

Liikenteen päästö- vähennystoimenpiteiden kokonaisvaltainen taloudellinen arviointi

Heikki Liimatainen, Riku Viri, Harri Nikula, Hanne Tiikkaja, Roni Utriainen

VALTIONEUVOSTON SELVITYS- JA
TUTKIMUSTOIMINNAN JULKAISUSARJA 2023:38

tietokayttoon.fi

Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2023:38

Liikenteen päästövähennystoimenpiteiden kokonaisvaltainen taloudellinen arviointi

Heikki Liimatainen, Riku Viri, Harri Nikula, Hanne Tiikkaja, Roni Utriainen

Valtioneuvoston kanslia Helsinki 2023

Julkaisujen jakelu

Distribution av publikationer

**Valtioneuvoston
julkaisuarkisto Valto**

Publikations-
arkivet Valto

julkaisut.valtioneuvosto.fi

Julkaisumyynti

Beställningar av publikationer

**Valtioneuvoston
verkkokirjakauppa**

Statsrådets
nätbokhandel

vnjulkaisumyynti.fi

Valtioneuvoston kanslia

CC BY-ND 4.0

ISBN pdf: 978-952-383-200-8

ISSN pdf: 2342-6799

Taitto: Valtioneuvoston hallintoyksikkö, Julkaisutuotanto

Helsinki 2023

Liikenteen päästövähennystoimenpiteiden kokonaisvaltainen taloudellinen arviointi

Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2023:38

Julkaisija Valtioneuvoston kanslia

Tekijä/t Heikki Liimatainen, Riku Viri, Harri Nikula, Hanne Tiikkaja, Roni Utriainen

Kieli suomi

Sivumäärä

132

Tiivistelmä

Yhteiskunnalliseen päätöksentekoon liittyvän tavoitesidonnaisen hyöty-kustannustarkastelun tulee perustua julkisten toimenpidekustannusten, kuluttajien, yritysten ja julkisen sektorin kohtaamien negatiivisten ja positiivisten kustannusvaikutusten kokonaisvaltaiseen arvioimiseen. Kokonaistaloudelliset tarkastelut auttavat julkisten toimien oikean mitoituksen ja tehokkaan kohdentamisen määrittämisessä. Fossiilittoman liikenteen tiekartan keskeisenä tavoitteena on ollut suunnitella ja valita toimia, jotka ovat mahdollisimman kustannustehokkaita, mutta toimenpiteiden kustannusvaikutusten tarkastelut eivät ole olleet tieteellisen kirjallisuuden ja Suomen Ilmastopaneelin suositusten mukaisia.

Hankkeen tarkoituksena oli tuottaa yleisesti käyttökelpoinen systemaattinen menetelmäkehikko ja suositukset siitä, millä kattavuudella ja miten liikenteen päästövähennystoimien taloudellisia vaikutuksia tulee arvioida kokonaisvaltaisesti ja toimien elinkaaren pituudelta. Hankkeen lopputuloksena syntyi liikennesektorin ilmastopoliittisten toimenpiteiden kustannusvaikutusten ja kustannusvaikuttavuuden kokonaisvaltaiseen tarkasteluun soveltuvat henkilö- ja tavaraliikenteen laskentamallit ja ohjeet laskennan suorittamisesta ja toimenpiteiden vertailemisesta. Laskentamallien toimivuus on varmistettu soveltamalla niitä mahdollisten päästöjä vähentävien politiikkatoimien kustannusvaikutusten tarkasteluun.

Klausuuli Tämä julkaisu on toteutettu osana valtioneuvoston selvitys- ja tutkimussuunnitelman toimeenpanoa. (tietokayttoon.fi) Julkaisun sisällöstä vastaavat tiedon tuottajat, eikä tekstisisältö välttämättä edusta valtioneuvoston näkemystä.

Asiasanat tutkimus, tutkimustoiminta, liikenne, kuljetukset, kustannustehokkuus, hiilidioksidipäästöt

ISBN PDF 978-952-383-200-8

ISSN PDF

2342-6799

Julkaisun osoite <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-200-8>

Bedömningen av de övergripande ekonomiska konsekvenserna av åtgärderna för att minska utsläppen från transport

Publikationsserie för statsrådets utrednings- och forskningsverksamhet 2023:38

Utgivare Statsrådets kansli

Författare Heikki Liimatainen, Riku Viri, Harri Nikula, Hanne Tiikkaja, Roni Utriainen

Språk finska

Sidantal

132

Referat

Den målbaserade nyttokostnadsanalysen i samband med samhälleligt beslutsfattande måste baseras på en övergripande bedömning av kostnaderna för offentliga interventioner samt de negativa och positiva kostnadseffekter som konsumenter, företag och den offentliga sektorn står inför. Makroekonomiska överväganden bidrar till att fastställa korrekt storlek och effektiv inriktning av offentliga insatser. Det centrala målet med färdplanen för fossilfria transporter har varit att planera och välja åtgärder som är så kostnadseffektiva som möjligt, men granskningen av åtgärdernas kostnadseffekter har inte varit i linje med den vetenskapliga litteraturen och Finlands Klimatpanelens rekommendationer.

Syftet med projektet var att ta fram en allmänt användbar systematisk metodisk ram och rekommendationer om omfattningen och bedömningen av de ekonomiska konsekvenserna av åtgärderna för att minska utsläppen från transport på ett övergripande sätt och över åtgärdernas livscykel. I projektet skapades beräkningsmodeller som lämpar sig för en omfattande granskning av kostnadseffekterna och kostnadseffektiviteten av transportsektorns klimatpolitiska åtgärder inom passagerar- och godstrafik samt riktlinjer för beräkning och jämförelse av åtgärder. Beräkningsmodellernas funktion har säkerställts genom att tillämpa dem på granskningen av kostnadseffekterna av möjliga politiska åtgärder för att minska utsläppen.

Klausul Den här publikation är en del i genomförandet av statsrådets utrednings- och forskningsplan. (tietokayttoon.fi) De som producerar informationen ansvarar för innehållet i publikationen. Textinnehållet återspeglar inte nödvändigtvis statsrådets ståndpunkt

Nyckelord forskning, forskningsverksamhet, transport, kostnadseffektivitet koldioxidutsläpp

ISBN PDF 978-952-383-200-8

ISSN PDF

2342-6799

URN-adress <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-200-8>

Holistic economic evaluation of emission reduction measures in transport

Publications of the Government's analysis, assessment and research activities 2023:38**Publisher** Prime Minister's Office**Author(s)** Heikki Liimatainen, Riku Viri, Harri Nikula, Hanne Tiikkaja, Roni Utriainen**Language** Finnish**Pages**

132

Abstract

The target-based benefit-cost analysis related to societal decision-making must be based on a comprehensive assessment of public intervention costs, the negative and positive cost impacts faced by consumers, companies and the public sector. Macroeconomic considerations help to determine the correct sizing and effective targeting of public interventions. The key objective of the roadmap for fossil-free transport has been to plan and select actions that are as cost-effective as possible, but the assessment of the cost impacts of the measures has not been in line with the scientific literature and the recommendations of the Finnish Climate Panel.

The purpose of the project was to produce a generally usable systematic methodological framework and recommendations on the scope and methodology of the economic impacts assessment of the transport emission reduction measures for comprehensive analysis over the life cycle of measures. The result of the project were passenger and freight transport models suitable for a comprehensive examination of the cost impacts and cost-effectiveness of climate policy measures in the transport sector, as well as guidelines for performing the calculations and comparing measures. The functionality of the calculation models has been ensured by applying them to the examination of the cost impacts of possible policy measures to reduce emissions.

Provision

This publication is part of the implementation of the Government Plan for Analysis, Assessment and Research. (tietokayttoon.fi) The content is the responsibility of the producers of the information and does not necessarily represent the view of the Government.

Keywords

research, research activities, transport, cost efficiency, carbon dioxide emissions

ISBN PDF 978-952-383-200-8**ISSN PDF**

2342-6799

URN address <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-200-8>

Sisältö

Esipuhe	8
1 Johdanto	9
1.1 Liikenteen päästövähennystoimien aiempi taloudellinen arviointi Suomessa	10
1.1.1 Toimenpidekokonaisuuksien vaikutusten arviointi Suomen tasolla	10
1.1.2 Toimenpidekokonaisuuksien vaikutusten arviointi kaupunkiseutujen tasolla.....	13
1.1.3 Yksittäisten toimenpiteiden vaikutusten arviointi	14
1.2 Tavoitteet	17
1.3 Tutkimusprosessi	18
2 Liikenteen taloudellinen merkitys	20
2.1 Liikenne ja julkinen talous	20
2.2 Liikenne ja kotitalouksien kulutus	21
2.3 Logistiikka ja yritystalous.....	25
3 Päästövähennystoimien kustannustehokkuus	27
3.1 Kustannuskäsitteitä ja laskentamenetelmiä	27
3.1.1 Kustannus.....	27
3.1.2 Kustannustehokkuus	31
3.1.3 Julkinen valta.....	32
3.1.4 Kustannuslaskennan laajuus	35
3.1.5 Kilpailukyky.....	38
3.1.6 Laskentamenetelmät	40
3.1.7 Päästöleikkausten rajakustannusfunktio (MAC-funktio)	41
3.1.8 Epävarmuus.....	43
3.2 Tieliikenteen päästövähennysten kustannuslaskenta.....	45
3.3 Ohjausmenetelmien valinnasta	48
3.3.1 Suomalaisia hankelaskelmia liikenteen päästövähennysten kustannuksista	51
3.3.1.1 Energiasektorimallinnus	51
3.3.1.2 Liikennesektorimallinnus.....	53
3.3.1.3 Käyttövoimamallinnus	54
3.3.2 Liikennesektorin hankelaskenta ilmastopolitiikassa	55
3.4 Yhteenvedo kirjallisuudesta.....	58

4	Laskentamenetelmän ja työkalun kehitys	65
4.1	Kirjallisuusselvityksessä havaittujen periaatteiden huomioon ottaminen	65
4.2	Henkilöliikenne	67
4.2.1	Lähtötiedot	67
4.2.2	Laskentaprosessi ja laskennan oletukset	68
4.2.2.1	Hinnottelu ja päästöt	69
4.2.2.2	Joustot	73
4.2.2.3	Tulosten esittäminen	76
4.2.3	Laskentaesimerkit	77
4.2.3.1	Tieliikenteen EU-päästökauppa 2027 alkaen	77
4.2.3.2	Hankintatuet sähköautoille	80
4.2.4	Huomioita henkilöliikennemallista	83
4.3	Tavaraliikenne	84
4.3.1	Lähtötiedot	84
4.3.2	Laskentaprosessi ja laskennan oletukset	86
4.3.3	Tulosten esittäminen	93
4.3.4	Laskentaesimerkit	94
4.3.4.1	Tieliikenteen EU-päästökauppa 2027 alkaen	94
4.3.4.2	Sähkö- ja kaasukuorma-autojen hankintatuki	96
4.3.4.3	Biopolttoaineiden jakeluvaihtoehtojen kasvattaminen	99
4.4	Laskentatulosten yhteenveto	101
5	Menetelmäkehikon arviointi	104
6	Päätelmät ja suositukset	108
6.1	Laskentamallien jatkokehitys	111
	Liitteet	114
	Liite 1: Kustannuskäsitteitä	114
	Liite 2: Tavarankuljetustilaston tavaralajien kohdistuminen toimialoille	116
	Liite 3: Sidosryhmätyöpajan tuloksia	118
	Lähteet	122

ESIPUHE

Tämä julkaisu on valtioneuvoston kanslian rahoittaman hankkeen ”Liikenteen päästö-
vähennystoimien kokonaistaloudellinen arviointi – HeeTRA” loppuraportti. Tutkimus-
hankkeen toteutti Tampereen yliopisto ja vastuullisena johtajana toimi professori Heikki
Liimatainen.

Tutkimusryhmä kiittää hankkeen ohjausryhmää kommenteista tutkimusprosessin aikana.
Ohjausryhmään kuuluivat Juha Tervonen (LVM, pj.), Saara Jääskeläinen (LVM), Atro
Andersson (VM), Riikka Siljander (YM) ja Pekka Sinko (VNK). Tutkimusryhmä kiittää myös
sidosryhmätyöpajoihin osallistuneita asiantuntijoita.

Raportissa kuvatut hankkeessa kehitetyt laskentatyökalut ovat saatavissa asiasta kiinnos-
tuneiden käyttöön. Voit pyytää työkalut käyttöösi täyttämällä lomakkeen osoitteessa:
<https://research.tuni.fi/verne/heetra/>

Tutkimusryhmän puolesta Heikki Liimatainen

1 Johdanto

Liikenteen kasvihuonekaasupäästöt olivat vuonna 2020 reilun viidenneksen Suomen kokonaispäästöistä, noin 10,5 miljoonaa CO₂-tonnia. Tästä 95 % aiheutui tieliikenteestä ja tieliikenteen sisällä puolestaan henkilöautojen osuus on yli puolet, kuorma-autojen osuus noin kolmannes, pakettiautojen noin 10 % ja linja-autojen noin 5 %. Kansallisesta kasvihuonekaasupäästöjen inventaariosta kuitenkin puuttuvat kansainvälinen lento- ja meriliikenne, joilla on suuri merkitys suomalaisten globaaliin hiilijalanjälkeen. Kasvihuonekaasupäästöjen lisäksi liikenne aiheuttaa myös terveydelle haitallisia lähipäästöjä, kuten pienhiukkasia ja typenoksideja, joiden on arvioitu aiheuttavan Suomessa yli 200 ennenaikaista kuolemaa vuosittain. Tässä hankkeessa keskitytään kuitenkin Suomen sisäisen liikenteen hiilidioksidipäästöihin, erityisesti henkilö- ja kuorma-autojen päästöihin.

