uskottavuus. Jos kaikki toimijat uskovat kaupungin mahdolliseen päätökseen vuonna 2035 voimaan tulevasta Helsingin laajuisesta CO₂-päästöttömästä alueesta johtavan tosiasiallisesti siihen, että vuodesta 2035 eteenpäin kukaan ei enää voi ajaa Helsingissä CO₂-päästöjä tuottavalla henkilöautolla, käynnistyy eri toimijoiden sopeutuminen tähän uuteen tulevaisuuden tilanteeseen välittömästi. Jos taas kaupungin ilmoitusta ei pidetä uskottavana, sopeutuminen ei myöskään käynnisty. Kaupunki voi lisätä päätöksen uskottavuutta esimerkiksi vaiheittaisella käyttöönotolla.
21. Ilmoittamalla CO₂-päästöttömästä alueesta Helsingin kaupunki oletettavasti sitoutuu toimiin, joita tarvitaan polttomoottoriautoista irtautumiseen, kuten sähköautojen latausinfrastruktuurin nyt suunniteltua nopeampaan toteuttamiseen.

⁴ Markkinainstrumentista ja valintojen suorasta ohjaamisesta liikenteen sääntelyssä on kirjoitettu laajemmin AEI-raportissa: Kohti hiiletöntä liikennettä – ehdotus mekanismiksi http://www.aalto.fi/wp-content/uploads/2019/10/AEI-raportti_Kohti-hiilet%C3%B6nt%C3%A4-liikennett%C3%A4.pdf

Tulonjako

22. Sääntelyn muutos vaikuttaa ihmisten väliseen tulonjakoon. Vaikutukset tulonjakoon näkyvät varallisuuserien arvoissa ja mahdollisesti suorina menoina.
23. Sopeutuminen on helppoa sellaisille, jotka eivät tälläkään hetkellä omista autoa ja kotitalouden elämä on järjestetty toimimaan ilman omaa autoa. Tälle joukolle CO₂-päästöjä tuottavien autojen kieltä ei todennäköisesti aiheuta uusia kustannuksia. Tilanne voi jopa parantua, jos toimenpiteen rinnalla edistetään joukkoliikenteen toimintaa. Kielto ei aiheuta toimenpiteitä myöskään sellaiselle kotitaloudelle, jolla on jo käytössään sähköauto.
24. Suurimmat kielteiset taloudelliset vaikutukset toimenpiteestä tulevat sellaiselle kotitaloudelle, jolla on polttomoottoriauto ja jonka erilaiset elämänvalinnat on järjestetty niin, että polttomoottoriautosta irrottautuminen on vaikeaa. Yleensä suurituloisilla on paljon erilaisia vaihtoehtoja uuteen sääntelyyn sopeutumiseen. Niinpä erityinen huomio kannattaakin kiinnittää pienituloisiin polttomoottoriauton omistaviin kotitalouksiin.

Kvantitatiivinen tarkastelu

Data ja metodi

25. Tarkastelu on tehty Tilastokeskuksen tutkijapalvelussa pseudonymisoiduilla yksilötason aineistoilla. Aineistoina on ollut Tilastokeskuksen vuoden 2021 FOLK henkilötietojen pitkäaikaaineisto⁵, johon on yksilö- ja ajoneuvotasolla yhdistetty Traficomilta saatu kesäkuun 2023 ajoneuvorekisteri ja sitä täydentävä vuoden 2016 AVERO-moduuli⁶.
26. FOLK aineistosta on saatu analyysissä käytetyt henkilöä ja kotitaloutta kuvaavat muuttujat kuten tulotiedot, asuinpaikkaan ja ammattiin liittyvät tiedot. Traficomien ajoneuvorekisteristä on saatu vuosittaiset tiedot ajoneuvon käyttövoimasta, vuosimallista ja omistus- sekä haltijatiedot. AVERO-moduulista on saatu analyysiä varten tiedot vuonna 2016 kullakin autolla ajetuista kilometreistä.
27. Selvityksessä tehdyn kuvailevan analyysin lisäksi on tehty ennuste, joka perustuu Markov-ketjuun, jossa autokannan eri osiin tulee uusia ja eri ikäisiä käytettyjä autoja viime vuosina toteutuneiden määrien mukaisesti. Menetelmä on puhdas kirjanpitoharjoitus, jossa ekstrapoloidaan autokannan kehitystä tulevaisuuteen. Autonomistajien käyttäytymistä ei mallinnetta. Etuna on läpinäkyvyys ja se, että autokannan jakaumasta pidetään tarkkaa lukua.

Kuvaileva analyysi Helsingin henkilö- ja pakettiautokannasta

Henkilö- ja pakettiautot Helsingissä

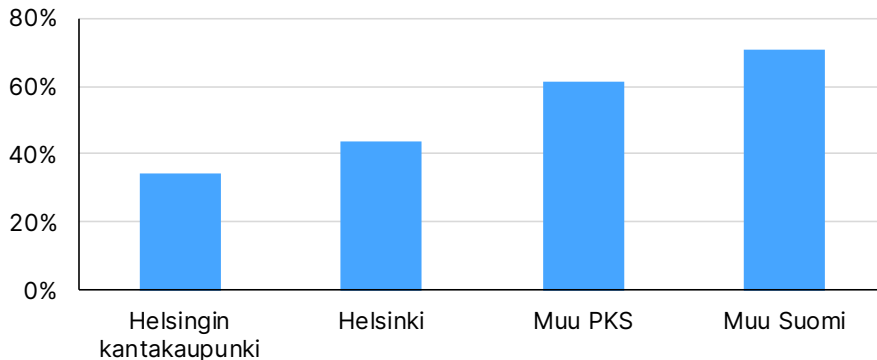
28. Vuoden 2022 lopussa haltija- ja omistajatiedon⁷ perusteella Helsinkiin kytkeytyviä henkilöautoja oli 210 000, joista neljännes on kantakaupungissa asuvien hallinnassa. Muualla pääkaupunkiseudulla autoja oli 2022 lopussa 240 000 kappaletta. Autojen määrä näillä alueilla on ollut hienoisessa kasvussa, joka selittyy pitkälti asukkaiden määrän kasvulla. Asukasmäärään suhteutettuna autojen määrä on hienoisessa laskussa.
29. Helsingissä ja erityisesti kantakaupungissa suurin osa kotitalouksista on sellaisia, joilla ei ole autoa. Näihin kotitalouksiin CO₂-päästöttömän alueen vaikutukset olisivat hyvin vähäiset. Helsingin ulkopuolella tilanne on toinen. Niiltä osin kuin nämä autoilijat käyvät Helsingissä autoillaan, toimenpide vaikuttaa suoraan suurempaan osaan kotitalouksista.

⁵ <https://aineistokatalogi.fi/catalog/studies/a6946178-3c4d-432e-b4bd-7b32b80932af>

⁶ <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161230/71-2018-Liikentee-seen%20ja%20autoiluun%20liittyvien%20verojen%20simulointimallin%20rakentaminen.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

⁷ Analyysissä auton käyttäjän määrittelyssä on hyödynnetty ensisijaisesti auton haltijatietoa ja tapauksissa, joissa sitä ei ole ollut saatavilla, on käytetty omistajatietoa. Myöhemmin tekstissä viittaukset omistajaan tai haltijaan tarkoittavat tätä.

Autollisten kotitalouksien osuus

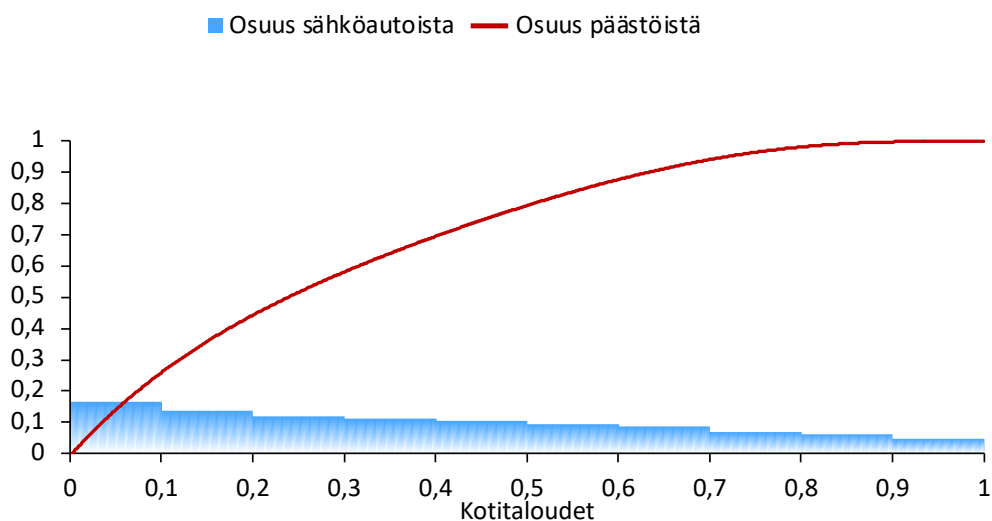


Päästöjen jakautuminen Helsingin autokannassa

30. Autot synnyttävät päästöjä epätasaisesti. Aiemmasta analysistä⁸ tiedämme, että erot autojen tuottamissa päästöissä ovat johtuneet enimmäkseen eroista ajomäärissä eivätkä niinkään eroista ajoneuvon kilometrikohtaisista päästöistä. Sähköautojen tultua markkinoille ajoneuvoteknologian merkitys on kasvanut.
31. Seuraava kuvio esittää helsinkiläisten kotitalouksien autoilusta aiheutuneiden hiilidioksidipäästöjen jakautumista. Haltijat on järjestetty siten, että eniten päästöjä aiheuttanut kotitalous (autojen ominaispäästöt kerrottuna ajetuilla kilometreillä) on kuvassa vaaka-akselilla vasemmalla ja vähiten päästöjä aiheuttanut oikealla. Käyrä on kertymäfunktio, jossa kokonaispäästöt on laskettu yhteen siten, että vaaka-akselilta voi lukea auton kotitalouksien osuuden ja pystyakselilta voi lukea näiden kotitalouksien yhteenlasketut päästöt. Kuvasta nähdään, että puolet (0.5 x-akselilla) kotitalouksista on tuottanut 80 % (0.8 y-akselilla) päästöistä. Kun tähdätään ajon aikaisten päästöjen vähentämiseen, ei siis ole yhdentekevää, millaiset kotitaloudet päästöttömän auton hankkivat.
32. Vaaka-akselin yläpuolella olevista palkeista näemme, miten Helsinkiin hankitut sähköautot sijoittuvat autokannassa. Siniset palkit summautuvat sataan prosenttiin. Vasemmanpuoleisimmasta palkista nähdään, että yli 15 prosenttia sähköautoista on hankittu eniten päästöjä aiheuttavaan kotitalouksien kymmenykseen ja äärimmäisenä oikealla olevasta palkista näemme, että vain 5 prosenttia sähköautoista on hankittu vähiten päästöjä tuottaville kotitalouksille. Sähköautot painottuvat siis korvaamaan paljon kuluttavia autoja, mikä on toki luonnollista, sillä sähköauton hankinta on taloudellisesti kannattavinta niissä tapauksissa, joissa autolla ajetaan paljon.