Vuonna 2021 valtioneuvosto hyväksyi fossiilittoman liikenteen tiekartan, jonka mukaan liikenteen hiilidioksidipäästöt pitäisi puolittaa vuoteen 2030 mennessä ja poistaa kokonaan vuoteen 2045 mennessä. Liikenneturvallisuuden osalta tavoitteet ovat valtakunnallisessa liikenneturvallisuusstrategiassa samanlaiset, liikennekuolemien puolittaminen vuoteen 2030 mennessä ja poistaminen kokonaan vuoteen 2050 mennessä. Samalla kuitenkin halutaan pitää huolta siitä, että ihmisten ja tavaroiden liikkumisen mahdollisuudet turvataan, jotta ei synny liikenneköyhyyttä, eli tilannetta, jossa yksilö ei voi toteuttaa päivittäisiä liikkumistarpeitaan kohtuullisin kustannuksin, kohtuullisessa ajassa, kohtuullisella vaivalla ja kohtuullisesti liikenteen ulkoisvaikutuksille altistuen. Valtakunnallisessa liikennejärjestelmäsuunnitelmassa kestävyuden, saavutettavuuden ja yhteiskuntataloudellisuuden suhteen asetetaan puolestaan seuraavat tavoitteet, jotka kaikki pyrkivät hillitsemään ilmastonmuutosta: ”Ihmisten mahdollisuudet valita kestävämpiä liikkumismuotoja paranevat – erityisesti kaupunkiseuduilla”, ”Liikennejärjestelmä takaa koko Suomen saavutettavuuden ja vastaa elinkeinojen, työssäkäynnin ja asumisen tarpeisiin” ja ”Liikennejärjestelmän yhteiskuntataloudellinen tehokkuus paranee”

Fossiilittoman liikenteen tiekartan keskeisenä periaatteena on suunnitella ja valita toimia, jotka ovat mahdollisimman kustannustehokkaita, mutta toimenpiteiden valmistelussa kustannusvaikutusten tarkastelut eivät kuitenkaan ole olleet riittävän laajoja. Liikenne on välttämätöntä ihmisten hyvinvoinnille ja yritysten toiminnalle, mutta aiheuttaa samalla väistämättä haitallisia ulkoisvaikutuksia, joita kansalaiset ja yritykset eivät ota huomioon kulkutapa- ja kuljetusmuotovalinnoissa, ellei haittoja tehdä näkyviksi. Yhteiskunnalliseen päätöksentekoon liittyvän tavoitesidonnaisen hyöty-kustannustarkastelun tulee perustua

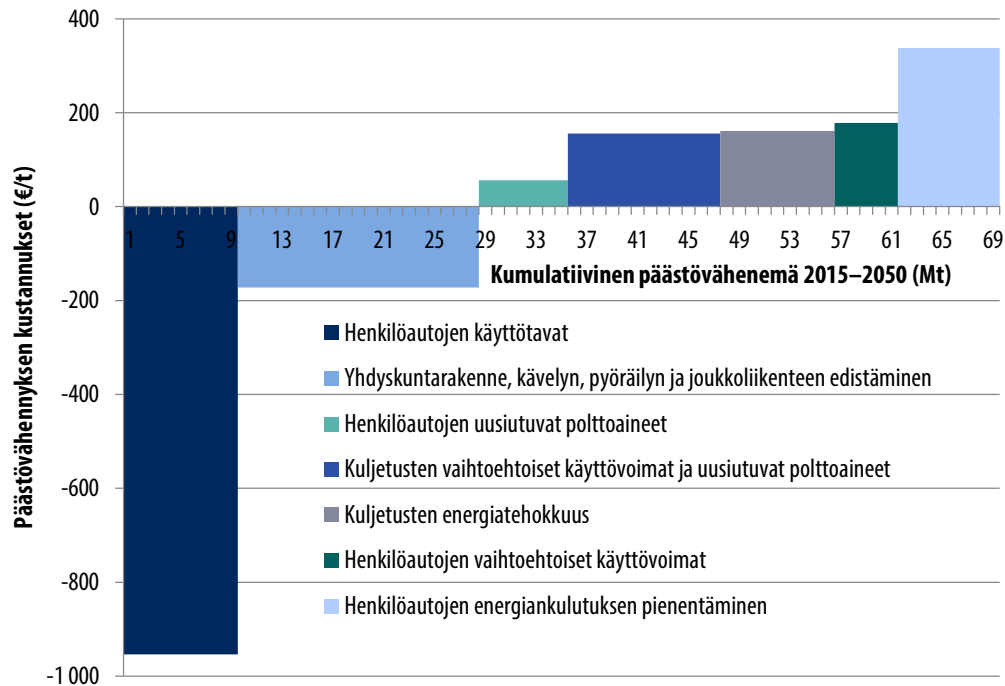
julkisten toimenpidekustannusten, kuluttajien, yritysten ja julkisen sektorin kohtaamien negatiivisten ja positiivisten kustannusvaikutusten kokonaisvaltaiseen arvioimiseen. Kokonaistaloudelliset tarkastelut auttavat myös julkisten toimien oikean mitoituksen ja tehokkaan kohdentamisen määrittämisessä.

1.1 Liikenteen päästövähennystoimien aiempi taloudellinen arviointi Suomessa

1.1.1 Toimenpidekokonaisuuksien vaikutusten arviointi Suomen tasolla

Toistaiseksi merkittävin Suomessa tehty tutkimus, jossa liikenteen päästövähennystoimenpiteiden kustannustehokkuudesta on tuotettu tietoa, on Suomen Ilmastopaneelille tehty selvitys: Tarve, tottumukset, tekniikka ja talous – ilmastonmuutoksen hillinnän toimenpiteet liikenteessä (Liimatainen ym. 2015; 2018). Ilmastopaneelin selvityksen tärkeimmät johtopäätökset olivat seuraavat:

Kokonaisuutena alla olevan kuvan 1 mukaisella suositusskenaariolla, joka sisältää yhdyskuntarakenteen muutoksia, kulkutapasiirtymiä ja autonomistuksen muutoksia, ilmasto-toimenpiteiden kustannukset ovat 21,2 mrd. € ja hyödyt 24,7 mrd. €. Kumulatiivinen päästövähennemä 2015–2050 on 68 Mt ja päästövähennysten kustannukset ovat -52 €/t (negatiivinen arvo tarkoittaa, että hyödyt ovat kustannuksia suuremmat). Teknologia-skenaariossa yhdyskuntarakenne ja henkilöautojen käyttötavat eivät muutu, jolloin kustannukset ovat 19 mrd. € ja hyödyt vain 3,7 mrd. €. Kumulatiivinen päästövähennemä 2015–2050 on 68 Mt ja päästövähennysten kustannukset ovat 225 €/t:

Kuvio 1. Liikenteen päästövähennystoimenpiteiden kustannustehokkuus (Liimatainen ym. 2015).

Tarkastelussa on otettu huomioon mm. liikenne- ja energiainfrastruktuurin kustannukset, terveysvaikutukset, autojen hankinnan ja omistamisen kustannukset sekä energiakustannukset. Selvityksen resursseilla ei ollut mahdollista tarkastella yksittäisten toimenpiteiden ja politiikkasuositusten päästövaikutuksia, kustannuksia ja hyötyjä. Työssä luotu menetelmä kuitenkin mahdollistaa tällaisten tarkastelujen tekemisen jatkossa.

Ilmastopaneelin selvityksen resursseilla ei ollut mahdollista laskea rahallisesti kustannusten ja hyötyjen jakautumista kotitalouksille, yrityksille ja julkiselle sektorille. Periaatteessa kustannusten ja hyötyjen voidaan ajatella pitkällä aikavälillä kohdistuvan kotitalouksille, koska yritykset siirtävät kustannukset ja hyödyt tuotteiden hintoihin ja julkinen sektori verotukseen ja maksuihin. Esimerkkejä kustannusten ja hyötyjen välittömien vaikutusten jakautumisesta on kuitenkin hahmoteltu taulukossa 1:

Taulukko 1. Liikenteen päästövähennystoimenpiteiden hyötyjen ja kustannusten kohdentuminen (muokattu Liimatainen ym. 2015).

Toimenpide-kokonaisuus	Kotitaloudet	Julkinen sektori	Yritykset
Yhdyskuntarakenne, kävely, pyöräily ja joukkoliikenne	Osa terveyshyödyistä, autojen hankinnan ja kiinteiden kustannusten säästöt, säästöt liikkumiskustannuksissa, energiansäästö	Osa terveyshyödyistä, joukkoliikenteen lipputulojen kasvu, infrastruktuurin tehokkaamman käytön kunnille tuomat säästöt, infrastruktuuri-investoinnit ja palvelutason parantamisen kustannukset, auto- ja ajoneuvoverotulojen pieneminen	Joukkoliikenteen liikennöitsijöiden tulojen kasvu, yritysten edullisemmat liikkumiskustannukset, autokaupan tulojen pienentyminen, energian myynnin tulojen pienentyminen
Henkilöautojen käyttötavat, kimppekyydit, yhteiskäyttöautot	Autojen hankinnan ja kiinteiden kustannusten säästöt, energiansäästö	Auto- ja ajoneuvoverotulojen pieneminen, vältetyt infrastruktuuri-investoinnit	Yhteiskäyttöauto- ja kimppekyyti-yritysten tulojen kasvu, autokaupan tulojen pienentyminen, energian myynnin tulojen pienentyminen
Henkilöautojen energiankulutuksen pienentäminen	Autojen hankinnan kustannusten kasvu, energiansäästö	Polttoaineverojen ja muiden liikenteen verojen pieneminen	Autokaupan tulojen kasvu, energian myynnin tulojen pienentyminen
Henkilöautojen vaihtoehtoiset käyttövoimat	Autojen hankinnan kustannusten kasvu, sähköautojen kotilatausinfrastruktuurin kustannukset, säästyneet energiakustannukset, jos siirrytään esim. bensiinistä sähköön	Polttoaineverojen ja muiden liikenteen verojen pieneminen	Autokaupan tulojen kasvu, vaihtoehtoisten energioiden myynnin tulojen kasvu, jakeluinfrastruktuuri-investoinnit, bensiinin ja dieselin myynnin tulojen pienentyminen

Toimenpide- kokonaisuus	Kotitaloudet	Julkinen sektori	Yritykset
Henkilöautojen uusiutuvat polttoaineet	Energiakustannusten kasvu	Polttoaineverojen pieneneminen	Energian myynnin tulojen kasvu
Kuljetusten energiatehokkuus		Kuljetusten energia- tehokkuusohjelman ja -tukien kustannukset	Tilajayritysten kuljetus- kustannusten pienentyminen, kuljetusyritysten energiansäästö, kuljetusyritysten kaluston hankinta- kustannusten kasvu
Kuljetusten vaihtoehtoiset käyttövoimat		Polttoaineverojen pieneneminen	Kuljetus- yritysten energia- kustannusten kasvu

1.1.2 Toimenpidekokonaisuuksien vaikutusten arviointi kaupunkiseutujen tasolla

Liikenneturvallisuuden ja liikenteen kansanterveydellisten vaikutusten rahallista arviointia on kehitetty kaupunkiseutujen tasolla aiemmassa VNK-hankkeessa (Tuominen ym. 2015). Työssä tarkasteltiin esimerkkikohteiden avulla joukkoliikennettä, kävelyä ja pyöräilyä edistävien julkisen sektorin toimenpiteiden ja yhdyskuntarakenteeseen kohdistuvien toimenpiteiden mahdollisuuksia vaikuttaa kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen sekä arvioitiin toimenpiteiden toteuttamisen kustannuksia ja hyötyjä vuoteen 2030 mennessä. Joukkoliikenteen, kävelyn ja pyöräilyn toimenpiteillä on Helsingin seudulla mahdollista saavuttaa arviolta n. 0,3 miljoonan tonnin vähenemä CO₂-päästöissä vuonna 2030 vuoteen 2014 verrattuna. Oulun seudulla potentiaali on huomattavasti pienempi, n. 56 000 tonnia. Joukkoliikennettä, kävelyä ja pyöräilyä edistävissä tavoitekehityksessä lisääntyneiden terveyshyötyjen ja parantuneen liikenneturvallisuuden nykyarvoksi arvioitiin Helsingin seudulla 210 milj. € ja Oulun seudulla 17 milj. € vuosina 2015–2030. Helsingin seudulle lasketut kävelyn ja pyöräilyn terveyshyödyt ovat suuremmat kuin pyöräilyn kehittämisohjelman investointikustannukset. Helsingin seudulla kolmen suurimman kunnan alueille keskittyvien joukkoliikenteen kehittämistoimenpiteiden kustannukset ovat huomattavat. Kustannukset ovat korkeat, koska alueen kehittyminen edellyttää suunnitelmien mukaan mittavia raideliikenteen infrastruktuuri-investointeja sekä joukkoliikenteen tarjonnan lisäämistä. Laskelmien mukaan toimenpiteiden hiilidioksidipäästöjä

alentava vaikutus on kuitenkin varsin maltillinen. Investointien ja muiden toimenpiteiden kustannuksia on näin ollen vaikea perustella pelkästään hiilidioksidipäästöjen vähenemisellä ja sen taloudellisella merkityksellä. Päästöjen väheneminen syntyykin seudun kehitykselle välttämättömien liikennepalvelujen kehittämisen sivutuotteena. Oulun seudun esimerkki kertoo myös, että ainoastaan ilmastopolitiikan näkökulmasta tarkasteltuna joukkoliikenteen ja kevyen liikenteen kehittäminen ei ole erityisen kustannustehokasta. Toimenpiteet kohdistuvat suhteelliseen pieniin väestömääriin. Päästöjen vähentämisen yksikkökustannuksia (euroa/tonni per toimenpide) ei ollut mahdollista laatia. Sellainen olisi helpommin mahdollista tarkastelemalla yksittäisille toimenpiteille tehtyjä kannattavuusarvioita ja vertailemalla niistä laskettuja päästöjen vähenemisiä ja toimenpidekustannuksia.

1.1.3 Yksittäisten toimenpiteiden vaikutusten arviointi

Yksittäisten päästövähennystoimenpiteiden vaikutusten arviointia liikenteen osalta on Suomessa tehty muun muassa keskipitkän aikavälin ilmastosuunnitelmiin (KAISU) ja fossiilittoman liikenteen tiekarttaan liittyen. Suomen Ilmastopaneelin muistio (Ollikainen ym. 2016) ehdotti KAISUn laatimisen ohjenuoraksi kustannustehokkuuden ja nettovaikutusten periaatteiden yhdistämistä taulukossa 2 kuvatulla tavalla:

Taulukko 2. Päästövähennystoimenpiteiden vaikutusten arvioinnin vaiheet ja periaatteet (Ollikainen ym. 2016).

Vaihe	Periaatteet
Päästöjen ennustaminen	Päästöjen perusradan ennustaminen on välttämätöntä. Perusura tarkoittaa kehitystä ilman politiikkatoimenpiteitä.
Sektorikohtaiset toimenpiteet	Kukin sektori määrittää toimenpidevalikoiman ja niistä saatavan päästövähennyksen sekä kustannusten kohdentumisen. Tavoitteena on sektorikohtainen malli, joka tuottaa kokonaiskustannus- ja rajakustannusfunktiot päästövähennysten suhteen, kuitenkin vähintään toimenpiteiden €/t-kustannustvaikuttavuusluvut. Kustannukset esitetään reaalikustannuksina, eli ilman veroja ja tukiaisia. Herkkyystarkastelut ovat tarpeen.
Ohjauskeinojen arviointi	Kukin sektori arvioi ja ehdottaa, mitkä ohjauskeinot ovat tarpeen kunkin toimenpiteen toteuttamiseksi. Hintaohjauksessa on tärkeää arvioida, kuinka toimijat reagoivat ohjauskeinoon. Ohjauskeinojen vaikutukset julkisen vallan budjettiin arvioidaan.

Vaihe	Periaatteet
Toimien valinta	Toimenpiteet valitaan ohjelmaan edullisuusjärjestyksessä eri sektoreilta, kunnes päästöjen vähentämistavoite saavutetaan. Edullisuus määrittyy ideaalitulanteessa rajakustannusrasituksen mukaan, tai €/t-tiedon mukaan. Toimenpiteiden tulee olla pitkän aikavälin (2050) päästövähennyspolun mukaisia.
Toimien riittävyys ja kokonaistaloudellisuus	Arvioidaan, riittävätkö kultakin sektorilta poimitut toimenpiteet kokonaistavoitteen saavuttamiseen. Koko ohjelman kokonaistaloudelliset vaikutukset voidaan määrittää yleisen tasapainon mallilla, mutta tämä ei korvaa sektorikohtaisten kustannusten analyysiä.
Sosiaalinen hyväksyttävyys	Ilmastotoimien sosiaalinen hyväksyttävyys voi olla merkittävä voimavara tavoitteiden saavuttamisessa. Kyselyillä ja haastatteluilla voidaan kartoittaa hyväksyttävyyttä ja sektorikohtaiset tarkastelut voivat tuottaa täsmällistä tietoa sosiaalisista voimavaroista eri sektoreilla.