⁸ http://www.aalto.fi/wp-content/uploads/2020/10/AEI_raportti.pdf

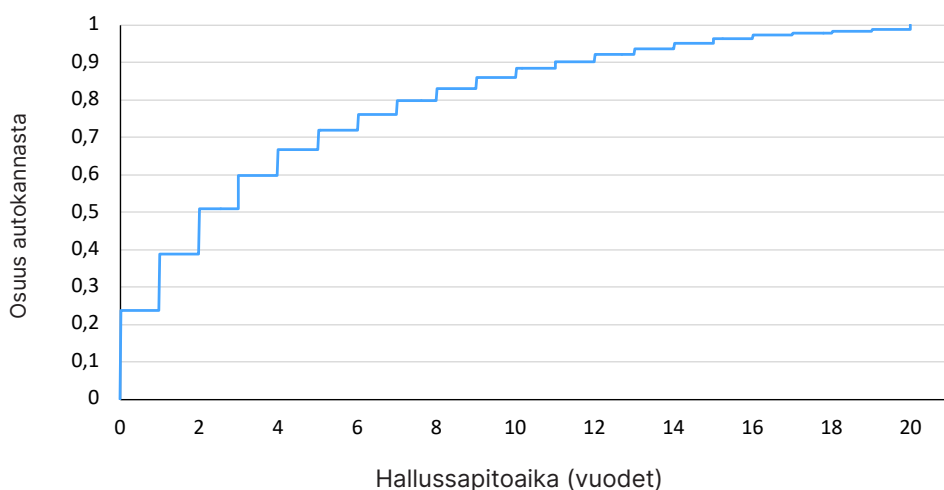
Kotitalouksien omistusosuus sähköautokannasta (2021) ja heidän tuottamat liikennepäästöt (2016, kertymäfunktio)



Autojen kierron nopeus

33. Kuluttajien autonvaihtosykleissä on kuluttajien välillä paljon vaihtelua. Osa kuluttajista vaihtaa autoa parin vuoden välein, kun osa taas pitää samaa autoa yli kymmenen vuotta. Kiellolle annetun sopeutumisajan arvioimisen näkökulmasta on hyödyllistä suhteuttaa sopeutumisajaa autojen normaaleihin vaihtosykleihin.
34. Seuraavassa kuvassa on tarkasteltu autojen kiertoa Helsingissä. Kuvassa on läpileikkaus vuoden 2021 lopusta, jossa vaaka-akselilta voi lukea auton pitoajan ja pystyakselilta autojen osuuden, joka on vaihtanut omistajansa ennen vaaka-akselin määrittämää aikaa.
35. Helsingissä autojen kierto on nopeaa. Tämä näkyy muun muassa siinä, että 50 % Helsingin autoista on ollut omistajallaan hallussa alle kaksi vuotta. Jos Helsingin laajuinen CO₂-päästötön alue asetettaisiin voimaan vuonna 2035, vaihtaisi yli 90 % asukkaista autoa vähintään kerran ja suuri osa useita kertoja määrävuoteen mennessä joka tapauksessa.
36. On huomattava, että tässä tarkastelussa tarkastellaan ainoastaan autojen kiertonopeutta, eikä esimerkiksi sitä mihin käyttövoimiin autoja vaihdetaan, mikä on tietysti kaupungin hiilineutraaliustavoitteen näkökulmasta kriittistä.

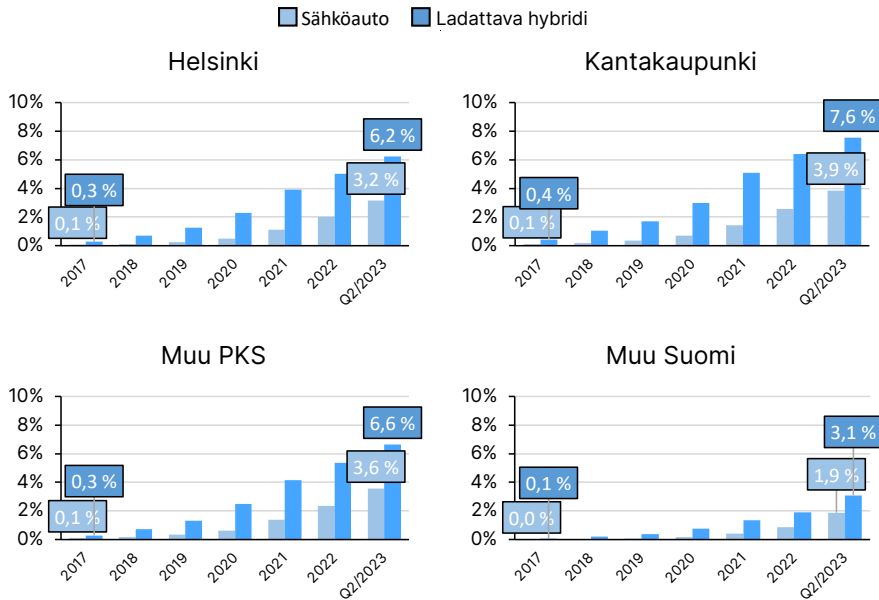
Omistusautojen hallussapitoajan kertymäfunktio vuosissa, 31.12.2021



Sähköautojen tulo Helsinkiin ja muualle Suomeen

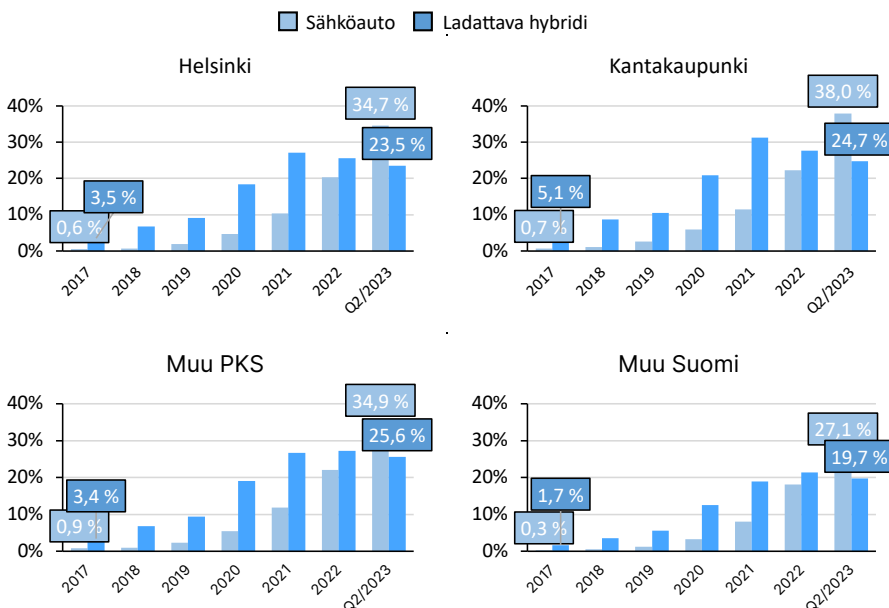
37. Sähköautot ovat yleistyneet Suomessa nopeasti. Seuraassa kuviossa esitetään täyssähköautojen ja ladattavien hybridien osuudet autokannasta eri puolella maata eri vuosina. Kun vuonna 2017 Helsingin autokannasta vain 0,1% oli täyssähköisiä, niin vuonna vuoden 2023 kesäkuun lopussa täyssähköautoja oli jo 3,2 % koko autokannasta. Kantakaupungissa muutos on ollut vielä nopeampi. Pääkaupunkiseudun ulkopuolella autokanta sähköistyy selvästi Helsinkiä ja koko pääkaupunkiseutua hitaammin.

Sähköautojen osuus autokannasta alueittain



38. Helsinkiin tulee niin uusia kuin käytettyjäkin sähköautoja. Näiden sähköautojen ensirekisteröintien⁹ osalta kehitys on nopeaa. Seuraavassa kuviossa on tarkasteltu sähköautojen ensirekisteröintejä alueittain. Vuoden 2023 ensimmäisellä puoliskolla Helsingissä lähes 50 % ensirekisteröinneistä oli joko täyssähköautoja tai ladattavia hybridejä. Toinen merkittävä huomio on, että ensi kertaa sähköautot ohittivat ladattavat hybridit rekisteröintien määrässä.

Sähköautojen osuus ensirekisteröinneistä alueittain



⁹ Ensirekisteröidyiksi lasketaan ensimmäistä kertaa Suomessa rekisteröidyt uudet ja käytetyt autot.

Autokannan kehityksen ennuste

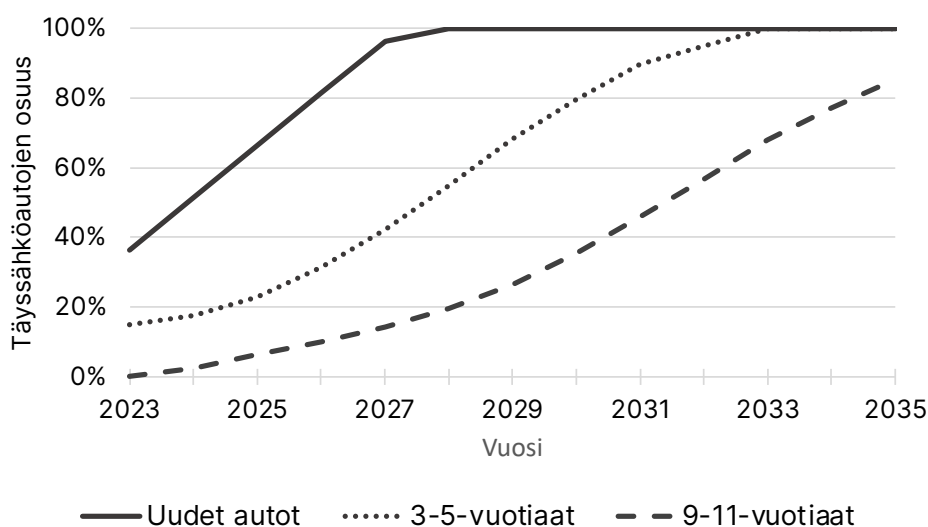
Ennustetyökalu

39. Olemassa olevaa aineistoa hyödyntämällä olemme tehneet yksinkertaisen ja läpinäkyvän ennustetyökalun, jota hyödyntämällä voidaan tarkastella, millaisia muutoksia on tapahtuttava, jotta asetetut päästö tavoitteet voidaan saavuttaa.
40. Ennustetyökalussa on pidetty ennallaan kaksi tekijää:
- Helsingin autokannan koko säilyy ennallaan.
 - Ihmiset ostavat saman ikäluokan auton, jonka he ovat ennenkin ostaneet.
41. Ennustetyökalulla muutetaan kahta tekijää:
- Sähköautojen osuus uusista ja eri ikäisistä käytetyistä Helsinkiin tulevista¹⁰ autoista tulevina vuosina.
 - Helsinkiin uutena ja eri ikäisenä käytettynä tuotavien autojen määrä (ja vastaavasti poistuma autokannan koon säilyessä vakiona)
42. Ennustetyökaluun yksityiskohtineen ja oletuksineen voi tutustua tarkemmin ja sen voi ladata täältä: <https://tinyurl.com/autoennustemalli>

Ensimmäinen skenaario (perusskenaario)

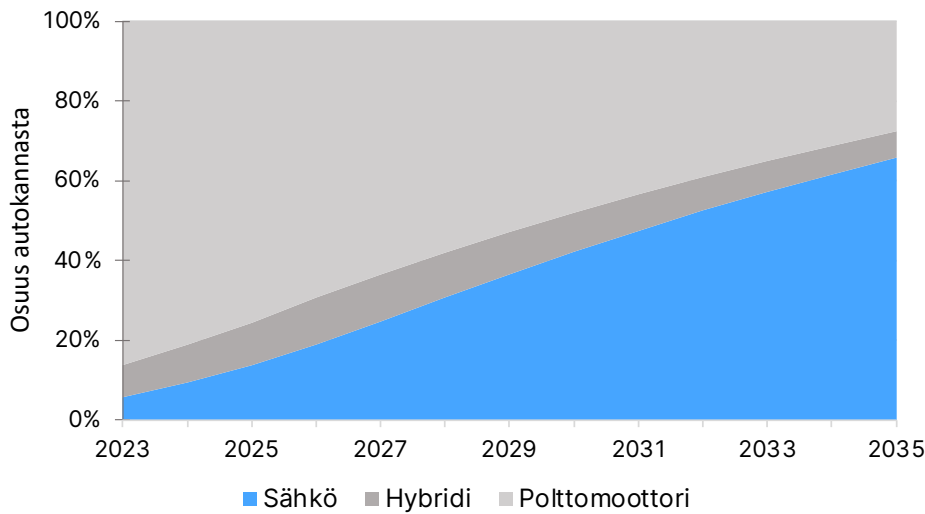
43. Ensimmäisessä skenaariossa oletettu, että
- autokannan uusiutumismuutos vastaa historiallista uusiutumista ja
 - kaikki Helsinkiin uutena tuodut autot ovat vuodesta 2028 lähtien täyssähköautoja, ikäryhmässä 0-2 vuotta tuodut käytetyt autot ovat ennusteessa kaikki sähköisiä vuodesta 2031 ja ikäryhmässä 3-5 -vuotiaat autot näin on vuonna 2034. Ensimmäisessä kuvassa näkyvät tarkemmin skenaariossa käytetyt oletukset Helsinkiin saapuvien autojen täyssähköautojen osuuksista eri vuosina eri ikäryhmissä.
44. Tällöin päästään tulokseen, jossa täyssähköautoja olisi vuonna 2035 vasta 65 % Helsingin autokannasta. CO₂-päästötön alue vaikuttaisi siinä tapauksessa 35 prosenttiin autoista.
45. Jälkimmäisessä kuvassa olemme tarkastelleet, miten polttomoottoriautot (ml. hybridi) ovat jakautuneet tuloluokkien kesken vuosina 2023 ja 2035.

Perusskenaario - Helsingissä käyttöön otettavat täyssähköautot

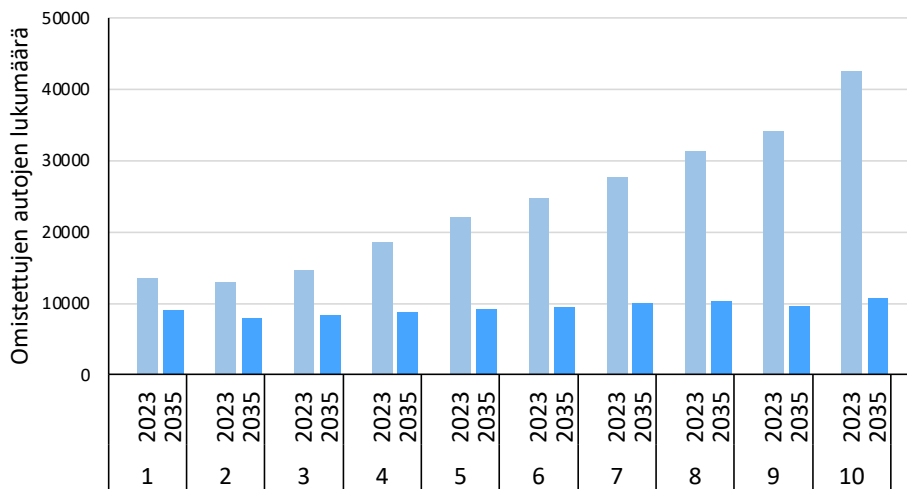


¹⁰ Helsinkiin tulee autoja niin uusina kuin eri ikäisinä käytettyinä autoina ulkomailta ja Suomen sisältä. Uutena tuodut ja käytettyinä ulkomailta suoraan Helsinkiin ostetut autot luokitellaan ensirekisteröidyiksi. Muualta Suomesta Helsinkiin tuotuja autoja ei luokitella ensirekisteröidyiksi.

Perusskenaario - Käyttövoimien osuus autokannasta



Polttomoottoriautojen omistusjakauma kotitalouksien tulokymmenysten mukaan Helsingissä vuosina 2023 ja 2035¹¹