Semkin ym. (2019) puolestaan erittelevät päästövähennysten kustannustehokkuuden laskennan yleisiä osakokonaisuuksia ja tärkeimpiä kysymyksiä kuvassa 2 esitetyllä tavalla:

Kuvio 2. Liikenteen päästövähennystoimenpiteiden kustannustehokkuuden laskennan osakokonaisuudet ja tärkeimmät kysymykset (Semkin ym. 2019).

Osakokonaisuus	Kysymykset
Toimenpidearvioinnin tavoite	Onko arvioinnin tavoitteena vertailla toimenpiteiden kustannustehokkuutta, arvioida toimenpiteestä aiheutuvia kustannuksia vai suunnitella ohjauskeinoja?
Tarkastelujakso	Vertaillaanko päästövähennyksiä nykytasoon, vai tiettyyn ajanhetkeen? Mikä on tarkastelun ajanjakso?
Perusura ja skenaariot	Miten muodostetaan perusura? Mitä oletuksia tehdään teknologian kehityksen ja maailmantalouden suhteen? Miten muodostetaan vastaskenaario, jolla arvioidaan päästövähennyksiä perusuraa vasten?
Laskenta- ja mallinnusmenetelmät	Valitaan soveltuva laskentamenetelmä toimenpiteiden, interaktioiden ja sektorin huomioon ottaen. Mitä kustannustehokkuuden arviointimalleja on?
Ristikäis- ja epäsuorat vaikutukset	Mitkä ovat keskeisimmät interaktiot toimenpiteiden välillä sektorien välillä? Onko kompensatiovaikutuksia, aikavaikutuksia, polkuriippuvuuksia? Millä tavalla toimenpiteet vaikuttavat toisiinsa päästövähennys-/kustannusnäkökulmasta?
Kustannusnäkökulma	Millä tasolla kustannuksia arvioidaan? Arvioidaanko kustannusten kohdentumista yksilöille tai valtiolle? Millä korolla kustannuksia diskontataan?
Tulosten esittäminen Muiden hyötyjen tarkastelu	Millä tavalla tulokset esitetään? Käytetäänkö MAC-käyriä? Tarkastellaanko muita hyötyjä, kuten pienhiukkaspäästöjä tai laajempia kansantaloudellisia hyötyjä, kuten työllisyyttä?

Semkin ym. (2019) esittävät liikenteen päästövähennystoimenpiteen kustannustehokkuudesta esimerkkilaskelman sähköautoista, jossa kustannustehokkuus (€/t) on saatu jakamalla kokonaispäästövähennykset kustannusten nettonykyarvolla. Kokonaispäästövähennykset on puolestaan laskettu kertomalla sähkö- ja polttomoottoriautojen päästökertoimet näiden autojen lukumäärillä vuosittain ja vertaamalla päästöjä perusuraan. Kustannukset on laskettu kertomalla autotyyppien hankinta- ja käyttökustannukset autotyyppien lukumäärällä vuosittain, vertaamalla kustannuksia perusskenaarioon ja jakamalla kustannusero diskonttokorolla. Semkin ym. mukaan ei ole yhtä oikeaa menetelmää arvioida päästövähennystoimenpiteiden kustannustehokkuutta, mutta hyvä tapa on yhdistää sektorikohtaisia kustannustehokkuusmalleja ja tämän jälkeen arvioida kansantaloudelliset vaikutukset yleisen tasapainon malleilla. Näin erityisesti liikennesektorilla, jolla on huomattava määrä epäsuoria kansantaloudellisia vaikutuksia. Myös avoimuuden lisääminen avaamalla lähtötiedot, oletukset ja laskentamenetelmä on Semkinin ym. mukaan hyvin tärkeää kustannustehokkuuslaskennassa.

Keskipitkän aikavälin ilmastopolitiikan suunnitelman, KAISUn, (Ympäristöministeriö 2022) taloudellisten vaikutusten arvioinnissa ei ole noudatettu Ilmastopaneelin tai Semkinin ym. suosituksia. Taloudellisia vaikutuksia on tarkasteltu kokonaisuutena yleisen tasapainon mallilla, mutta sektorikohtaisia malleja ei ole käytetty, eikä €/t-kustannusvaikuttavuuslukuja ole esitetty. Liikennesektorin osalta KAISUn politiikkatoimenpiteet perustuvat Valtioneuvoston periaatepäätökseen kotimaan liikenteen päästöjen vähentämisestä, eli fossiilittoman liikenteen tiekarttaan (Liikenne- ja viestintäministeriö 2021).

Fossiilittoman liikenteen tiekartan vaikutusten arvioinnissa (Valtioneuvosto 2022) on hyödynnetty arviointilomaketta, jossa on pyritty ottamaan huomioon seuraavat näkökulmat:

ekologinen kestävyys

- CO₂
- luonnonvarat ja materiaalitehokkuus
- ilmanlaatu ja melu
- vedet ja maaperä
- ihmisten terveys ja elinolot

taloudellinen kestävyys

- julkinen talous
 - valtion tulot ja menot liikenteestä
 - kuntien tulot ja menot liikenteestä
- kansantalous
 - elinkeinojen kustannukset ja kilpailukyky
 - kotitalouksien kustannukset ja kilpailukyky
 - Suomen kansainvälinen kilpailukyky

- työllisyys
 - toimenpiteen toteutuksen aikainen työllistävyys
 - toimenpiteen pitkäaikainen työllistävyys
 - työmarkkinoiden toiminta

sosiaalinen kestävyys

- liikkumisen mahdollisuudet
- oikeudenmukaisuus eri väestöryhmien kannalta
- oikeudenmukaisuus eri alueiden kannalta
- haittojen kompensointi

Vaikutusten arviointilomakkeita ei kuitenkaan ole täytetty kaikilta osin. Suurimmassa osassa toimenpiteitä ei ole pystytty arvioimaan kuin pieni osa vaikutuksista. Vaikutusten arvioinnin yhteenveto esittää määrälliset arviot toimenpiteiden päästövähennyksistä vuonna 2030 ja kumulatiiviset kustannukset valtiolle vuoteen 2030 mennessä sekä sanalliset arviot kustannuksista kunnille, yrityksille ja kotitalouksille sekä muista ympäristövaikutuksista ja muista vaikutuksista (mm. alueelliset vaikutukset, kilpailukyky ja työllisyys). Määrällisten tietojen perusteella esitetään osasta toimenpiteitä €/päästötonni-kustannusvaikuttavuusarvio, joka on Ilmastopaneelin suosituksiin nähden virheellinen kahdella tapaa: 1) päästövähennysvaikutus on vain vuoden 2030 päästövähennys, eikä toimenpiteen elinkaarelle kumulatiivinen, 2) kustannusvaikutus sisältää vain välittömät valtiontaloudelliset kustannukset (tuot ja veromuutokset), eikä kumulatiivisia kotitalouksiin ja yrityksiin kohdistuvia kokonaistaloudellisia vaikutuksia.

1.2 Tavoitteet

Hankkeen tarkoituksena on tuottaa yleisesti käyttökelpoinen systemaattinen menetelmäkehikko ja suositukset siitä, millä kattavuudella ja miten liikenteen päästövähennystoimien taloudellisia vaikutuksia tulee arvioida kokonaisvaltaisesti ja toimien elinkaaren pituudelta. Hankkeen lopputuloksena syntyy liikennesektorin ilmastopoliittisten toimenpiteiden kustannusvaikutusten ja kustannustehokkuuden kokonaisvaltaiseen tarkasteluun soveltuva menetelmäkehikko ja ohjeet laskennan suorittamisesta ja toimenpiteiden vertailemisesta. Kehikon toimivuus varmistetaan soveltamalla sitä todellisten päästöjä vähentävien politiikkatoimien kustannusvaikutusten tarkasteluun ja tulosten vertailemiseen muissa hankkeissa saatuihin tuloksiin. erityisesti hankkeen tarkoituksena on tuottaa tarvittavat tiedot ja ohjeistukset, joiden avulla valtionhallinto voisi jatkossa itse tehdä päästövähennystoimien taloudellisia tarkasteluja laaditun kehikon avulla.

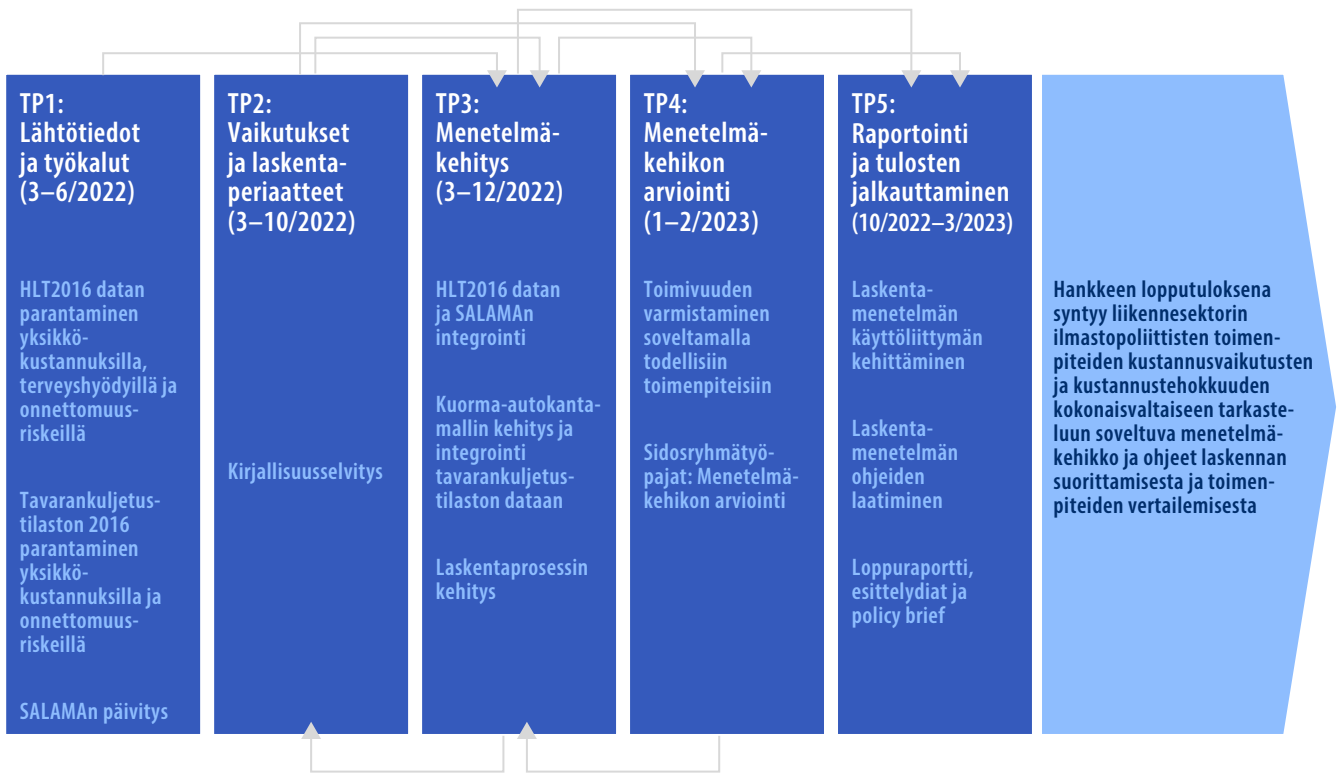
Tutkimuksen tavoitteena on vastata seuraaviin teemakuvauksessa esitettyihin tutkimuskysymyksiin:

1. Missä laajuudessa liikenteen ilmastopoliittisten toimenpiteiden kustannustenvaikutusten tarkastelu tulisi tehdä ja miten tarkasteltavia vaikutuksia ja vaikutusten ilmenemistä tulisi rajata?
2. Miten toimenpiteiden toteuttamiskustannuksia tulee kohdentaa nimenomaan päästöjen vähentämisen kustannuksiksi toimenpiteen muihin mahdollisiin vaikutuksiin nähden?
3. Tuleeko julkisia ja yksityisiä panostuksia sekä julkisia ja yksityisiä kustannusvaikutuksia käsitellä kokonaiskustannusten tarkasteluissa eri tavoin?
4. Kuinka kustannusten tulevia vaihteluita ja siihen liittyvää epävarmuutta tulisi hallita kokonaiskustannusten laskennassa?
5. Minkälainen kustannusvaikutusten tarkastelun ja vertailemisen laskentateknisen toteutuksen tulee olla yleisperiaatteiltaan ja laskentasääntöinä?
6. Miten tulisi ottaa huomioon eri toimenpiteiden vaikutukset Suomen pidemmän aikavälin kilpailukykyyn ja talouskehityksen kestävyys?

1.3 Tutkimusprosessi

Tutkimuksessa kehitetään edelleen Ilmastopaneelin selvityksessä (Liimatainen ym. 2015) luotuja työkaluja. Alla esitettävän kuvan 3 mukaisesti hanke käynnistyi Ilmastopaneelin selvityksessä käytettyjen työkalujen päivityksellä (TP1) ja jatkui menetelmäkehityksellä (TP3), johon liittyi kirjallisuusselvitys (TP2), jossa etsittiin sekä laskennassa käytettäviä lähtötietoja, kuten liikenteen päästövähennystoimenpiteiden kustannuksia, hyötyjä ja päästövaikutusarvioita, että laskentaperiaatteita esimerkiksi hyötyjen ja kustannusten kohdentumisen ja rajoitusten suhteen. Ohjausryhmän kautta hankkeessa kehitetyn menetelmäkehikön toimivuutta arvioitiin ministeriöissä projektin aikana ja projektin loppuvaiheessa myös sidosryhmät arvioivat menetelmäkehikkoa kahdessa työpajassa (TP4). Menetelmäkehitykseen liittyi myös (TP5) laskentamenetelmän käyttöliittymän (excel-laskentapohja) ja ohjeistuksen laatiminen:

Kuvio 3. Hankkeen työpaketit ja osatehtävät.



2 Liikenteen taloudellinen merkitys

Liikenteellä ja kuljetuksilla on suuri merkitys julkiselle taloudelle, kotitalouksille ja yritystaloudelle. Polttoainekustannusten osuus on merkittävä kotitalouksien ja yritysten liikennemenoissa ja vastaavasti polttoaineverojen osuus merkittävä julkisen talouden tuloissa. Tämän vuoksi liikenteen ja kuljetusten kustannuksiin vaikuttavilla päästövähennystoimenpiteillä on todennäköisesti taloudellisia vaikutuksia, joiden suuruusluokka ja kohdentuminen on tarpeen ymmärtää. Seuraavassa esitetään lyhyt katsaus liikenteen taloudellisesta merkityksestä julkisen talouden, kotitalouksien ja yritysten kannalta.

2.1 Liikenne ja julkinen talous

Liikenteellä on suuri merkitys julkiselle taloudelle sekä valtion että kuntien näkökulmasta. Valtion näkökulmasta liikenteeseen suoraan kohdistuvien verojen tuotto on ollut noin 4,5 mrd. € vuodessa, mikä vastaa noin 10 prosenttia valtion verotuloista (VM 2021). Lisäksi verotuottoihin voidaan laskea liikenteeseen liittyviä arvonlisäveroja muun muassa auto-kaupasta (Autoalan tiedotuskeskus 2022a). Kuntien näkökulmasta liikenteestä saadaan tuloja pysäköintimaksujen ja joukkoliikennelippujen myynnistä. Kuntien joukkoliikenteen lipputulot ovat olleet noin 400 milj. € vuodessa (Tilastokeskus 2022).