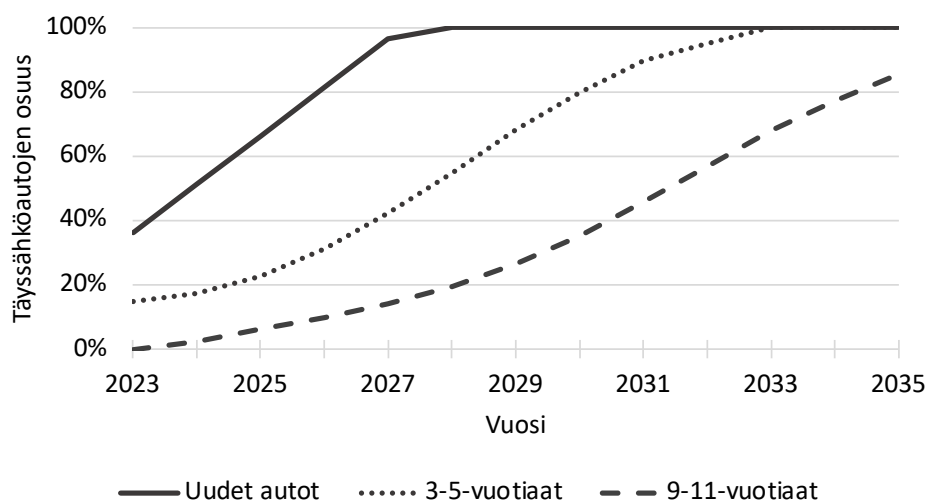


Toinen skenaario

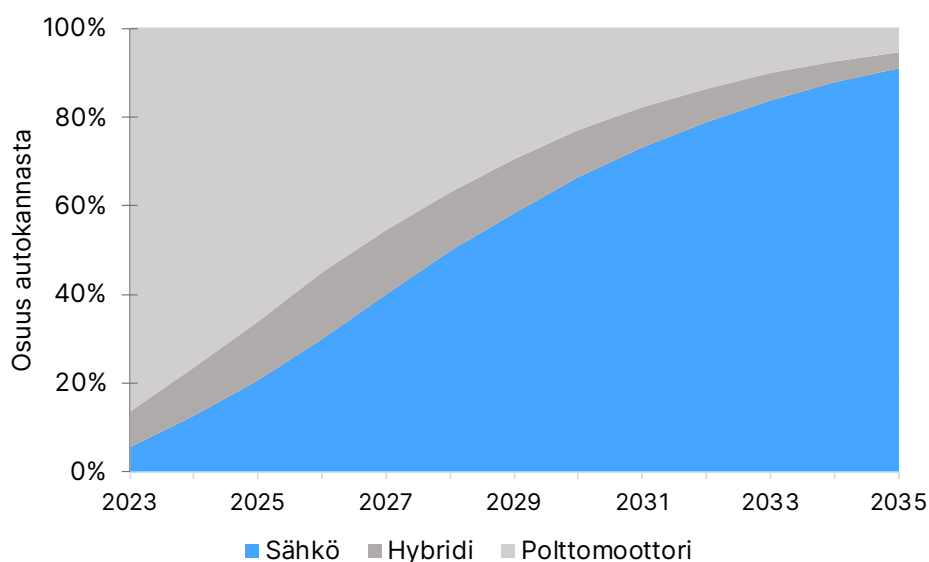
46. Tässä skenaariossa on pidetty Helsinkiin tulevien sähköautojen osuus eri ikäisissä au-toissa perusskenaarion tasolla, mutta muutettu autokannan läpivirtausta ja nuorentamista Helsingissä. On tarkasteltu sitä, kuinka paljon uusien ja uudehkojen autojen tuonnin Helsinkiin pitäisi kasvaa, jotta 90 % sähköautojen osuuteen voitaisiin päästä vuonna 2035.
47. Tarkastelusta nähdään, että jos sähköautojen osuus saadaan nostettua 2035 90 prosenttiin tilanteessa, jossa uusien autojen tuonti Helsinkiin kasvaa 100 %, 0-2 -vuotiaiden kasvaa 25 %, 12-14 -vuotiaiden vähenee 50 %, 15-17 -vuotiaiden vähenee 75 % ja sitä vanhempia autoja ei Helsinkiin enää tuoda. Skenaariossa autojen tuonnin on asetettu kasvamaan nykytilasta 54400 → 60200. koska autokanta on skenaariossa säädetty vakioksi, ylimääräisten autojen on oletettu poistuvan vanhimmista lähtien.

¹¹ Automäärät eivät ole suoraan verrattavissa autollisten kotitalouksien lukumääriin, johtuen käytetyn autokannan määritelmästä sekä automistuksen intensiivisten ja ekstensiivisten marginaalien eroista

Skenaario 2 - Helsingissä käyttöön otettavat täyssähköautot



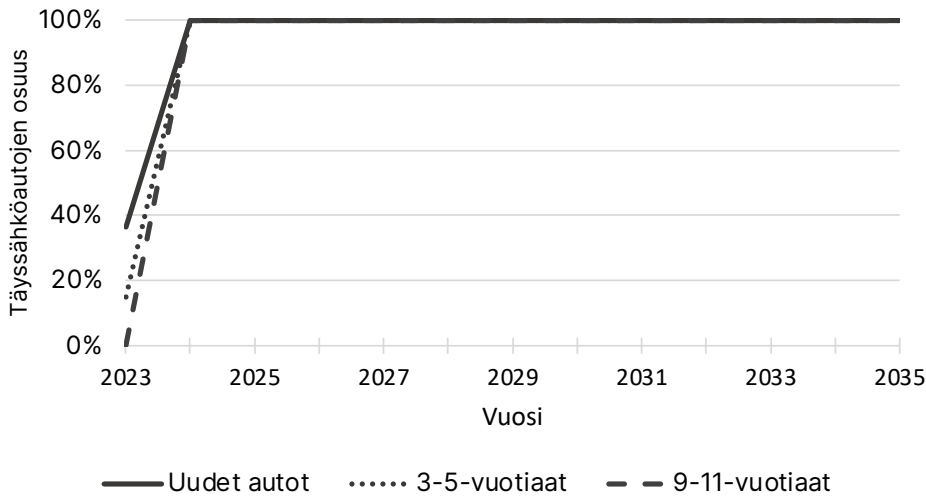
Skenaario 2 - Käyttövoimien osuus autokannasta



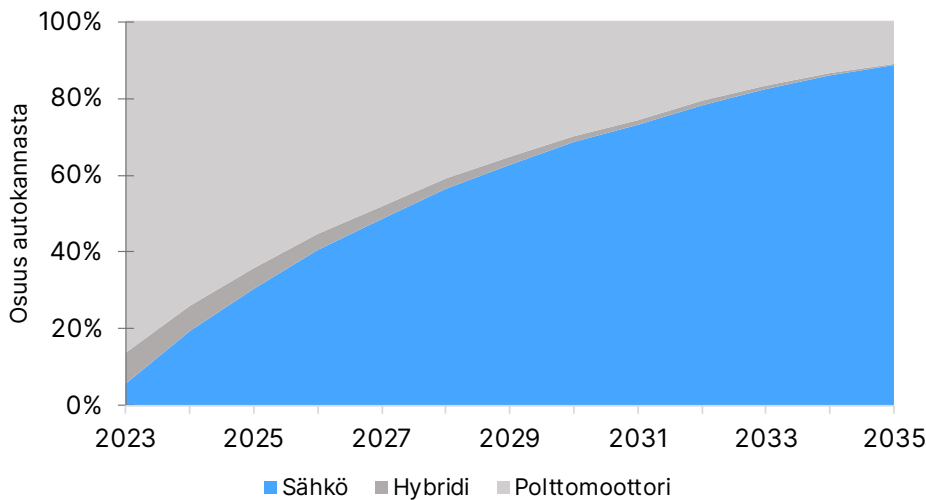
Kolmas skenaario

48. Tässä skenaariossa on pidetty muut osat ennallaan ja muutettu perusskenaarioon nähden ainoastaan sitä kuinka suuri osuus uusista ja eri ikäisistä Helsinkiin kunakin vuonna tulevista autoista olisi oltava sähköautoja, että voitaisiin päästä 90 % sähköautojen osuuteen vuodelle 2035.
49. Tarkastelusta nähdään, että edes tilanteessa, jossa käytännössä kaikki uudet ja vanhat Helsinkiin tuotavat autot olisivat ainoastaan sähköautoja, ei 90 % sähköautojen osuuteen 2035 päästä, koska autokannan uudistumisvauhti ei riitä.

Skenaario 3 - Helsingissä käyttöön otettavat täyssähköautot



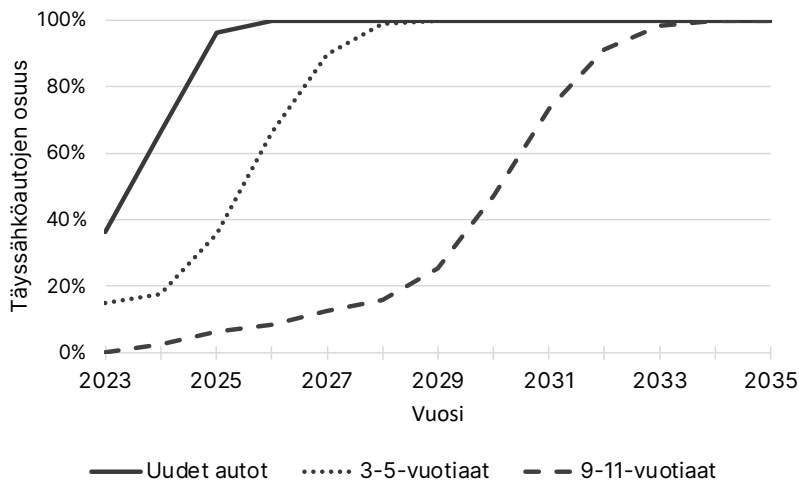
Skenaario 3 - Käyttövoimien osuus autokannasta



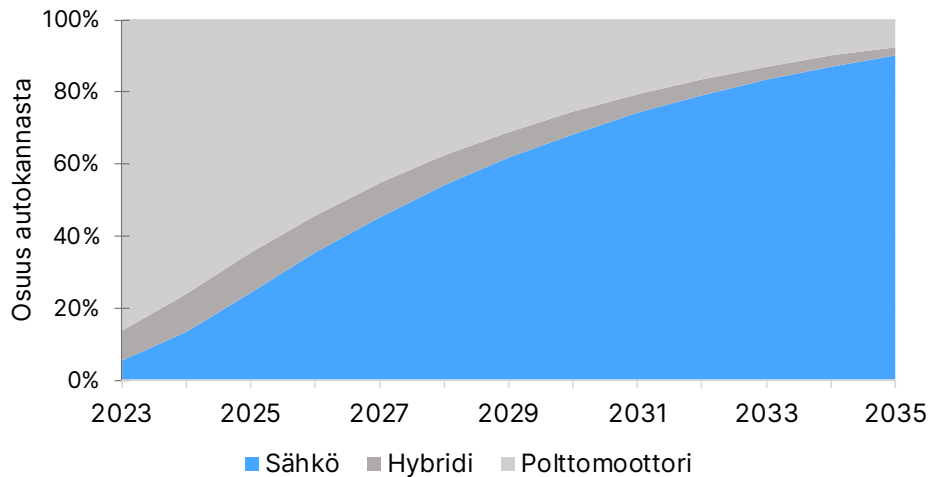
Neljäs skenaario

50. Tässä skenaariossa on yhdistetty toista ja kolmatta skenaariota ja rakennettu skenaario, jolla 90 % osuus sähköautoista saavutetaan niin, että perusskenaarioon nähden sähköautojen osuus kasvaa nopeammin ja Helsinkiin tulevien uusien ja käytettyjen autojen määrä kasvaa perusskenaariosta.
51. Tarkastelusta nähdään, että 90 prosentin osuuteen päästään tilanteessa, jossa Helsinkiin tuotavien eri ikäluokkien sähköautoisuus kasvaa kuvan mukaisesti selvästi perusskenaariosta ja saaman aikaan Helsingin autokanta nuorenee ja autojen virtaus Helsinkiin ja Helsingistä kiihtyy perusskenaariosta niin, että uusien autojen tuonnin kasvaessa 60 %, 0-5-vuotiaiden autojen tuonti kasvaa 25 % ja yli 12-vuotiaiden autojen tuonti laskee 50 %. Skenaariossa autojen tuonti kasvaa 54400 → 60300 ja samoin kuin toisessa skenaariossa ylimääräisten autojen on oletettu poistuvan vanhimmista lähtien.