Liikenteestä aiheutuu kustannuksia julkiselle taloudelle liikenneväylien rakentamisesta, liikennöitävänä pidosta ja liikenteestä aiheutuvan kulumisen korjauksista. Kehittämiss-hankkeisiin on Suomessa käytetty noin 0,5 mrd. € vuodessa ja perusväylänpitoon noin 1,4 mrd. € vuodessa, joiden lisäksi kunnat käyttävät liikenneväylien rakentamiseen ja ylläpitoon noin 1,5 mrd. € vuodessa. erilaisiin avustuksiin ja palveluihin, kuten joukkoliikenteen, kävelyn ja pyöräilyn tukiin ja yksityistieavustuksiin, on käytetty 0,2 mrd. € vuodessa. (VLJS 2021, Traficom 2022.) Joukkoliikenteeseen kohdistuu myös kuntien suoraa rahoitusta 0,3 mrd. € vuodessa ja valtion ja kuntien maksamia sote-, kela- ja opiskelumatkojen matkakustannusten korvauksia 0,7 mrd. € vuodessa (Tilastokeskus 2022a). Lisäksi liikenteestä aiheutuu ulkoisia kustannuksia päästöistä, melusta ja onnettomuuksista. Päästökustannusten, kuten hiukas- ja typenoksidipäästöjen sekä CO₂-päästöjen, suuruudeksi on arvioitu noin 0,9 mrd. € vuodessa (Gynther ym. 2012) ja onnettomuuskustannuksiksi 1,2 mrd. € vuodessa (Traficom 2022).

Yllä mainittujen julkisten tulojen ja kustannusten lisäksi liikenteeseen kohdistuu suuri joukko erilaisia vero-ohjauksen välineitä, jotka vaikuttavat liikkujien kokemaan eri liikennemuotojen kustannuksiin ja siten kulkutapavalintoihin. Verotuista merkittävimpiä ovat dieselpolttoaineen alennettu polttoaineveron taso (0,8 mrd. €), työmatkakulujen vähennykset tuloverotuksessa (0,7 mrd. €), hiilidioksidipäästöjen mukaan porrastettu ajoneuvoverotus (0,4 mrd. €) ja joukkoliikenteen alennettu arvonlisäveron taso (0,3 mrd. €) (VM 2021b).

2.2 Liikenne ja kotitalouksien kulutus

Liikkumisen kohtuuhintaisuus (transport affordability) tarkoittaa sitä, että kotitalouksilla on varaa maksaa liikkuminen päivittäisten tarpeiden kannalta keskeisiin paikkoihin, kuten oppilaitoksiin, työpaikoille, kauppoihin ja terveydenhuoltoon. Monet kotitaloudet kuitenkin käyttävät liikkumiseen enemmän rahaa kuin olisi välttämätöntä, koska esimerkiksi henkilöautolla liikkuminen koetaan helpommaksi kulkutavaksi, vaikka joukkoliikenteellä olisi mahdollista tehdä sama matka henkilöauton kiinteät kustannukset huomioon ottaen halvemmalla. (Litman 2021)

Liikkumisen kohtuuhintaisuutta arvioidaan usein jakamalla liikkumisen kustannukset joko kotitalouden käytettävissä olevilla tuloilla tai kokonaiskulutuksella, jolloin liikenteen kohtuuhintaisuuden raja-arvo asettuu usein 10 % ja 20 % välille riippuen käytetystä määritelmästä, lasketavasta ja muista tekijöistä, kuten tarkasteltavasta maasta (Dewita ym. 2020; Tiznado-Aitken ym. 2022). On kuitenkin syytä ottaa huomioon, että jos keskitytään ainoastaan kulutuksen tarkasteluun, jää liikkumistarpeiden tarkastelu huomioimatta. Jotkut kotitaloudet saattavat joutua rajoittamaan liikkumistaan, jotta liikkumisen kustannukset eivät kohoja liian suuriksi, jolloin liikkumiseen käytetty kulutus näyttäytyy pienempänä kuin liikkumiseen olisi oikeasti tarve kuluttaa päivittäisten tarpeiden saavuttamiseksi. (Lucas ym. 2016)

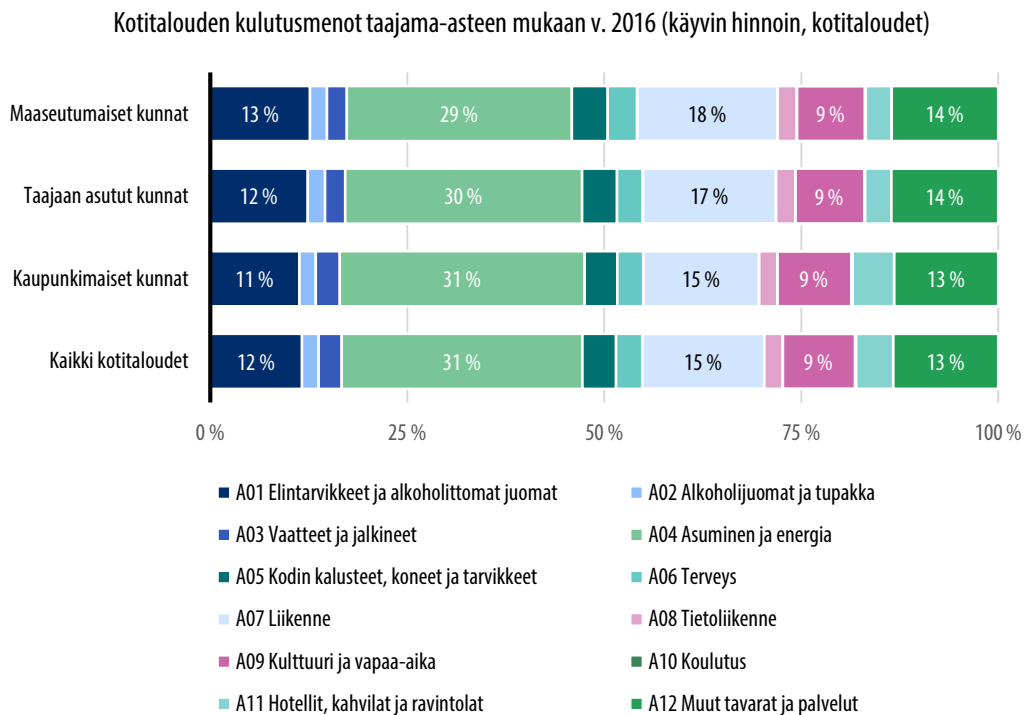
Seuraavaksi tarkastellaan kotitalouksien kulutuksen (Kotitalouksien kulutus 2016) jakautumista erityisesti liikenteen¹ osalta. Arvioitaessa kotitalouksien liikkumiskustannuksia on kuitenkin tärkeää ottaa huomioon sekä liikkumisen että asumisen kustannukset, sillä asuinpaikka ja liikkumismahdollisuudet ovat yhteydessä toisiinsa (Lucas ym. 2016; Dewita

1 Vain ryhmässä A07 Liikenne esitetyt kulut on laskettu tarkasteluun mukaan. On kuitenkin hyvä havaita, että jotkin liikenteeseen liittyvät kulut esiintyvät osana toista ryhmää. Liikenteeseen (ryhmä A07) kuuluvat ulkomaanmatkojen matkaliput, mutta valmismatkat (luokka A096) kuuluvat kulttuuri- ja vapaa-ajan piiriin. Lisäksi liikenne- ja matkavakuutukset kuuluvat luokkaan A1244, ajoneuvovero luokkiin A1291103, A1291104 ja A1291106, liikennesakot luokkaan A1292101 ja autolainojen korot luokkaan A1293202.

ym. 2020; Tiznado-Aitken ym. 2022). Arvion mukaan liikkumisen ja asumisen kohtuuhintaisuuden raja-arvo on 45 % kulutuksesta tai tuloista (Litman 2021). Liikkumisen kustannuksiin liittyviä politiikkapäätöksiä tulisivat tehdä yhdessä maankäyttöön liittyvien päätösten kanssa. Nämä päätökset vaikuttavat myös aikaköyhyyden syntymiseen. Liikkumiskustannuksia selittävät parhaiten sosio-demografiset muuttujat, kotitalouden rakenne ja rakennettu ympäristö. On havaittu, että hyvällä julkisella liikenteellä pysyytään tehokkaasti pienentämään liikkumiskustannuksia. (Tiznado-Aitken ym. 2022)

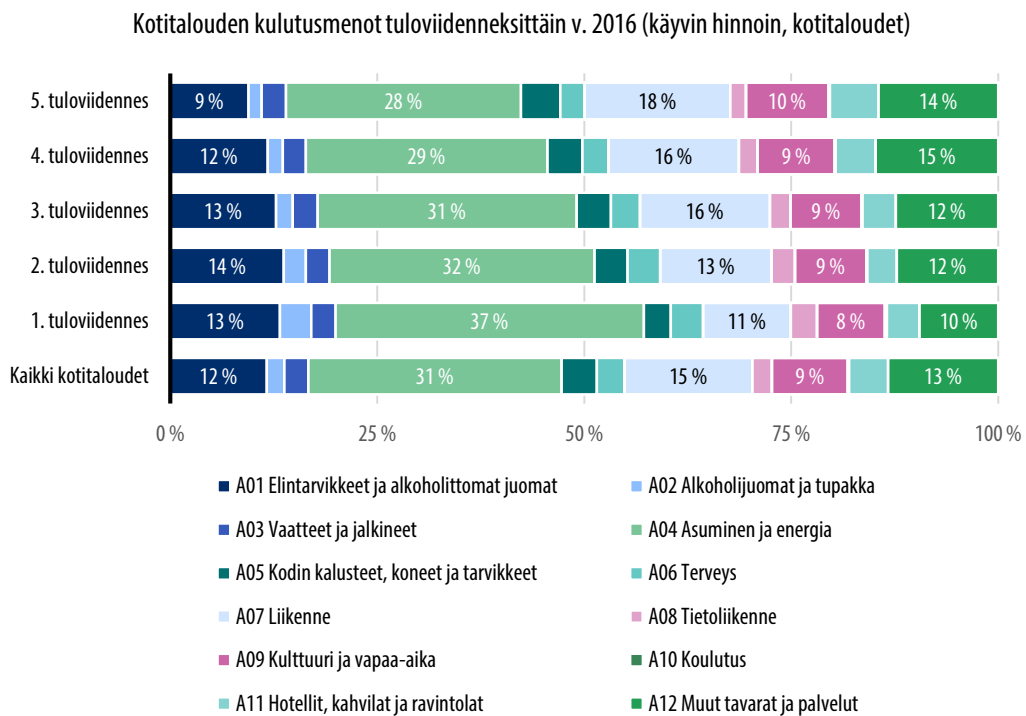
Kotitalouksien kulutus (2016) -tilaston mukaan suomalaisten kotitalouksien kulutuksesta keskimäärin 15 % kohdistuu liikenteeseen ja 31 % asumiseen ja energiaan. Kun tilannetta tarkastellaan taajama-asteen mukaan (kuvio 4), niin havaitaan, että siirryttäessä kaupunkimaisista kunnista maaseutumaisiin kuntiin liikenteen osuus kulutusmenoista kasvaa ja asumiseen ja energiaan käytetty osuus pienenee (Tilastokeskus 2016):

Kuvio 4. Kotitalouden kulutusmenot taajama-asteen mukaan (Tilastokeskus 2016).



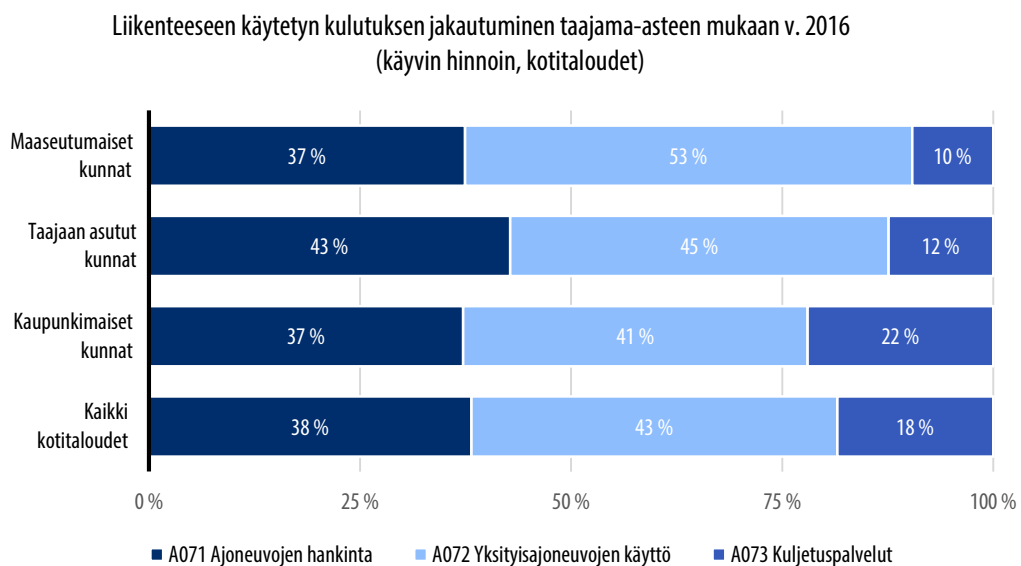
Tarkasteltaessa kotitalouksien kulutusta tuloviideneksittäin (kuvio 5) havaitaan, että liikenteeseen käytetty osuus kulutuksesta kasvaa mitä suurempaan tuloryhmään siirrytään, kun taas asumisen ja energian osuuden suhteen tilanne on päinvastoin (Tilastokeskus 2016):

Kuvio 5. Kotitalouden kulutusmenot tuloviideneksittäin (Tilastokeskus 2016).



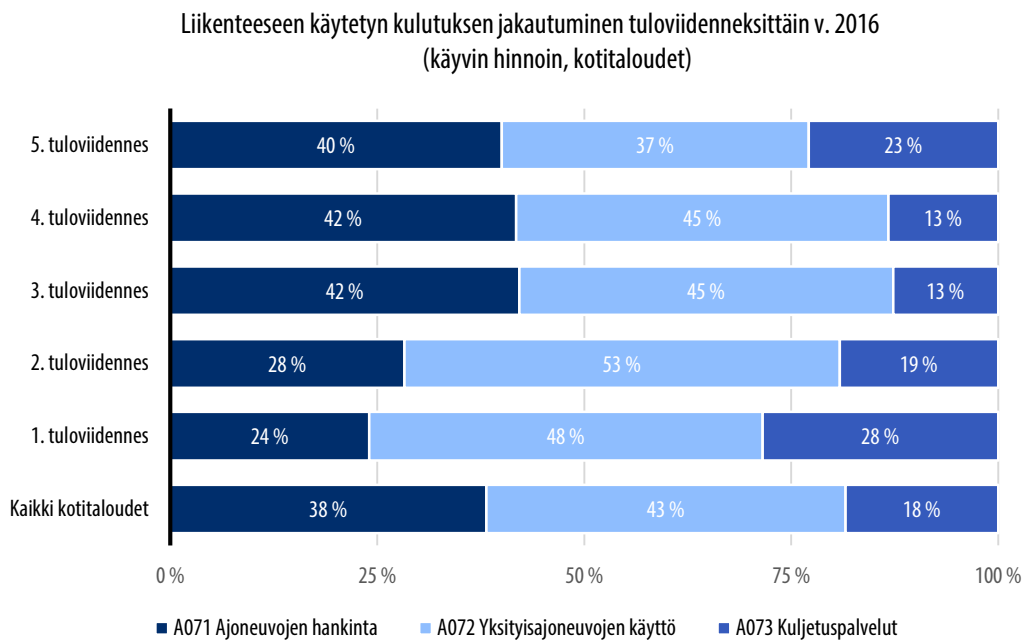
Jos tarkastellaan liikenteeseen käytetyn kulutuksen jakautumista ajoneuvon hankintaan, yksityisajoneuvon käyttöön sekä kuljetuspalveluihin (kuvio 6) huomataan, että yksityisajoneuvon käytön osuus liikenteeseen käytetystä kulutuksesta kasvaa siirryttäessä kaupunkimaisista kunnista maaseutumaisiin kuntiin. Sen sijaan kuljetuspalveluiden osuus liikenteeseen käytetystä kulutuksesta on suurempi kaupunkimaisissa kunnissa (Tilastokeskus 2016):

Kuvio 6. Liikenteeseen käytetyn kulutuksen jakautuminen taajama-asteen mukaan (Tilastokeskus 2016).



Tarkasteltaessa liikenteeseen käytettyjen kulutusmenojen jakautumista ajoneuvon hankintaan, yksityisajoneuvon käyttöön sekä kuljetuspalveluihin tuloviideneksittäin (kuvio 7) havaitaan, että kahdessa alimmassa tuloviidenneksessä ajoneuvon hankinnan osuus liikenteen kulutusmenoista on selvästi pienempi kuin kolmessa ylimmässä tuloviidenneksessä. Sen sijaan yksityisajoneuvon käytön osuus on suurempi pienemmissä tuloviidenneksissä. Alimmassa tuloviidenneksessä myös kuljetuspalveluiden osuus on selvästi muita tuloviidenneksiä suurempi (Tilastokeskus 2016):

Kuvio 7. Liikenteeseen käytetyn kulutuksen jakautuminen tuloviideneksittäin (Tilastokeskus 2016).



2.3 Logistiikka ja yritystalous

Logistiikkaselvityksen (2020) mukaan suomalaisten teollisuuden ja kaupan yritysten logistiikkakustannukset ovat noin 13 % yritysten liikevaihdosta. Logistiikkakustannukset muodostuvat kuljetuskustannuksista (5 %), varastoon sitoutuneen pääoman kustannuksista (4 %), varastointikustannuksista (2 %), hallintokustannuksista (1 %) ja muista logistiikkakustannuksista (1 %). Kuljetuskustannuksiin vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi (Rodrigue 2022) tuotteen ominaisuudet, kaupan epätasapaino, maantiede, liikenneinfrastruktuuri, kuljetusmuotojen toimintaolosuhteet sekä markkinaolosuhteet ja sääntely.

Kuljetuksissa vallitsee useimmiten suuruuden ekonomia, eli suurten tavaraerien kuljettaminen kerralla alentaa kuljetuskustannuksia kuljetusyksikköä kohti. Toisaalta suuret tavaraerät heikentävät sopeutumiskykyä muuttuviin asiakasvaatimuksiin ja kasvattavat varastoinnin ja varastoon sitoutuneen pääoman kustannuksia. Tämän vuoksi logistiikan nykyinen toimintamalli perustuu laajalti juuri oikeaan tarpeeseen -periaatteeseen, jossa pyritään minimoimaan varastot. Tämä toimintamalli johtaa kuitenkin usein kuljettamisen suuruuden ekonomian ja esimerkiksi kuljetussuoritteiden kannalta epäoptimaalisiin tavaraeräkokoihin, jolloin kuljetusvälineitä ei voida lastata täyteen, mikä olisi päästöjen vähentämisen näkökulmasta toivottavaa. Varastojen minimointi voi myös johtaa toimitusvaikeuksiin poikkeustilanteissa, kuten viime vuosina on nähty pandemian ja Suezin kanavaan juuttuneen konttialuksen aiheuttamien häiriöiden myötä.

Suomen ulkomaankauppa perustuu käytännössä täysin merikuljetuksiin, erityisesti viennin osalta. Kotimaan kuljetuksissa puolestaan yli 80 % kuljetetusta tavaramäärästä ja lähes 70 % kuljetussuoritteesta kuljetetaan tiekuljetuksina (Tilastokeskus 2022b). Tiekuljetuksissa puolestaan 75 % kuljetussuoritteesta kuljetetaan kuorma-auton ja varsinaisen perävaunun muodostamilla ajoneuvoyhdistelmillä. Kuorma-autoliikenteen kustannusindeksin mukaan kustannuksista 47 % muodostuu palkkakustannuksista, 20 % polttoainekustannuksista, 13 % poistoista, 9 % korjaus- ja huoltokustannuksista ja 12 % muista pienemmistä kustannuseristä, kuten veroista ja vakuutuksista (Tilastokeskus 2022c10).

Polttoainekustannukset ovat siis noin viidennes kuorma-autojen kustannuksista ja kuljetusten energiakustannukset siten noin 1 % teollisuuden ja kaupan yritysten liikevaihtoon suhteutettuna. Moilasen ym. (2021) mukaan dieselin hinta voi nousta liikenteen päästövähennystavoitteiden saavuttamiseksi vuoteen 2030 mennessä noin 2,6 euroon per litra, mikä tarkoittaisi yli 50 % hinnannousua vuoden 2020 hintatasosta. Savikon ym. (2021) mukaan tällainen hinnannousu tarkoittaisi yli 350 milj. € nousua yritysten kustannuksiin (0,0–0,6 % yritysten kustannuksista teollisuustoimialasta riippuen) ja tieliikenteen tavarankuljetusten kustannukset nousevat 67 milj. €. Hinnannousun vuoksi arvonlisäys olisi 0,13 % pienempi kuin perusskenaariossa vuonna 2030. Kotimaan kuljetuskustannuksilla ja kuljetusten energiakustannusten päästövähennystoimista johtuvilla muutoksilla on siten yleisesti vähäinen merkitys yritysten kokonaiskustannuksiin ja kansantalouteen.

3 Päästövähennystoimien kustannustehokkuus

3.1 Kustannuskäsitteitä ja laskentamenetelmiä

Tutkitaan seuraavaksi terminologiaa ja metodologiaa, jota tutkimuskirjallisuudessa käytetään tieliikenteen kasvihuonekaasujen vähennystoimenpiteiden kustannuksia arvioitaessa. Katsauksemme hyödyntää erityisesti Kokin ym. (2011) ja Semkinin ym. (2019) kirjallisuuskatsauksia. Kokin ym. (2011) katsauksessa eritellään erilaisia metodologioita, joita käytetään tieliikenteen kasvihuonekaasujen vähennystoimenpiteiden kustannustehokkuutta arvioitaessa. Semkin ym. (2019) puolestaan jakavat päästövähennysten kustannustehokkuuslaskennan eri osakokonaisuuksiin, kun he tutkivat päästövähennystoimien kustannustehokkuuden arviointimenetelmiä Suomen taakanjakosektorilla.

Keskeinen käsite on yhteiskunnallinen kustannus. esimerkiksi OeCD:n julkaisema teos (OeCD 2006) on selkeä johdanto ympäristötalouden kustannus–hyötyanalyysiin. Kyseisessä teoksessa ensisijainen luku on luku viisi, joka käsittelee ympäristöpolitiikan ja erilaisten ympäristöhankkeiden aikaansaamia kustannuksia. Kirjan politiikkahyötyjä käsittelevät luvut ovat toissijaisia tämän hankkeen näkökulmasta. Tämä on seurausta siitä, että päästötavoite oletetaan jo ennalta päätetyksi. Tällöin pääasialliseksi kysymykseksi nousee päästötavoitteen saavuttaminen mahdollisimman pienin uhrauksin eli keskiöön nousee ympäristöpolitiikan kustannustehokkuus..

3.1.1 Kustannus

Päästöjen *perusura* tai *perusennuste* on arvio päästöjen kehitykselle nykyisen maailmantilanteen ja nykyisten ilmastopolitiikan toimenpiteiden vallitessa. Tälle kehitykselle voidaan esittää myös vaihtoehtoja, joissa politiikan toimenpiteet ovat entistä kunnianhimoisempia ja päästöjen määrä on entistä vähäisempi. Päästöjen perusuran ja vaihtoehtouran erotus on päästövähennysura, ja päästöjen vaihtoehtouran sisältämät toimenpiteet saavat aikaan päästövähennyskustannuksia.

Päästövähennysten kustannuksiksi tulee siis laskea ainoastaan ilmastopolitiikan toimenpiteiden seurauksena tapahtuneiden kasvihuonekaasuvähennysten kustannukset². Kustannusvaikutusten täsmällisen laskennan haasteena onkin, että liikkumispalveluita ja liikenneinfrastruktuuria kehitettäisiin todennäköisesti myös vaihtoehtoisessa maailmassa, jossa ei ole lainkaan päästövähennystarpeita. Näitä investointeja ei tule laskea päästövähennyksiksi. esimerkiksi pyöräilytiEVERKOSTOA kehitettäisiin todennäköisesti myös ilman päästövähennystavoitteita, eikä tämän suunnitelman mukaisia investointeja tule laskea päästövähennyksiin.

Liikenteen kasvihuonekaasupäästöjen perusennuste laaditaan huomattavien epävarmuuksien alaisuudessa. esimerkiksi koronaepidemia ja Ukrainan sota vaikuttavat voimakkaasti liikennepalvelujen kysyntään ja kustannuksiin. Yhtenä keskeisenä ajurina toimii energian hintaan kohdistuva suuri epävarmuus. Lisäksi epävarmuutta tuo jo päätettyjen päästövähennystoimien vaikuttavuus. erityisesti, kun ennustehorisontin pituus kasvaa, niin teknologian kehitykseen ja leviämiseen liittyvät kysymykset lisäävät sekä ennustearaan että vaihtoehtouraan liittyvää epävarmuutta³.

Päästövähennysten määrät siis tyypillisesti muuttuvat, kun tarkastelun ajankohta muuttuu. esimerkiksi syyskuussa 2021 päivitetyn perusennusteen mukaan liikenteen päästöt olisivat 7,5 Mt CO₂-ekv. vuonna 2030, joten tarvittava liikenteen lisäpäästövähennys on noin 1,25 miljoonan tonnia (Ympäristöministeriö 2022)⁴. Ilmeistä myös on, että kun sekä päästövähennysten määrä että maailmantilanne muuttuvat, niin myös päästövähennysten kustannukset tulevat muuttumaan.

Kun ilmastopolitiikassa tavoitellaan ennalta annettua päästötavoitetta, niin tyypillisesti ainoastaan tulevat päästöleikkaukset ja niiden kustannukset ovat mielenkiinnon kohteina. Tästä näkökulmasta menneiden tai jo päätettyjen toimenpiteiden kustannukset eivät enää ole relevantteja, eikä niitä tulisi ottaa mukaan kustannuslaskelmiin. Toki voimme arvioida myös menneisyyden hankkeita, niiden aikaansaamia vähennysmääriä ja kustannuksia.

-
- 2 On tietysti mahdollista, että harjoitettu ympäristöpolitiikka ei saavuta tavoitettaan. Tässä tapauksessa kustannuksia syntyy myös päästöjen ennakoitua suuremmista haitoista. Tämä kirjallisuuskatsaus keskittyy kuitenkin ainoastaan ympäristöpolitiikan aikaansaamien päästövähennysten kustannuksiin.
 - 3 Luonnollisesti ympäristöpolitiikan tavoite voi myös muuttua esimerkiksi uuden informaation myötä. Jos tavoite on entistä kunnianhimoisempi, niin tällöin päästövähennysten määrä kasvaa.
 - 4 VTT:n liikenteen kasvihuonekaasupäästöjen ennuste perustuu Liikenne- ja viestintäviraston, Väyläviraston ja Tilastokeskuksen keräämiin tilastoihin sekä arvioihin tulevasta. Tieliikenteen ennuste on laskettu VTT:n Lipasto-laskentajärjestelmän Aliisa-autokantamallilla. ennuste kattaa hiilidioksidipäästöt, joiden osuus liikenteen kasvihuonekaasupäästöistä on yli 95 prosenttia

Tämänkaltainen arviointi voi lisätä huomattavasti ymmärrystä sääntely-ympäristöstä ja olla omiaan tehostamaan tulevien toimenpiteiden toteutuksia. Huomionarvoista myös on, että osa aiemmin tehdyistä päätöksistä on luonteeltaan pysyviä, eli uudet päätökset tehdään jo olemassa olevien sääntelypäätösten vallitessa. esimerkiksi jo tehdyt toimet liittyen tieliikenteen lataus- ja tankkausinfrastruktuurin sitovat osaltaan tulevaa päätöksentekoa.

Ilmastonmuutokseen ja sen torjuntaan liittyy erilaisia kustannuskäsitteitä. Ilmastonmuutos itsessään saa aikaan yhteiskunnissa vahinkoja, joiden suuruutta voidaan arvioida myös kustannuksina. Vahingot ovat luonteeltaan ulkoisvaikutuksia, joiden syntymistä kuluttajat ja tuottajat yksityisissä päätöksissään eivät kykene huomioimaan. Tämä ilmiö antaa syyn yhteiskunnan ilmastopolitiikan ohjaustoimille. Nämä ohjaustoimet saavat aikaan erilaisia päästöjen vähennystoimenpiteitä, jotka muuttavat kuluttajien ja yritysten valintoja. Muutoksista johtuvia kustannuksia kutsutaan yhteiskunnallisiksi kustannuksiksi.

Ilmastopolitiikan ohjaustoimet voivat perustua myös saastuttajille asetettuun päästön yksikköhintaan, kuten esimerkiksi hiiliveroon. Tämänkaltainen taloudellinen ohjaus saa aikaan rahavirtoja julkisen vallan ja saastuttajien välille. Yksittäisen autoilijan ja julkisen vallan näkökulma on kuitenkin erilainen taloudellisen ohjauksen rahavirtojen suhteen. Siinä missä yksittäinen autoilija pitää veroa kustannuksena, niin yhteiskunnallinen laskelma pitää sitä tulonsiirtona. Liitteen esimerkki valaisee tätä eroa, joka vallitsee yksittäisen autoilijan ja julkisen vallan kustannusten välillä.

Mielenkiinnon kohteena voi olla myös kustannusten jakautuminen kotitalouksien, yritysten ja julkisen vallan kesken⁵. Tulos riippuu voimakkaasti tarkastelun aikaperspektiivin pituudesta. Mitä pitempi on tarkastelun perspektiivi, sitä enemmän mahdollisuuksia eri osapuolilla on sopeutua uuteen toimintaympäristöön. eri toimijoilla on kuitenkin erilaiset mahdollisuudet valintojensa sopeuttamiseen. esimerkiksi Ilmastopaneelin tutkimuksessa (Liimatainen et al. 2015) argumentoidaan, että kustannukset kohdistuvat pitkällä aikavälillä kotitalouksille. Tämä tulos perustuu ajatukseen, että pitkällä aikavälillä yritykset kykenevät siirtämään ilmastopolitiikan toimeenpanosta aiheutuneet vaikutukset tuotteiden hintoihin ja julkinen sektori verotukseen ja maksuihin.