Skenaario 4 - Helsingissä käyttöön otettavat täyssähköautot



Skenaario 4 - Käyttövoimien osuus autokannasta



Kuvaileva analyysi autojen haltijoista Helsingissä

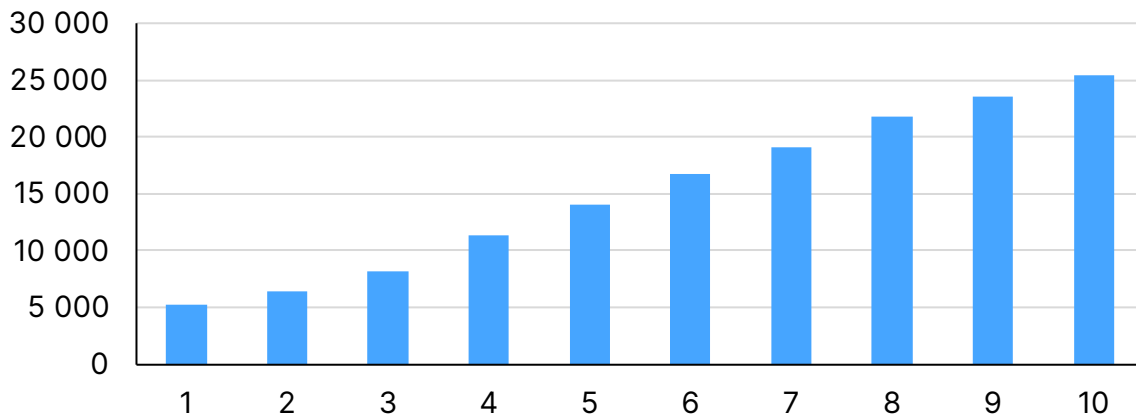
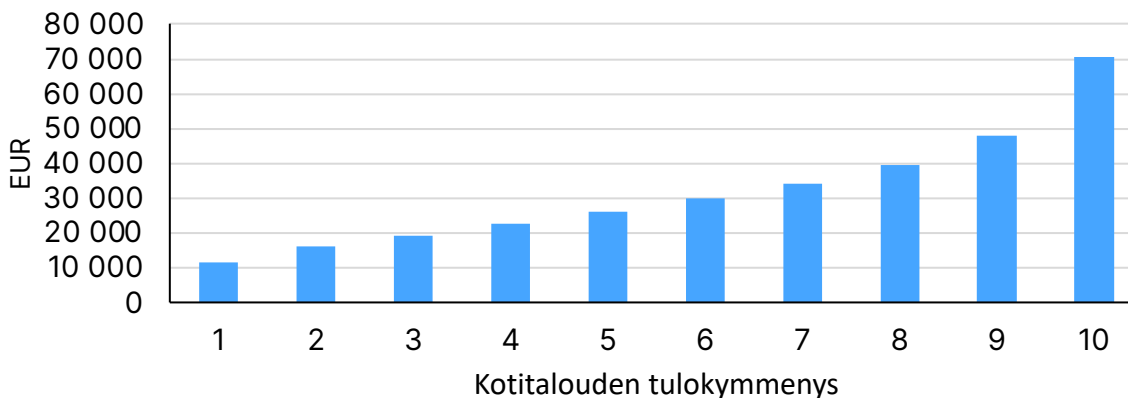
Autojen haltijat Helsingissä

52. Kaikenlainen autoihin kohdistuva sääntely kohdistuu pääasiassa niihin kotitalouksiin¹², joilla on auto. Yksinkertaistetusti voidaan sanoa, että hyvätuloisilla kotitalouksilla auto pääsääntöisesti on ja pienituloiset kotitaloudet pärjäävät ilman autoa.

¹² Seuraavissa analyyseissä tarkastellaan pääosin kotitalouksia. Näin siksi, että kotitalouksien jäsenten hallinnoimat autot ovat usein yhteiskäytössä, ja siksi auton välttämättömyyttä on perusteltua arvioida kotitalouden eikä yksilön näkökulmasta.

Helsingin kotitalouksien autonomistus tulokymmenyksittäin

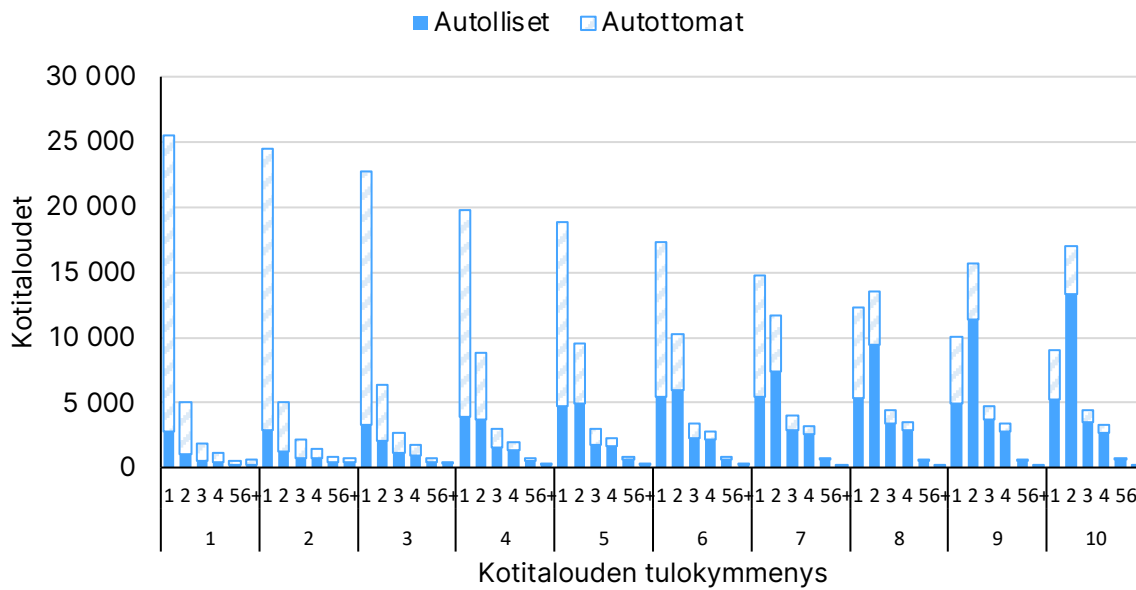
■ Autolliset kotitaloudet

Helsingin kotitalouksien käytettävissä olevien tulojen mediaani kulutusyksikköä kohden¹³

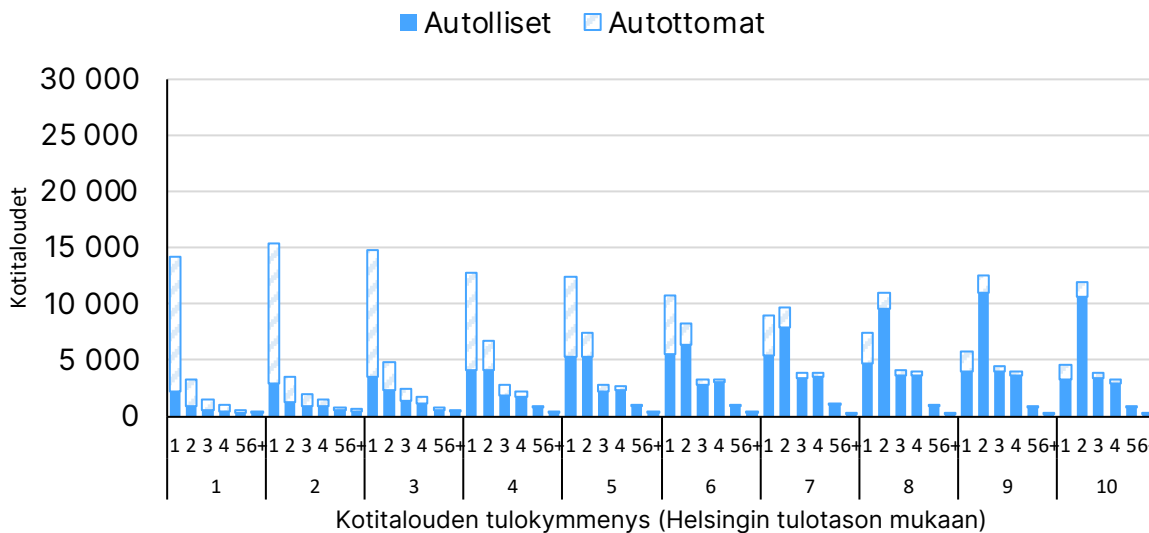
53. Yksi esiin nostettu näkökulma auton omistamisen välttämättömyydestä liittyy perheellisyyteen. Seuraavassa kuvassa Helsingin asutokunnaat on jaettu tulokymmenyksittäin ja näiden kymmenysten sisällä asutokunnaan koon mukaan. Näiden ryhmien sisällä on asutokunnat jaettu autottomiin ja autollisiin.