5 Tieliikenteen hankearvioinneissa puhutaan resurssikustannus- ja hyvinvointimenetelmästä (esim. Tervonen & Metsäranta 2003). Resurssikustannusmenetelmällä lasketut kustannukset vastaavat edellä esitettyä yhteiskunnallista kustannusta. Hyvinvointimenetelmä kiinnittää huomiota myös kustannusten jakautumiseen, sillä menetelmässä lasketaan yhteen hankkeen jokaisen tahon kaikkien vaikutusten (ml. siirtosummat tahojen välillä) suuruus ja kohdistuminen. Täten siirtosummista puhdistettu hyvinvointimenetelmä laskelma on resurssikustannusmenetelmä laskelma.

Pitkän aikavälin tarkastelut kustannusten jakautumisesta eri osapuolten välillä ovat haastavia niin mallintamisen kuin aineistotarpeiden näkökulmasta. Kun tarkastelun laajuutta kavennetaan, niin toteutus helpottuu ja tulosten luotettavuus paranee. esimerkiksi Fiorellon ym. (2016) ja de Stasion ym. (2016) euroopan komissiolle tehdyssä selvityksessä kuvataan useiden kestävästä kaupunkiliikennettä edistävien politiikkatoimenpiteiden vaikutuksia ja kustannuksia. Hankkeessa kehitetyllä työkadulla voidaan myös arvioida toimenpiteiden vaikutuksia kaupunkikohtaisesti. Yksi esimerkki politiikkatoimenpiteistä on liityntäpysäköintialueiden rakentaminen kaupungin reuna-alueelle joukkoliikenneyhteyksien varrelle. Tämän toimenpiteen vaikutukset on mallinnettu olettaen, että se vähentää kaupunkialueelle suuntautuvien automatkojen määrää lisäten joukkoliikenteellä matkustamista. Kustannusten arvioidaan olevan vähäisiä kaupunkilaisille, kohtalaisia yrityksille ja kohtalaisia tai korkeita kaupungille. Kustannukset muodostuvat joukkoliikennevälineiden hankinnasta ja joukkoliikennepalvelun tuottamisesta sekä pysäköinti-infrastruktuurin rakentamisesta. Lisääntynyt joukkoliikenteen käyttö toisi lipputulota valtiolle. Kehitetyn hanketyökalan avulla voidaan arvioida seurauksia, joita muutokset joukkoliikenteen matkalipun hinnassa, joukkoliikenteen palvelutasossa sekä pysäköintipaikkojen määrässä liityntäpysäköintialueella saavat aikaan.

Ilmastopolitiikan kustannuksia on syytä tutkia myös oikeudenmukaisuuden näkökulmasta. eerola ym. (2021) tarkastelevat oikeudenmukaisuuden kahta dimensioista käyttäen liikenteen päästövähennystavoitetta esimerkkinä. Tarkastelun ensimmäinen dimensio liittyy siihen, miten kustannukset kohdistuvat eri tulotasolle. Tällöin keskeistä on, millaisia ovat erot kulutuksen meno-osuuksissa ja miten kuluttajat reagoivat hintamuutoksiin eri tulotasolla. Toinen dimensio liittyy puolestaan kuluttajien valintoihin ja politiikan vaikutusten kompensointiin. Tähän liittyy periaatteellisen kysymyksen lisäksi myös käytännöllisempi huoli. Kompensointitoimet voidaan rakentaa myös niin, että ne heikentävät sääntelyn ohjausvaikutusta. Liittyen näistä dimensioista ensimmäiseen eli kustannusten kohdistumiseen eri tulotasolla, Palanne ja Sahari (2021) esittävät, että Suomen kotitalouksien polttoainekuluosuudet kasvavat tulojen mukana suuressa osassa tulojakaumaa. Huomionarvoista myös on, että erot kotitalouksien keskimääräisissä polttoainekuluissa ovat suurempia alueiden kuin tulodesiilien välillä.

Päästöleikkaukset ajoittuvat usean vuoden ajalle. Tällöin yhdeksi merkittäväksi kustannustekijäksi muodostuu laskennassa valitun diskonttokoron suuruus. Yhteiskunnallisissa laskelmissa käytetään tyypillisesti yhteiskunnallista diskonttokorkoa, jonka suuruus itsessään on haastava keskustelun aihe⁶.

6 eri toimenpiteiden seurauksia vertailtaessa voimme lähtökohtaisesti olettaa, että laskelmissa käytetään yhtä ja samaa diskonttokorkoa. Diskonttokoron vaikutus toimenpiteiden vertailussa luonnollisesti voimistuu, kun eri toimenpiteiden hyödyt ja kustannukset ajoittuvat hyvin eri tavalla.

3.1.2 Kustannustehokkuus

Termillä *kustannustehokkuus* (engl. cost efficiency) viitataan kirjallisuudessa tyypillisesti päästövähennyksen yksikkökustannukseen/hintaan. Tällöin kustannustehokkuus on päästövähennyksen kustannuksien ja sen suuruuden välinen suhdeluku (esim. eUR/kg CO₂). Kokin (2011) katsauksen mukaan yksikkökustannus voi viitata keskimääräiseen kustannukseen tai marginaaliseen kustannukseen ja termi kustannusvaikuttavuus (engl. cost-effectiveness) määritellään rahamääräisenä päästövähennyksen yksikkökustannuksena (USD/t CO₂-ekvivalentti). Tässä yhteydessä keskimääräinen kustannus lasketaan usean päästövähennystoimenpiteen yksikköhintana, kun taas marginaalikustannus viittaa yksittäisen päästövähennyksen yksikköhintaan. Katsauksen mukaan kustannustehokkuutta raportoivat tutkimukset eroavat huomattavasti myös sen suhteen, minkälaista laskentakaavaa käytetään tehokkuusestimaatin elinkaarilaskennassa. Kustannuslaskennan yksikköhintojen arvostusmenetelmien perusteista löytyy suurta vaihtelua (Nocera & Cavallaro 2012). Hiilidioksidin yksikköhintana voidaan käyttää markkinoilla havaittua sääntelyhintaa, jolloin kyseessä on joko hiilivero tai kaupattavien päästölupien hinta. Euroopan unionin lupakauppa (eU eTS) on esimerkki hiilidioksidin lupakaupasta. Päästökauppasektori kattaa nykyisellään hiilidioksidipäästöt sähkön- ja lämmöntuotantosektoreilla, energiaintensiivisillä tuotantoaloilla sekä eU:n sisäisessä lentoliikenteessä. Päästökauppa tulee myös laajentuman uusille sektoreille, joista yksi on juuri liikennesektori (eUR-lex 2023; Liikenne- ja viestintäministeriö 2022).

Yksikköhintojen määrittelyyn käytetään myös mallintamiseen ja laskentaan perustuvia haitta- ja välttämiskustannusmenetelmiä (engl. damage and avoidance costs). Haittakustannusmenetelmässä arvioidaan ilmastonmuutoksen tulevaisuuden fyysisiä vaikutuksia ja yhdistetään ne talouteen sekä yhteiskuntaan. Menetelmä perustuu kustannus-hyötyanalyysiin, jossa odotettavissa olevien ympäristöllisten, sosiaalisten ja taloudellisten seurausten perusteella määritetään optimaalinen sääntelyn taso. Välttämiskustannusmenetelmässä puolestaan määritetään tarvittava rahoitus päästöjen kasvun välttämiseen, vähentämiseen tai poistamiseen. Menetelmän tieteellinen epävarmuus on vähäisempää kuin välttämiskustannuksissa, sillä ympäristöllisiä vaikutuksia ei siinä suoraan huomioida. Menetelmä perustuu ennalta asetettuihin politiikkatavoitteisiin, jotka määrittävät päästöjen tavoiteuran. Välttämiskustannusmenetelmässä pyritään esittämään minimihinta tavoitteen saavuttamiselle, jolloin kyseisen hinnan määrittää se marginaalinen tuotantomuoto, jolla päästövähennystavoite saavutetaan. (Nocera & Cavallaro 2012.) Optimoinnin näkökulmasta kyseessä on niin sanottu päästörajoitteen varjohinta.

Termiä kustannustehokkuus käytetään taloustieteessä myös normatiivisesti. Tässä kontekstissa päästövähennys on kustannustehokkaasti toteutettu, jos päästövähennykset allokoituvat säänneltävien yksiköiden kesken siten, että kokonaiskustannukset ovat pienimmät mahdolliset. Tämän määritelmän taustalla on oletus siitä, että säänneltäviä yksiköitä on

useita, ja että ne tuottavat vahingoltaan identtistä saastetta. Fossiilittoman tieliikenteen yhteydessä kustannustehokkuus on sinällään järkevä tavoite, koska päästölähteen sijainnilla ei ole merkitystä, vaan ainoastaan hiilidioksidin kokonaismäärä on ratkaiseva.

Kustannustehokkaassa allokaatiossa kaikkien päästövähennysten yksikkökustannukset ovat yhtä suuret. Päästöleikkauksien aikaansaamia kustannuksia voidaan toki pyrkiä pienentämään myös tätä ääri ratkaisua pienemmillä osatavoitteilla. Olkoon esimerkiksi päästövähennystoimen a yksikkökustannus A eUR/kg CO₂ ja päästövähennystoimen b päästöjen yksikkökustannus B eUR/kg CO₂ siten, että $A > B$. Jos nyt lisäämme toimen b vähennystä yhden tonnin CO₂ ja pienennämme vastaavan määrän toimen a päästövähennystä, niin päästöjen määrä pysyy ennallaan. Päästöjen kustannukset kuitenkin vähenevät määrän $(A-B)$ eUR > 0 verran, joten ehdotettu toimenpide pienentää yhteiskunnallisia kokonaiskustannuksia annetulla päästömäärällä. Kyseinen muutos ei kuitenkaan ole mahdollinen, jos päästötoimen b sitova kapasiteettirajoite estää päästövähennysten kasvattamisen.

Näin esitettyä termi kustannustehokkuus korostaa kustannusten suhteellisuutta annetulla tavoitteella. Kun ehdotetaan kustannustehokasta päästövähennystä, niin tulisi myös kertoa, minkä toimenpiteen se korvaa. Vaihtoehtoisesti, jos ehdotettu toimenpide kasvat-
taa päästöjä (esimerkiksi ehdotus tieliikenteen jakeluvaihteen poistamisesta), niin ehdotuksen tulisi sisältää myös suunnitelma niistä korvaavista keinoista, joilla päästöjen kasvu neutraloidaan.

3.1.3 Julkinen valta

Päästövähennysten toteutus vaatii tyypillisesti julkisen vallan ohjausta ja sääntelyä⁷. Tämä on joko ylikansallista (eU-taso), kansallista (valtiotaso) tai paikallista (kuntataso). Julkisen vallan ohjauksen yhteydessä kirjallisuudessa käytetään termejä tavoite, toimenpide ja ohjauskeino. Näiden termien sisältö kuitenkin vaihtelee tutkimuksesta toiseen. Voimme kuitenkin hahmotella määritelmät näille termeille, jotka kuvaavat niiden keskimääräistä käyttöä kirjallisuudessa. Tällöin julkisen vallan sääntelyn *tavoite* liittyy päästövähennyksen määrään, *toimenpiteet* ovat yksittäisiä konkreettisia kohteita, joissa päästöjä voidaan vähentää ja *ohjausmenetelmät* ovat sääntelyn konkreettisia toteutustapoja.

7 Tämä näkemys perustuu taloustieteen standardiin näkemykseen, jonka mukaan säästuminen on luonteeltaan nk. ulkoisvaikutus ja julkishaitake. Tämä tarkoittaa, että puhtaasti yksityisiin päätöksiin perustuvassa markkinajärjestelmässä ympäristön säästuminen on koko yhteiskunnan kannalta liiallista. Vaikutusvaltaisen Sternin raportin (Stern 2007) mukaan ilmastonmuutos on markkinoiden suurin epäonnistuminen ihmiskunnan historiassa.

Ohjausmenetelmä on mikä tahansa julkisen vallan toimi, joka saa aikaan päästövähennyksiä. Tieliikenteen päästövähennysten yhteydessä julkisen vallan potentiaalisten ohjausmenetelmien määrä on suuri ja niitä voidaan myös luokitella eri tavoin. Rajoitteet voivat olla määrällisiä, jolloin päästömääriä rajoitetaan asettamalla niille ylärajoja. Standardi voidaan asettaa päästömäärän sijaan koskemaan myös tietyn teknologian käyttöä tai se voi olla velvoite tarjota tietynlainen palvelu (kuten esimerkiksi huoltoasemien autojen sähkölatauspaikat). Ohjaus voi olla myös taloudellista, jolloin käytössä ovat erilaiset verot, maksut ja tukitoimet. Päästöohjaus voi olla myös vaikuttamista, jolloin se voi perustua kotimaassa esimerkiksi kansalaisten informointiin liikenteen kasvihuonekaasupäästöistä. esimerkkinä kansainvälisestä vaikuttamisesta on Fossiilittoman liikenteen tiekarttaan kirjattu toimi, jonka mukaan vaikutetaan EU:n henkilö- ja pakettiautojen CO₂-raja-arvojen valmisteluun.

Hankkeen toimenpideohjelma tyypillisesti sisältää erilaisia ja erilaajuisia toimenpiteitä. Toimenpiteet voivat olla osin päällekkäisiä tai ne voivat olla toisiaan tukevia. esimerkiksi Fossiilittoman liikenteen tiekartan (Liikenne- ja viestintäministeriö 2021) toimenpiteistä autokannan uudistaminen ja biopolttoaineiden jakeluvaihteen nosto ovat päällekkäisiä toimenpiteitä, sillä vähäpäästöisten käyttövoimien kasvava käyttöönotto vähentää liikenteessä tarvittavien biopolttoaineiden määrää. Toisaalta autokannan uudistaminen vaatii sitä, että liikennesähkön ja -kaasun infrastruktuuria kehitetään, joten nämä tavoitteet ovat toisiaan tukevia.

Julkisen vallan ohjaustoimet voivat olla myös epäsuoria. esimerkiksi liikkumisen kysyntään ja kulkutapojen jakaumaan voidaan vaikuttaa kaavoituksen ja julkisten investointien kautta. Lisäksi vaikutusta on sillä, miten tuloverojärjestelmä on rakennettu päästövähennysten näkökulmasta. esimerkiksi Verotyöryhmän raportti (Valtiovarainministeriö 2021) löytää tuloverotuksesta joitakin rakenteita, jotka luovat päinvastaisia kannusteita kuin energiaverotus, ja siten osaltaan kumoavat energiaverotuksen ajokilometrejä vähentävää vaikutusta. Tällaisia rakenteita ovat kodin ja työpaikan välisten matkakustannusten verovähennysoikeus, verottoman kilometrikorvauksen tason määräytymistapa ja vapaassa autoedussa sen kaavamainen arvostamisperiaate.

Keskeinen kysymys koskee ohjauskeinojen vaikutusta toteutuksiin ja tavoitteeseen. Kysymys voi liittyä siihen, millä varmuudella ohjauskeino edistää päästövähennemän saavuttamista ja minkälainen vaikutus sillä on kustannuksiin. esimerkiksi, erilaiset autoilun maksut ja verot tuottavat epävarmoja päästövähennyksiä, koska auton käytön ja sen hankinnan

hintajoustopot ovat hyvin epävarmoja⁸. Osaltaan tämä epävarmuus on seurausta siitä, että hintajoustoestimaatit on laskettu aineistoista, jotka eivät sisällä vaihtoehtoisilla käyttövoimilla kulkevia autoja. Uusien digitaalisten liikennejärjestelmien⁹ vaikutukset päästövähennyksiin ovat myös hyvin epävarmoja juuri siksi, että ne ovat aivan uusi ja tuntematon tapa järjestää liikennepalveluita. Jos tieliikenteen päästöjä tulevaisuudessa säännellään päästökaupan avulla (joko kansallisesti tai euroopan unionin tasolla), niin laajimmillaan päästövähennys tulee automaattisesti saavutetuksi. Voimme myös ennustaa (perustuen edellä esitettyyn normatiiviseen kustannustehokkuuteen), että tämä järjestelmä on suorien vähennyskustannusten näkökulmasta edullinen verrattuna tilanteeseen, jossa meillä on lukematon määrä erilaisia (osin päällekkäisiä) ohjauskeinoja käytössä. Herää myös kysymys siitä, mihin lukuisia ohjauskeinoja tarvitaan tilanteessa, jossa yhden ohjauskeinojen avulla saavutetaan ilmastopolitiikan tavoite.

Ohjauskeinon valinnalla voi olla vaikutusta myös sääntelyn oikeudenmukaisuuteen. esimerkiksi eerola ym. (2021) ym. antavat esimerkin teknologiastandardin¹⁰ ja polttoaineverotuksen erosta tässä suhteessa. Teknologiastandardihan vaikuttaa autotyypin tarjontaan ja polttoaineverotus ajokilometreihin. Jos pienituloiset ajavat vain vähän, niin perinteinen polttomoottoriauto on tyypillinen valinta kyseisessä tuloluokassa. Jos teknologiastandardi kuitenkin kieltää halvat polttomoottoriautot ja sallii vain sitä kalliimmat ja vähäpäästöisemmät autotyypit, niin teknologiastandardi on regressiivisempi ohjausmenetelmä kuin polttoaineverotus.

Maininnan arvoinen seikka koskee kustannuslaskennan käyttöä julkisessa päätöksenteossa. esimerkiksi Iso-Britannia on yksi valtioista, joissa kasvihuonekaasujen määrää ja päästövähennysten kustannuksia pyritään seuraamaan ja arvioimaan säännöllisesti. Järjestelmän tukirankana toimii viisivuotiskausiksi asetettava hiilibudjetti. Yksi järjestelmän mielenkiintoinen elementti on säännöllisesti päivitettävä hiilen yksikköhinta. Tätä hintaa suositellaan käytettäväksi yhteiskunnallisissa investointilaskelmissa hiili-dioksidipäästöjen yksikkökustannuksena. Hiilen yksikköhinnan määrittely on itsessään käynyt läpi rakenteellisen muutoksen, kun vuonna 2009 hallinto luopui arvioinneissa

-
- 8 esimerkiksi Seppänen ym. (Liite 2, 2022) esittävät kirjallisuuskatsauksen lyhyen ja pitkän aikavälin hintajoustoista. Kirjallisuuden perusteella pitkän aikavälin kysyntä on joustavampaa kuin lyhyellä aikavälillä, mutta tulosten epävarmuus on myös suurempi.
- 9 Liikenteen digitalisaatio on yleisnimitys kaikelle sille toiminnalle, jossa nykyistä informaatioteknologiaa hyödynnetään tiedon keräämiseen, käsittelyyn ja jalostamiseen liikenteen ohjauksessa. esimerkiksi Liikenne- ja viestintäministeriön (2021) fossiilittoman liikenteen tiekartassa digitalisaatio on esillä useassa kohdin.
- 10 Tässä yhteydessä teknologiastandardi voidaan ajatella autovalmistajia koskevana CO₂-raja-arvolainsäädäntönä.

haittakustannusmenetelmästä. Tilalle tuli hybridimalli, jossa päästökauppasektoria koskevissa laskelmissa hyödynnetään päästöluvan markkinahintaa ja taakanjakosektoria koskevissa laskelmissa sovelletaan välttämiskustannusmenetelmää. Uusin ohjeistus on vuodelta 2021. (BeIS 2022)

Tämä muutos kuvastaa siirtymää haittaorientaatiosta tavoiteorientaatioon (Target-based approach, DeCC, UK. 2009). Menetelmässä otetaan kasvihuonekaasuvähennysten vähennysura annettuna ja keskitytään tavoitteen savuttamiseen mahdollisimman pienin kustannuksin eli kustannustehokkaasti. Hiilen yksikköhinta saa tässä tapauksessa tulkinnan päästörajoitteen varjohintana.

Hiilidioksidipäästöille on määritetty yksikköhinta myös Suomen liikennesektorilla. Sitä tulee käyttää erityisesti väylähankkeiden kustannusarvioissa. (Väylävirasto 2020a) Vuoden 2022 huhtikuun alusta lähtien tie- ja ratakankkeiden vaikutusarvioinnissa tulee hiilidioksidin ympäristökustannuksena käyttää yksikköarvoa 77 €/t, joka on yhdenmukainen ajoneuvokustannuksiin sisältyvän polttoaineveron kanssa (Väylävirasto 2020b; Metsäranta ym. 2020). Hinta määräytyy haittaorientaation perusteella, eli päästökustannukset arvotetaan hiilidioksidin haittakustannusten kautta (Gynther ym. 2012). Tutkimuskirjallisuudesta emme löytäneet keskustelua siitä, onko Suomen ja eU:n ilmastopolitikassa tarvetta siirtyä kohti tavoiteorientoitunutta yksikköhinnan laskentamallia¹¹.

3.1.4 Kustannuslaskennan laajuus

Kun tieliikenteen päästövähennysten toimenpiteiden ja ohjauskeinojen vaikutuksia arvioidaan, niin keskeistä on myös huomioida analyysin laajuus. Analyysin laajetessa mukaan tulee erilaisia ja erilaatuisia epäsuoria vaikutuksia. Liikennesektori on hyvin merkittävä kansantalouden osa, joka on itsessään merkittävä työllistäjä, mutta jonka verkostot ja palvelutarjonnan kustannukset määrittävät myös muiden toimialojen menestystä. Ilmastopolitiikan myötä erityisesti liikenne- ja energiasektorin välinen suhde on kehittymässä entistä tärkeämmäksi. Huomionarvoinen muutos on tieliikenteen käyttövoimien voimistuva siirtymä fossiilisesta tuontitavarasta kohti kotimaassa tuotettuja liikennesähköä ja biopolttoaineita. Biopolttoaineiden rooli liittyykin liikennesektorin maatalous- ja jätehuoltosektoreihin ennennäkemättömällä tavalla. Lisäksi tällä siirtymällä on kansallista huoltovarmuutta lisäävä vaikutus.

11 Hankkeen taustakeskusteluissa kävi kuitenkin ilmi, että Suomen liikennesektorilla ollaan faktisesti siirtymässä tavoiteorientaatioon. Syinä tähän nähdään päästökaupan vaikutusvalta sekä haitan arvottamisen haasteellisuus.

Sektorien välisten vaikutusten lisäksi huomionarvoista on eri ajanjaksojen väliset vaikutukset. Ramjerdin ja Fearnleyn (2014) mukaan liikennemarkkinan pitkän aikavälin tarkastelussa keskeisiä käsitteitä ovat epävarmuus (risk/uncertainty), peruuttamattomuus (irreversibility), polkuriippuvuus (path dependency) ja lukittautuminen (lock-in-effects). esimerkiksi autojen käyttövoimiin liittyvissä tarkasteluissa suomalaisen päätöksenteon keskeinen epävarmuuden lähde on, ettei Suomi ole itsenäinen neuvotteluosapuoli keskusteluissa, jossa päätetään automarkkinan muutoksen sisällöstä ja nopeudesta. Tällöin päätöksenteko nojaa vahvasti ennusteisiin teknologioiden yleistymisistä. Tässä yhteydessä valinnan peruuttamattomuus viittaa korkeisiin uponneisiin kustannuksiin¹². Jos liikennesektorilla investoidaan voimakkaasti jonkin käyttövoiman jakeluinfraan, mutta globaali autoteollisuus päättyy toisenlaiseen pääasialliseen käyttövoimaan, niin tehty infrainvestointi on arvoton. Automarkkinan muutosta voidaan puolestaan ymmärtää verkostovaikutuksen avulla. Tällöin yksittäisen tuotteen arvon voidaan nähdä riippuvan vahvasti kyseisen tuotteen käyttäjämäärästä. erityisen vahvojen verkostovaikutusten tapauksessa kuluttajat lukittuvat tietyn teknologian käyttäjäksi. Lukittautuminen voi olla kokonaisuuden kannalta järkevää, mutta samalla se voi myös estää tehokkaita siirtymiä verkostotaloudessa.

Laskennan ajallisen laajuuden yhteydessä on tarpeen huomioida myös se, kuinka tutkimukset käsittelevät tutkimuskohteen elinkaaripäästöjä ja -kustannuksia. Liikenneinfrastruktuurin, ajoneuvojen ja polttoaineiden tuotannosta, kulutuksesta tai käytöstä poistamisesta aiheutuu erilaisia päästöjä riippuen siitä, minkä pituinen elinkaari on tutkimuksen kohteena. esimerkiksi polttoaineen päästöjen elinkaari voi olla lähteestä tankille (Well-To-Tank), tankilta pyörille (Tank-To-Wheel) tai lähteestä pyörille (Well-To-Wheel). Kokin (2011) aineistossa noin 40 % tutkimuksista raportoivat WTW-päästöt. Näissä tutkimuksissa ensimmäisen vaiheen WTT-päästöjen huomioiminen lisäsi päästöjä 15–21 %.

Vaikutusten arvioinneissa haasteita saa aikaan myös kuluttajien valintojen arvottaminen ja arvioiminen. Arvottamiskeskustelu tarkoittaa kuluttajille aiheutuvia kustannuksia, joita siirtymä fossiilittomaan liikenteeseen saa aikaan. Haastetta aiheuttaa myös se, kuinka kuluttajat reagoivat sääntelyyn. esimerkiksi nk. rebound-efekti voi lisätä kuluttajan ajokilometrejä tilanteessa, jossa hänen uusi autonsa on entistä taloudellisempi polttoaineen kulutuksen suhteen. On myös olemassa evidenssiä (esim. Parry & Small 2015), jonka mukaan kuluttajat eivät kiinnitä riittävästi huomiota pitkän aikavälin polttoainesäästöihin, kun he valitsevat kulutukseltaan erilaisten autojen väliltä. Tämä ilmiö tunnetaan energia-paradoksin nimellä.

12 Uponnut kustannus on taloustieteessä käytetty termi toteutetulle investoinnille, jolla ei ole jälleenmyyntiarvoa markkinoilla.

Tieliikenne aiheuttaa kasvihuonekaasupäästöjen lisäksi myös muita ulkoisvaikutuksia. Merkittäviä vaikutuksia ovat ruuhkautuminen, onnettomuusriskien kasvaminen, ilmaansaasteet ja melu. Voimmekin kysyä, missä määrin kasvihuonekaasuperusteisen päästövähennyspolitiikan hyödyt näillä muilla osa-alueilla tulisi huomioida politiikan tavoitteissa ja kustannuslaskennassa, ja kuinka näiden ulkoisvaikutusten tulisi näkyä ohjausmenetelmien valinnassa. esimerkiksi, missä määrin terveyteen liittyvät seikat tulisi huomioidaan toimenpiteiden ja ohjauskeinojen valinnassa, ja tulisiko toimenpiteiden kirjoon liittää erilaisia paikkaan ja aikaan sidottuja tiemaksuja vai sisällyttää näitä vaikutuksia polttoaineveroon (Parry & Small 2015, Sørensen ym. 2014). Samalla tavoin kuin ravintoon liittyvissä päätöksissä niin myös liikkumiseen liittyvissä päätöksissä länsimaiset ihmiset tekevät terveyden näkökulmasta lyhytnäköisiä valintoja (erkkola ym. 2019). Liikkumisen kohdalla se tarkoittaa (varsinkin kaupunkiolosuhteissa) moottoriavusteisen liikkumisen ylikäyttöä suhteessa muihin liikkumismuotoihin. Nämä lyhytnäköiset valinnat osaltaan perustelevat julkisen vallan paternalistisen väliintulon esimerkiksi nk. syntiverojen muodossa.

OeCD:n katsaus kustannuslaskentaan (OeCD 2006, s. 80–81) huomauttaa, että ilmastopolitiikan laskelmissa liitännäisedut (engl. ancillary benefits) tulevat tyypillisesti huomioiduiksi, mutta samalla katsaus kehottaa tarkasti harkitsemaan näiden hyötyerien liittämisen perusteita. ensinnäkin ilmastonmuutos on systeemitason ongelma, joten yksittäiset muutokset leviävät pitkälle talouden verkostoissa. Haasteeksi nousee kysymys siitä, mihin kohtaan on järkevää lopettaa hyötyjen jäljitys. Toinen haaste koskee haittojen perusurien määrittämisen vaikeutta, eli kysymystä siitä, mitä olisi tapahtunut, jos ilmastopolitiikkaa ei olisi olemassa. Liikkumispalveluita ja liikenneinfrastruktuuria kehitettäisiin todennäköisesti päästövähennystarpeista huolimatta, mutta päästöleikkauksiksi tulisi kuitenkin huomioida ainoastaan ilmastopolitiikan aikaansaamat lisävähennykset. Kolmas haaste liittyy kustannusten määrittämiseen. Ilmastopolitiikan toimenpiteet eivät välttämättä ole halvin tapa toteuttaa liitännäisiä päästövähennyksiä. esimerkiksi polttoaineveron noston seurauksena teiden ruuhkaisuus voi helpottua. Ruuhkaisuutta on kuitenkin todennäköisemmin paljon tehokkaampaa vähentää ruuhkamaksun avulla. Jos määrittelemme ohjauksen perusraksi ruuhkamaksuohjauksen, niin ilmastopolitiikka luo kustannuksen tähän uraan verrattuna.

Muutokset verotuksen kokonaissuuruudessa ja sen rakenteessa aiheuttavat muutoksia kuluttajien valintoihin, joista mahdollisesti aiheutuu yhteiskunnallisia kustannuksia¹³. Näiden verotuksen hyvinvointitappioiden syntyminen riippuu kuitenkin siitä, miten verouudistus vaikuttaa jo olemassa oleviin verovääristymiin. Huomionarvoinen seikka on myös politiikan vaikutus tulonjakoon. Jos tavoitteet ja ohjaus kohdistuvat yhteiskunnan heikko-osaisimpiin suhteellisen voimakkaasti, niin tätä seurausta voidaan pitää kustannuksena päätöksentekijän näkökulmasta. Joihinkin toimenpiteisiin ja niitä tuottaviin ohjauskeinoin liittyä myös kysymyksiä toteutettavuudesta mukaan lukien niiden hyväksyttävyyttä. Tutkimuskirjallisuus (kuten esimerkiksi Axsen ym. 2020) toistuvasti arvioi, että ohjauksen vahva painottuminen hiilidioksidin hinnoitteluun ei ole mahdollista, koska se ei nauti kovin suurta suosiota yhteisön eri ryhmien keskuudessa. Kustannuslaskennan laajuus osaltaan määrittää sen, kuinka tämänkaltaiset vaikutukset huomioidaan politiikan suunnittelussa.