¹³ Tulokymmenyksien tulorajat ovat laskettu seuraavasti: kotitalouden tulot kulutusyksikköä kohden on yhtä asutokunnan yhteenlasketut käytettävissäolevat tulot jaettuna OECD:n ns. muunnettujen kulutusyksiköiden lukumäärällä. Tulojen ylärajat kotitalouskymmenyksittäin ovat seuraavat (EUR): 1) 14 624, 2) 17 845, 3) 20 987, 4) 24 455, 5) 28 035, 6) 31 923, 7) 36 703, 8) 43 179, 9) 55 306.

Autonomistus kotitalouden tulokymmenyksen ja henkilömäärän mukaan, 2021

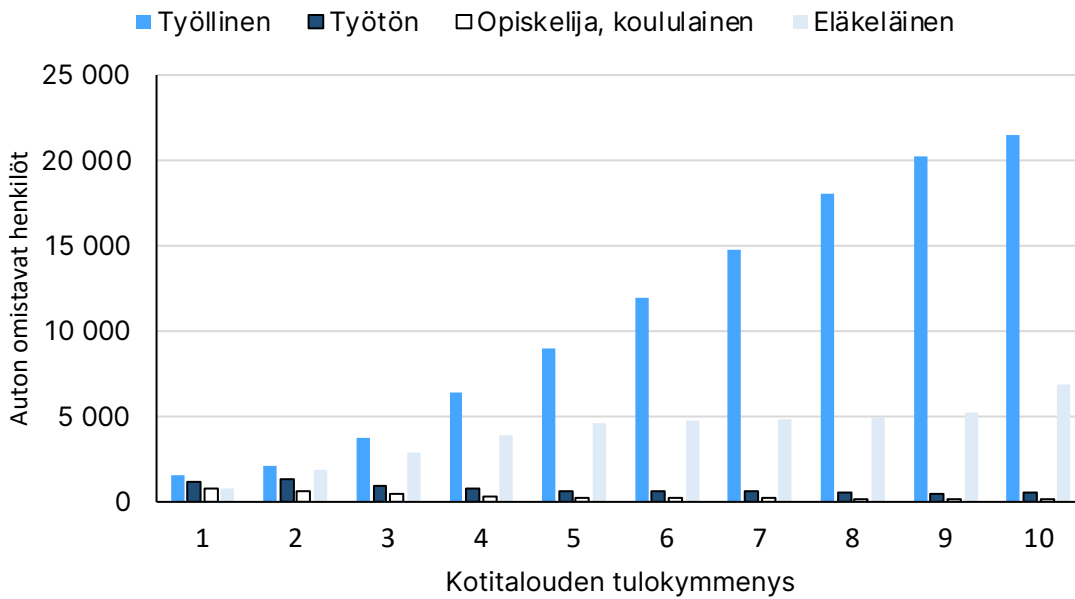


Espoo, Vantaa, Kauniainen: autonomistus kotitalouden tulokymmenyksen ja henkilömäärän mukaan, 2021

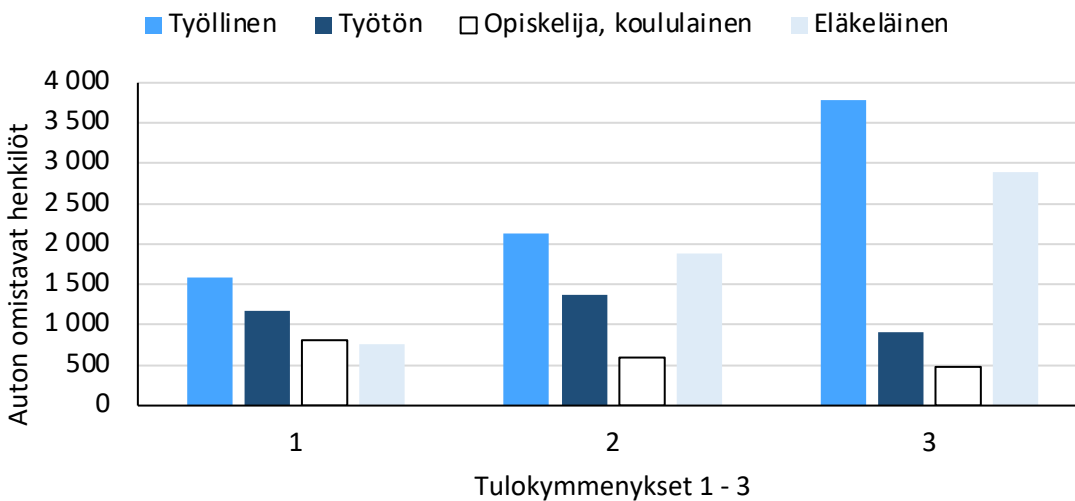


54. Toinen kiinnostava näkökulma on autoilevien henkilöiden päätoimi. Valtaosa autoilijoista on työssäkäyviä, ja autonomistus kasvaa tasaisesti tulojen mukana. Toinen autonomistusluokka on eläkeläiset, joiden tulojakauma on hyvin tasainen.
55. Ensimmäisessä kuvassa mukana ovat kaikki tuloluokat. Toisessa kuvassa tarkastellaan vain kolmea alinta tulokymmenystä.

Autonomistajat päätoimen ja kotitalouden tulokymmenyksen mukaan, 2021



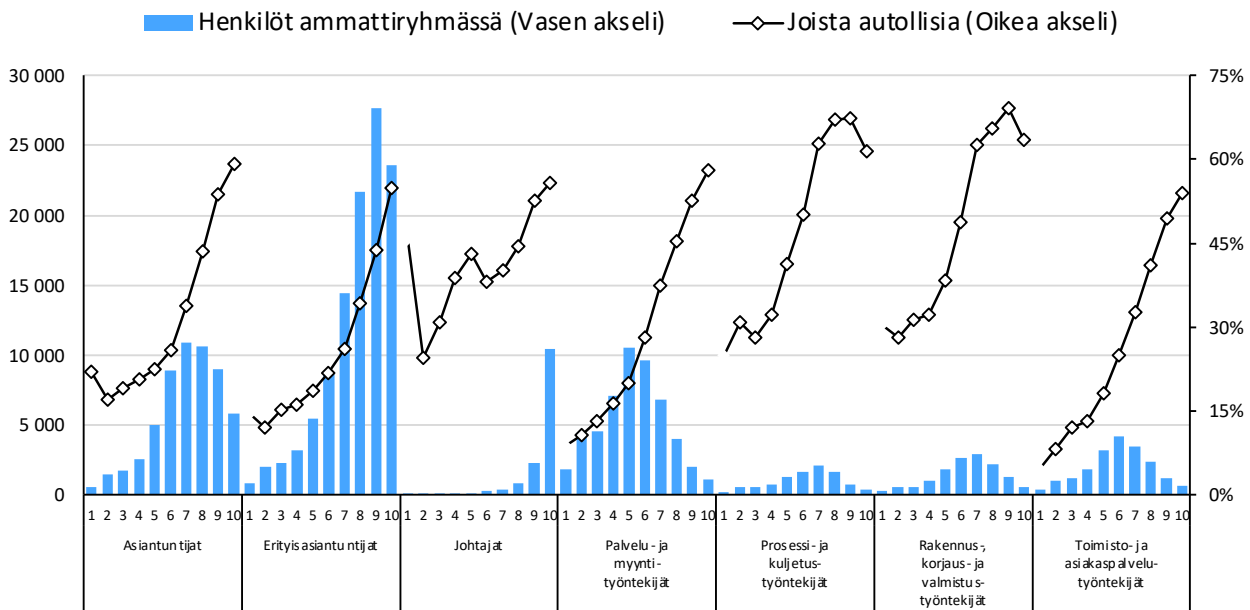
Autonomistajat päätoimen ja kotitalouden tulokymmenyksen mukaan, 2021



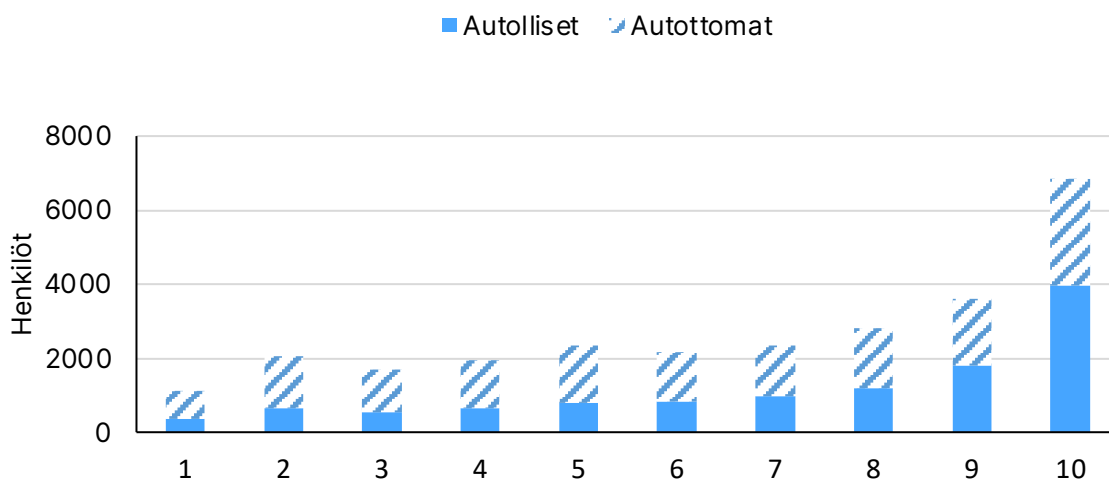
56. Seuraava kuvio esittää Helsingissä asuvien työllisten autonomistuksen ammattiluokan mukaan. Kaikissa ammattiluokissa autonomistusosuus kasvaa jyrkästi kuudennen tulokymmenyksen kohdalla. Alhaisissa tulokymmenyksissä autonomistus on yleisintä prosessi- ja kuljetustyöntekijöillä sekä rakennus-, korjaus- ja valmistustyöntekijöillä.

57. Jälkimmäinen kuvio näyttää yrittäjien autonomistusosuudet.

Helsingin työntekijöiden autonomistus yksilön ammattiryhmittäin ja autonomistus



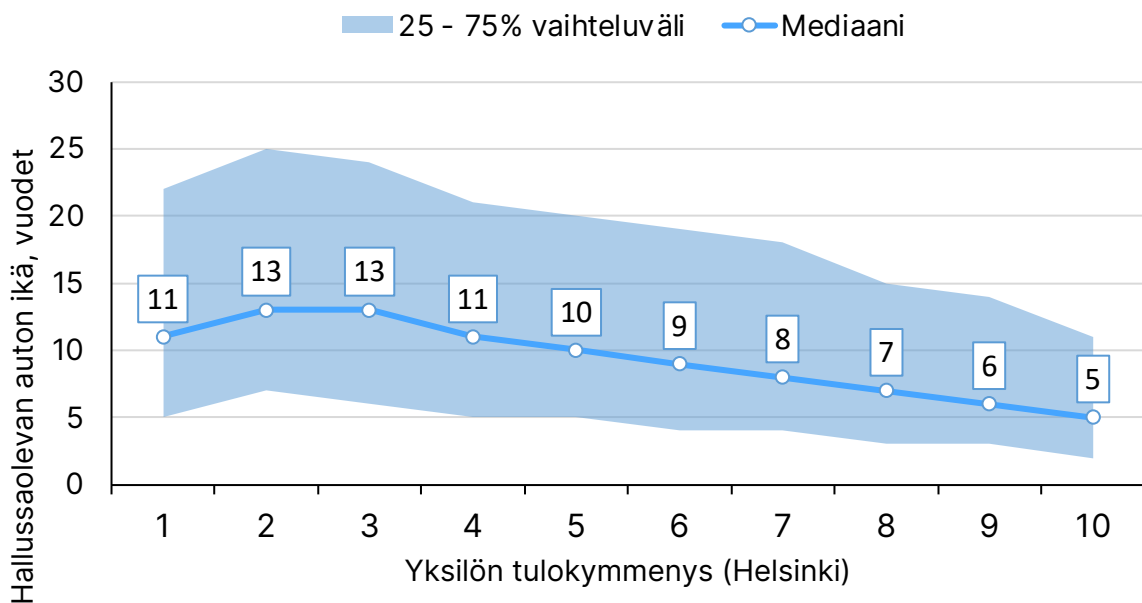
Helsingin yrittäjien autonomistus yksilön tulokymmenyksen mukaan, 2021



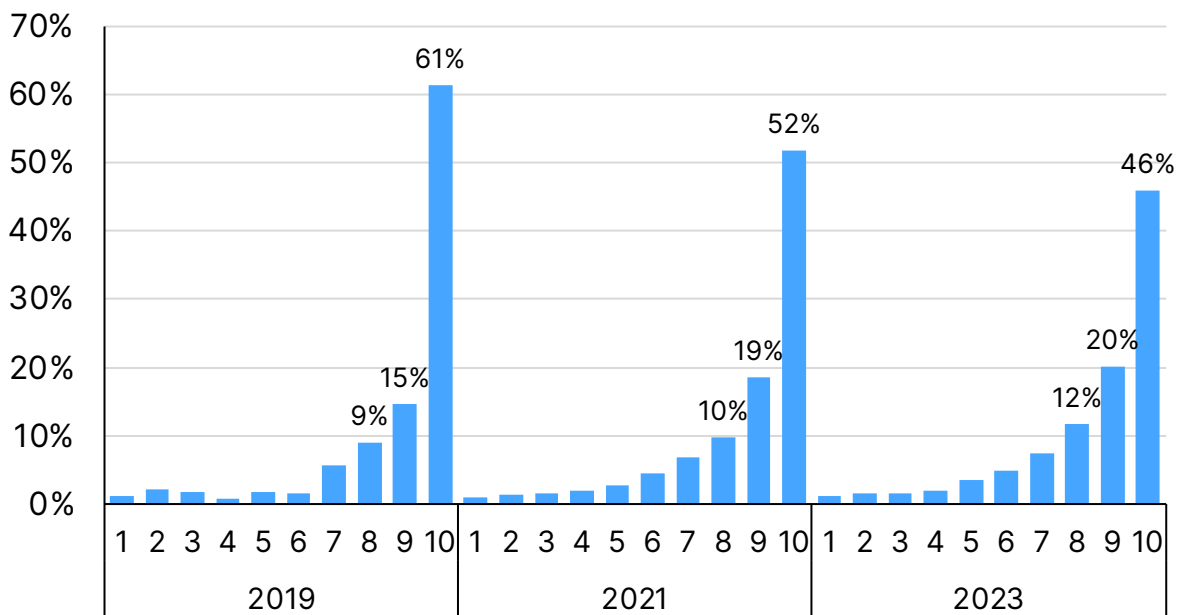
Autokannan ikärakenne ja sähköautot eri tuloluokissa

58. Seuraavista analyyseista nähdään, että autokannan ikä ja arvo vaihtelevat tuloluokittain. Siinä missä ylimmän tulokymmenyksen omistusautojen mediaani-ikä on 5 vuotta, on alimmissa tulopuolikkaassa tämä yli 10 vuotta.
59. Aineistosta nähdään, että tähän mennessä Helsinkiin tulleet sähköautot ovat menneet voimakkaasti ylimpien tuloluokkien käyttöön. Viime vuosina ja erityisesti juuri vuosien 2022 ja 2023 aikana myös keskituloiset ovat alkaneet hankkia sähköautoja.

Hallussaolevan auton ikä tulodesiileittäin, 2021



Helsingin sähköautokannan omistusosuus tulodesiileittäin



Lyhyesti kansainvälisistä verrokeista

Teoria

60. Holland, Mansur & Yates (2021) mallintavat sähköautosiirtymää teorian pohjalta. He vertaavat markkinaehtoista siirtymää kontrafaktuaaliseen yhteiskunnan kannalta optimaaliseen siirtymään, jossa huomioidaan kuluttajien hyödyn lisäksi polttomoottorien tuottamien päästöjen ulkoisvaikutukset. Näiden kahden skenaarion erotus yhteiskunnan hyvinvoinnissa määritellään tehokkuustappioksi. He erottelevat tehokkuustappiot liittyen lopulliseen autokannan kompositioon sekä ajalliseen tehottomuuteen, toisin sanoen siihen, tapahtuuko siirtymä sähköautoihin liian aikaisin tai liian myöhään. He arvioivat, että nämä kaksi tehokkuustappiota osittain kumoavat toisensa. He arvioivat, että poliittisesti vaikean ulkoisvaikutusverotuksen (ns. Pigou-vero) jälkeen parhaita vaihtoehtoja ovat sähköautotuet sekä polttomoottoriautojen tuotantokielto. Tuotantokielto toisaalta synnyttää tehottaman suuren polttomoottorikannan tuotannon kasvaessa ennen kiellon voimaantuloa. He ehdottavat vaihtoehtoiseksi mekanismiksi kieltoa kumulatiiviselle tuotannolle, jossa tuotanto-oikeuksia voidaan kaupata (n.s Cap and trade). Käyttökieltoa he eivät artikkelissa kuitenkaan käsittele.

Empiria

61. International Council on Clean Transportation (ICCT) luettelee raportissaan eri kaupungeissa käyttöönotetut polttomoottoriautokiellot. Virallisen ja selkeän aikataulun omaavat kiellot ovat toistaiseksi asettaneet ainoastaan Amsterdam ja Pariisi. Amsterdamissa astuu voimaan täysi polttomoottorikielto kaupunkialueella vuonna 2030, josta ilmoitus tehtiin vuonna 2019. Pariisissa on voimassa kaupunkilaajuinen alhaisen päästön alue, joka on tarkoitus laajentaa täysin päästöttömäksi vuoteen 2030 mennessä, koskien kaikkia ajoneuvotyyppejä (Wappelhorst & Cui, 2022).
62. Näistä kahdesta etenkin Amsterdam on hyvä vertailukohta onnistuneelle kiellon toteuttamiselle. Helsinkiin verrattuna Amsterdamissa on huomattavasti enemmän hitaita latauspisteitä, mutta pikalatauspisteitä on suurin piirtein saman verran (Hall & Lutsey, 2020). Amsterdamin polttomoottorikiellon toimeenpanossa panostetaan etenkin tiedottamiseen ja sähköauton hankinnan kannustamiseen esimerkiksi alennetuilla pysäköintimaksuilla ja sähkölatausinfrastruktuurin laajentamisella. Polttomoottorikiellon kanssa tähdätään toteuttamaan kaksi komplementaarista hanketta. Ensimmäinen pyrkii vähentämään yksityisautoilua kokonaisuudessaan muun muassa karsimalla pysäköintipaikkoja ja korottamalla parkkimaksuja. Lisäksi hankkeessa kannustetaan asukkaita hyödyntämään auton vuokrauspalveluita (e.g. car2go applikaatio) sekä muita kulkuneuvoja kuten potkulautoja ja polkupyöriä. Toinen komplementaarinen hanke pyrkii paremmin hallinnoimaan liikennettä seuraamalla reaaliaikaista dataa esimerkiksi autohalleista. (Roth et al., 2021).
63. Varsinaisen polttomoottorikiellon lisäksi useat eurooppalaiset suurkaupungit ovat asettaneet alhaisten päästöjen tai päästöttömän liikenteen alueita keskustan tuntumaan, kuten muun muassa Lontoo, Madrid ja Bryssel. Lisäksi joissain kaupungeissa on asetettu tavaraliikenteelle suunnattuja alueellisia polttomoottorikieltoja, kuten muun muassa Rotterdamissa (2015) ja Shenzenissä (2018) (Wappelhorst & Cui, 2022).
64. Koska kaupunginlaajuisia polttomoottorikieltoja on vasta harvassa, ei sen vaikutuksesta autokannan sähköistymiseen ole myöskään tutkimustietoa. Toisaalta kaupunkien alueellisista rajoituksista on julkaistu muutamia tutkimuksia, joista valtaosa tutkii vaikutuksia ilmanlaatuun. Taloudellisia vaikutuksia on tutkittu huomattavasti vähemmän. Seuraavaksi lyhyt katsaus tähän olemassa olevaan kirjallisuuteen.
65. Tukholma. Börjesson, Bastian & Eliasson (2021) arvioivat ruuhkamaksujen perusteella Tukholman keskustaan ehdotetun noin 25 neliökilometrin vähäpäästöisen alueen tuottamat hyödyt ja haitat kuluttajille. Hyödyt määritellään parannukseksi ilmanlaadussa, kun taas haitat syntyvät sopeutuskustannuksista ja autoilusta luopumisesta. Analyysissä kirjoittajat olettavat, että autokanta päivittyy kohti vähäpäästöisiä autoja historialliseen tahtiin, jonka seurauksena vain harva auto saa useaan vuoteen ajaa keskustassa ennen kuin kanta sopeutuu. He arvioivat, että sopeutuskustannukset ylittävät kapeasti määritellyt hyödyt kuluttajille moninkertaisesti. Kustannuksia ei pystytä erottelemaan tuloluokittain, mutta kirjoittajat arvelevat, että uudistus on regressiivinen, koska kiellon kohteena olevia autoja ajavat etenkin alempien tuloluokkien kotitaloudet.

66. Toinen tapausesimerkki on Madridista, jossa vuonna 2018 säädettiin uudistus Madrid Central, joka rajoittaa suuripäästöisten yksityisautojen pääsyä noin 5 neliökilometrin alueelle keskustassa. Alueelle pääsyä rajoitetaan siten, että eniten päästävät autot eivät voi ajaa alueella lainkaan, kun taas päästöttömät autot saivat ajaa ilman rajoitteita. Muut autot saavat ajaa alueella tietyin edellytyksin, kuten esimerkiksi jos ne pysäköidään yksityisiin autotalleihin eikä kadunvarsille. Tiettyjä poikkeuksia sovelletaan liikuntarajoitteisiin henkilöihin, vakituisiin alueen asukkaisiin, turvallisuus- ja hätäpalveluihin sekä tavaroiden jakeluun. Rajoitetta valvotaan automaattisella kamerajärjestelmällä, joka tunnistaa ajoneuvotyypin rekisterikilven perusteella. Säännöksen rikkominen tuottaa 90eur sakon.
67. Perustuen politiikkamuutoksen jälkeen teetettyyn laajaan kyselyaineistoon Tarriño-Ortiz et al. (2022) arvioivat, että uudistuksen seurauksena valtaosa yksityisautoilijoista vähensi yksityisautoilua ja siirtyi matkustamaan alueella jalan, polkupyörällä tai hyödyntäen julkista liikennettä. Henkilökohtaiset ja demografiset tekijät korreloivat liikkumismuodon vaihtamisen kanssa. Ne henkilöt, jotka vierailivat vähäpäästöisellä alueella vähintään muutaman kerran viikossa, olivat todennäköisempiä muuttamaan liikkumismuotoaan siinä missä alueella harvoin liikkuvat eivät niinkään. Liikkumisvaihtoehdon vaihtaminen oli yleisempää alemmissä tuloluokissa, kun taas ne henkilöt, joilla oli ”riippuvaisia” perheenjäseniä (lapsia, vanhuksia tai holhouksen alaisia) eivät muuttaneet liikkumiskäytäntöjään. Sen sijaan henkilöiden asenteet kuten ympäristötietoisuus eivät korreloineet liikkumismuodon valinnan kanssa.
68. Toisessa tutkimuksessa Tarriño-Ortiz et al. (2023) selvittävät, miten Madrid Central vaikutti alueen vähittäiskauppaan, perustuen kahteen kyselyyn, jotka toteutettiin vuonna 2019. He analysoivat kahta kyselyä, jotka teetettiin kuluttajille liittyen heidän ostokäyttäytymiseensä sekä vähittäiskauppiaille liittyen käynti- ja myyntivolyymeihin. Noin puolet vähittäiskauppiasta raportoivat pienempiä myyntivolyymeja, noin kolmasosalla volyymit pysyivät ennallaan, ja alle 14 % raportoivat kasvaneita volyymeja. Myyntivolyymit kasvoivat etenkin suurissa vähittäiskaupoissa, jotka kirjoittajat arvelevat liittyvän niiden yksityispysäköintimahdollisuuksiin. Kuluttajista hieman yli kolmasosa ilmoitti, että uudistus kasvatti ostokäyttäytymistä LEZ alueella, kun taas noin samansuuruinen osuus vastaajista koki päinvastoin. Noin neljäsosa ilmoitti, ettei uudistuksella ollut vaikutusta ostosten tekemiseen alueella.
69. Liittyen Pariisiin kaavailtuun polttomoottorikieltoon Leroutier ja Quirion (2023) pyrkivät identifioimaan kaupungin asukkaiden mahdollisuuksia siirtyä polttomoottoriautoilusta päästöttömiin kulkuvaihtoehtoihin perustuen laajaan liikennekyselyyn. He pyrkivät identifioimaan ne autoilijat, jotka eivät pysty täysin vaihtamaan muuhun kulkuneuvoon, ja joille täten päästötön alue synnyttää suurimmat sopeutuskustannukset. Tämä ryhmä kattaa noin 60 % nykyisistä autoilijoista. Tämä ryhmä kaupunkilaisia ajaa keskimäärin 35 km päivässä siinä missä ”riippumattomat” ajavat alle 9km. Autoriippuvainen ryhmä on varsin heterogeeninen, mutta sen jäsenillä on muutamia ominaispiirteitä. He ajavat kauempana kaupungin keskustasta, mikä osittain johtuu keskustan ulkopuolisen alueen alhaisesta julkisesta liikenteestä, mutta myös siitä, että esimerkiksi pyöräily hankaloituu suurten välimatkojen takia. Tyypillisimmin autoilusta riippuvainen on mies, asuu ulkoisilla esikaupungeilla kaukana julkisesta liikenteestä, kuuluu ylimpään kotitaloustulodesiiliin ja matkustaa työmatkan kaupunginosien välillä. Lisäksi esimerkiksi se, että työskentelee epätavallisia työaikoja, harjoittaa manuaalista työtä, työskentelee muiden ihmisten kotona tai tehtaalla lisää alttiutta autoriippuvuudelle. Toisaalta näiden kaikkien seikkojen jälkeenkin autoriippuvuudessa on huomattavasti havaitsematonta vaihtelua. Kirjoittajat toteavat, että nykyisille autoilijoille paljolti ainoa merkittävä este sähköauton hankkimiseen on raha; käytännön esteitä harvassa.
70. Isaksen & Johansen (2021) tutkivat, miten sähköautoja koskemattomat ruuhkamaksut Oslossa ja Bergenissä vaikuttivat kulkuneuvon valintaan, ruuhkamääriin ja sähköauton hankintaan. He arvioivat, että politiikkamuutos lisäsi sähköauton hankintaa etenkin rikkaiden kohdalla, ja ruuhkien vähentymisen ja parantuneen ilmanlaadun kautta lisäsi kuluttajan hyvinvointia suhteessa kustannuksiin noin kolminkertaisesti.
71. Empiirisesti autoilun ja polttoaineen kysynnän on havaittu olevan vähemmän joustavaa alueilla, jossa on heikompi julkinen liikenne (Gillingham & Munk-Nielsen, 2019)

Lähteet

Börjesson, M., Bastian, A., & Eliasson, J. (2021). The economics of low emission zones. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 153, 99-114.

Gillingham, K., & Munk-Nielsen, A. (2019). A tale of two tails: Commuting and the fuel price response in driving. *Journal of Urban Economics*, 109, 27-40.

Hall, D., & Lutsey, N. (2020). Charging infrastructure in cities: Metrics for evaluating future needs. *Europe*, 6(7,000,000), 8-000.

Holland, S. P., Mansur, E. T., & Yates, A. J. (2021). The electric vehicle transition and the economics of banning gasoline vehicles. *American Economic Journal: Economic Policy*, 13(3), 316-344.

Isaksen, E. T., & Johansen, B. G. (2021). Congestion pricing, air pollution, and individual-level behavioral responses. Available at SSRN 3832230.

Leroutier, M., & Quirion, P. (2023). Tackling car emissions in urban areas: Shift, Avoid, Improve. *Ecological Economics*, 213, 107951.

Roth, A., Bahr, J. V., Kloo, H., & Wisell, T. (2021). Zero-emission vehicles and zones in Nordic cities—Promotion, instruments and effects.

Tarriño-Ortiz, J., Gómez, J., Soria-Lara, J. A., & Vassallo, J. M. (2022). Analyzing the impact of Low Emission Zones on modal shift. *Sustainable Cities and Society*, 77, 103562.

Tarriño-Ortiz, J., Soria-Lara, J. A., Silveira-Santos, T., & Vassallo, J. M. (2023). The im-pact of Low Emission Zones on retail activity: Madrid Central lessons. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 122, 103883.

Wappelhorst, S., & Cui, H. (2022). Update on zero-Emission Zone Development Progress in cities. (ICCT: Washington, D.C., 2022) <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/08/Global-ZEZs-update-FINAL.pdf>