3.1.5 Kilpailukyky

Kuten OeCD:n raportissa (OeCD 2006) todetaan, yhteiskunnalliset kustannus–hyötylaskelmat eivät perinteisesti sisällä analyysijä sääntelyn vaikutuksista kilpailukykyyn. Samalla raportissa toisaalta myönnetään, että päättäjät ovat aiheesta kiinnostuneita erityisesti suurten sääntelyhankkeiden yhteydessä. Tämän kirjallisuuskatsauksen yhteydessä voitaisiin siis kysyä, minkälaisia vaikutuksia ilmastopolitiikalla on liikennesektorin kannattavuuteen tai kilpailukykyyn. Kun huomioidaan liikennesektorin tärkeä rooli koko kansantalouden verkostossa, niin voitaisiin myös kysyä, millainen vaikutus liikennesektorin ilmastopolitiikalla on kansantalouden kilpailukykyyn.

13 Verotuksen kokonaisrakenne on suuri aihealue. Mainittakoon tässä kohdin muutama näkökulma ympäristöverotukseen liittyen. Ympäristöveron perimmäinen tarkoitus on ohjaava (nk. Pigou-vero), jolloin vero ohjaa saastuttajia vähentämään saastuttavaa toimintaa. Tästä näkökulmasta verokertymän kartuttaminen ei ole veroinstrumentin asettamisen pääasiallinen tarkoitus. Toki ympäristöverotusta voidaan tarkastella myös verokertymän näkökulmasta. Huomionarvoista on, että Pigou-verotuksessa ei ole sisäänrakennettuna oletusta, että verokertymät kattavat saastumisen aiheuttaman haitan, joten tämä vaatimus korvamerkinnästä on erikseen asetettava ympäristöverotuksen suunnitteluun. Toisaalta, jos ympäristöverotuksen aikaansaama verokertymä halutaan neutralisoida, niin jo olemassa olevaa verotusta tulee keventää. Tästä näkökulmasta voidaan ymmärtää myös ehdotus ympäristöverotuksen kaksinkertainen edusta, jonka mukaan ympäristöverotus tuottaa sekä paremman ympäristön että paremmat insenttiivit työntekoon. Jälkimmäinen etu seuraa, kun tuloverotuksen marginaaleja voidaan ympäristöverokertymän johdosta alentaa.

Koska ilmastopolitiikan tavoitteet ovat kunnianhimoisia, niin liikennesektorin rakenteessa tulee varmuudella tapahtumaan merkittäviä muutoksia. Näiden muutosten vaikutusten arvioiminen kannattavuuden ja markkinoiden kilpailullisuuden näkökulmasta on kuitenkin haastavaa sekä teoreettisesti että empiirisesti. Lisäksi liikennesektori ei ole ainoa ilmastosääntelyn alainen sektori, vaan sääntely koskettaa lähestulkoon kaikkea kansantalouden toimintaa. Laskentamenetelmien näkökulmasta voidaan todeta, että yleisen tasapainon mallinuksissa on mahdollista tutkia ilmastopolitiikan vaikutuksia sekä sektorien väliseen kehitykseen että talouden eri makromuuttujiin.

OeCD:n raportti (OeCD 2006) tekee käsitteellisen eron kansantalouden kilpailullisuuden ja toimialojen kilpailullisuuden välillä. Kansantalouden kilpailullisuuden käsite ei raportin mukaan kuitenkaan ole kovinkaan merkityksellinen. Toimialojen kilpailukyvyistä raportti nostaa puolestaan kaksi näkökulmaa. Niistä ensimmäinen liittyy siihen, miten sääntely ja sen käyttämät ohjauskeinot vaikuttavat kilpailuun toimialan sisällä. Sääntely voi luoda esteitä markkinoille tuloon, jolloin tätä seuraava kilpailullisuuden vähentyminen luo yhteiskunnallisen kustannuksen. Käytännössä sääntelyn toteutus voi tehdä vihreän teknologian hankinnasta uusille yrityksille hankalaa tai sääntely voi lupakaupan alkuaikaa suosia jo markkinoilla olevia yrityksiä. Sääntely voi saada aikaan myös yritysten välisiä sulautumisia, ja äärimmillään se voi synnyttää monopoleja toimialoille. Toisaalta kilpailullisuutta voidaan miettiä kansainvälisillä markkinoilla toimivien yritysten kilpailukyvyistä näkökulmasta. Kotimaisten yritysten suhteellinen kustannustaakka kasvaa, jos yritysten kilpailijoiden toiminta sijaitsee alueilla, joissa sääntely on lievempää.

Tuoreehko tutkimus (Dechezleprêtre ym. 2018) tarkastelee euroopan unionin päästökaupan piirissä olevia yrityksiä. Se ei löytänyt mitään merkittäviä ja systemaattisia vaikutuksia yritysten tuloissa ja käyttöomaisuuksien määrissä, joita kuulumisen päästökaupan piiriin saisi aikaan. Naegele ja Zaklan (2019) tarkastelevat puolestaan euroopan unionin päästökaupan vaikutusta hiilivuotoon. He eivät löydä todisteita sen puolesta, että lupakauppajärjestelmä olisi saanut aikaan hiilivuotoa. Venmans ym. (2020) katsauksessa tutkitaan hiilen hinnoittelun vaikutuksia kilpailukykyyn OeCD- ja G20-maissa. Kilpailukykyä on katsauksen tutkimuksissa tarkasteltu useissa eri dimensioissa, mutta hiilen hinnoittelun ja kilpailukyvyistä välille ei löydy merkittävää riippuvuutta.

3.1.6 Laskentamenetelmät

Kustannuslaskennan laajuus liittyy läheisesti niihin menetelmiin, joilla kustannuksia lasketaan. esimerkiksi Semkin ym. (Taulukko 6.3.) jakavat menetelmät neljään eri luokkaan niiden laajuuden suhteen:

- Yksittäistarkastelut
- Osittaistasapainomallit
- Panos-tuotosmallit
- Yleiset tasapainomallit.

Kesicki (2010) jakaa tieliikenteen menetelmät puolestaan joko asiantuntijaperusteisiin (engl. expert based) tai mallintaviin (engl. model derived) lähestymistapoihin. Asiantuntijapohjaisissa laskelmissa alan asiantuntijat esittävät olettamuksia ja näkemyksiä päästöjen perusurasta, he tunnistavat päästöjen vähentämisen toimenpiteitä ja esittävät arvioita ja laskevat tuloksia eri mahdollisuuksiin liittyvien päästövähennysten kokoluokista ja kustannuksista. Asiantuntijapohjainen lähestymistapa vastaakin yksittäistarkastelua edellä mainitussa luettelossa.

Liikenteen päästövähennysten kustannuksia mallintavat tutkimukset perustuvat puolestaan yhteiskunnan energian käytön mallintamiseen. Tapana on jakaa tämän lähestymistavan tutkimukset kokonaistaloudellisiin top-down-malleihin sekä teknologiaperusteisiin bottom-up-malleihin. Mallintavissa tutkimuksissa bottom-up-mallit ovat energiasektorin osittaistasapainomalleja, ja top-down-lähestymistapa mallintaa sääntelyn aikaansaamat muutokset koko talouden kaikille eri osapuolille (panos-tuotosmallit ja yleiset tasapainomallit). Bottom-up-mallit perustuvat joko simulaatioihin tai erilaisiin optimointiasetelmiin. Näistä vaihtoehtoista jälkimmäisen kohdalla kirjallisuudessa käytetään termiä eSOM (engl. energy System Optimization Models). Mallien avulla on mahdollista esittää yksityiskohtaisia kuvauksia niistä teknologioista, joita käytetään muunnettaessa primäärienergiaa käyttöenergiaksi erilaisissa sääntelytasapainossa. Top-down-mallit pohjaavat puolestaan erilaisiin korvaussuhteisiin ja näille suhteille estimoiduille joustoille. (Kesicki 2010.)

Laskentamenetelmien laajuutta voidaan tarkastella esimerkiksi niistä ratkeavien endogeenisten muuttujien lukumäärän suhteen. Yksittäistarkastelussa mallin muuttujat ovat tyypillisesti tarkasteltavan mallin ulkopuolella määräytyviä eksogeenisiä muuttujia. Osittaistasapainomallien sektoritarkasteluissa määräytyy jo joitakin endogeenisten muuttujien arvoja, mutta yleisissä tasapainomalleissa näiden muuttujien lukumäärä on tätäkin suurempi, sillä yleisen tasapainon mallit pystyvät huomioimaan myös sektorien välisiä riippuvuussuhteita.

3.1.7 Päästöleikkausten rajakustannusfunktio (MAC-funktio)

Päästövähennyksiin liittyviin kustannuksiin ja kustannustehokkuuteen liittyvät tarkastelut esitetään usein päästövähennysten rajakustannusfunktion (engl. Marginal Abatement Cost function) avulla. Graafisessa esityksessä vaaka-akselilla on päästövähennyksen määrä ja pystyakselilla päästövähennyksen marginaalikustannus. esimerkiksi Huangin ym. (2016) katsaus sisältää 86 artikkelia vuosilta 2004–2015 liittyen kasvihuonekaasujen MAC-funktioon. Aineiston tulokset on ryhmitelty seuraavasti:

- Taksonomia
 - erilaiset laskentamenetelmät (bottom-up, top-down, hybridimalli)
- Sovellettavuus
 - Sidosryhmä (Yksityinen yritys, julkinen valta)
 - Tavoite (Kustannusten minimointi, voiton tai hyvinvoinnin maksimointi)
 - Kustannuskäsite (Suorat teknologiakustannukset, yhteiskunnalliset kustannukset, varjohinta)
 - Strategia (Teknologiaperusteinen, päästöhintaohjaus)
 - Informaatio (Maantieteellinen, ajallinen)
- Kehitystyö
 - Perusmallien laajennukset
 - epävarmuus
 - Kustannuskäsitteen laajennus liikenteen kaikkiin ulkoisvaikutuksiin.

Rajakustannusfunktion tyypillinen nouseva muoto viestii, että annetulla päästöjen vähentämisen määrää pienemmällä vähennysmäärällä on olemassa toimia, joiden yksikkökustannukset ovat ehdotettua toimea alhaisemmat. Tämän esitystavan etuna pidetään sen havainnollisuutta. erityisesti jos tarkastelun kohteena on yksittäistarkastelu, niin erilaisten toimenpiteiden järjestäminen yksikkökustannusten mukaiseen järjestykseen antaa lukijalle informatiivisen kuvan kustannustehokkaasta sääntelystä eri päästövähennysten määrän ja toimenpiteiden suhteen. esitystavan haasteena ovat toimien ja sektorien väliset riippuvuussuhteet. esimerkiksi edellä esitetty tulkinta ei ole toimiva tapauksissa, joissa edullisten toimenpiteiden kustannus riippuu sitä kalliimpien toimenpiteiden toteutumisesta.

Mallintavissa tasapainotarkasteluissa MAC-funktion tulkinta ei ole aivan suoraviivaista. Tähän syynä on se, että mallien kustannukset minimoivassa päästövähennyksen toteutuksessa käytetään samanaikaisesti useita vähennystoimenpiteitä. Tällöin on mahdotonta liittää tiettyä kustannustehokkuutta yksittäiseen toimenpiteeseen. Kirjallisuudesta tosin löytyy graafisia esityksiä, joissa mallinnettuja MAC-funktioita taustoitetaan niiden toimenpiteiden kirjoilla, jotka tuottavat tietyn päästöleikkauksen ja marginaalikustannuksen.

Tästä esimerkkinä on Yuen ym. (2020, Kuva 3) esitys, joka havainnollistaa hiilidioksidipäästöjä vähentävien teknologioiden ja rajakustannusten yhteyttä. Tämänkaltaisen esityksen perusteella voimme jossain määrin vertailla eri vähennystoimenpiteiden kustannustehokkuutta: Jos kuvion perusteella jokin vähennystoimenpide toteutetaan alhaisten rajakustannusten alueella, niin se on kustannustehokkaampi kuin toimenpide, joka toteutetaan ainoastaan korkeiden kustannusten vallitessa. Tämänkaltaisen päättely on seurausta tutkimuksen osittaistasapainomallinnuksesta, joka perustuu päästövähennyskustannusten minimointiin.

Perustuen Irlannin energiamarkkinoiden mallinnukseen, Yuen ym. (2020) tutkimus jakaa eri päästövähennysteknologiat ja toimenpiteet neljään kategoriaan niiden marginaalikustannusten perusteella:

- Kustannustehokkaat teknologiat
 - Tuulivoima, suuren kokoluokan aurinkovoima, energiatehokkuutta parantavat ratkaisut
 - Alhaalla riippuvia hedelmiä: Nämä teknologiat ovat kannattavia jopa ilman päästörajoitteita
 - Ovat siis osa päästöjen perusuraa.
- Joustavat (engl. resilient) teknologiat
 - Hiilen ja turpeen korvaaminen kaasulla sähköntuotannossa ja kaasusta biomassaan teollisuuden polttokattiloissa, siirtymät dieselautoista PHeV-autoihin henkilöliikenteessä ja biopolttoaineisiin kuorma-autoliikenteessä.
 - Siirtymien kasvattaminen ei aiheuta voimakkaita marginaalikustannusten nousuja.
 - Päästövähennystavoitteiden perusta, jonka koko potentiaali tulisi saada käyttöön.
- Käännekohta (engl. tipping point) -teknologiat
 - Siirtymä kaasusta sähköön lämmityksessä, biomassaan käyttö sähköntuotannossa
 - Siirtymät saavat aikaan voimakkaita marginaalikustannusten nousuja.
- Niche-teknologiat
 - Aaltovoima
 - Tarvitaan merkittävä kustannusten alentuminen, jotta teknologia olisi taloudellisesti kannattava vaihtoehto.

3.1.8 Epävarmuus

Päätöksenteon taustalla olevat mallinnukset sisältävät runsaasti epävarmuuksia. Yksittäistarkastelujen investointilaskelmat perustuvat mallin ulkopuolella määräytyvien eksogeenisten muuttujien arvoihin, joiden arvot ovat tyypillisesti päätöksentekijälle epävarmoja. esimerkiksi vaihtoehtoisten käyttövoimainvestointien nykyarvoon vaikuttavat eri käyttövoimien polttoaineiden hintojen epävarmat kehityspolut sekä diskonttokorkoon liittyvät epävarmuudet/ -selvyydet. Tällöin tutkimuksissa voidaan turvautua herkkyysanalyysihin, joilla testataan eksogeenisten arvojen muutosten vaikutuksia tuloksiin. Voidaan esimerkiksi testata eri diskonttokorkojen vaikutusta käyttövoimainvestointien nykyarvoihin tilanteessa, jossa kustannukset ajoittuvat eri tavalla käyttövoimien kesken.

Mallintaviin tasapainoanalyysihin liittyy myös luonnollisesti epävarmuuksia. Yleisesti ajatellen epävarmuus voi liittyä mallin parametreihin tai sen rakenteeseen. Rakenteeseen liittyvät epävarmuudet liittyvät mallinnuksen oikeellisuuteen, eli konkreettisesti siihen, kuinka hyvin mallin yhtälöt kuvaavat yhteiskuntaa ja sen markkinoita.

Yuen ym. (2018) kirjallisuuskatsauksessa tutkitaan eri lähestymistapoja, joiden avulla eSOM-mallit käsittelevät mallinnuksen epävarmuuksia. eSOM-mallit ovat energiamarkkinaperusteisia osittaistasapainomalleja, joita käytetään runsaasti esimerkiksi tieliikenteen päästövähennysten kustannuslaskennassa.

Yuen ym. (2018) katsaus osoittaa, että vain pieni osa aineiston eSOM-mallinnuksista hyödyntää edistyneitä menetelmiä epävarmuuksien vaikutusten tutkimiseen. Aineiston 134 tutkimuksesta 100 turvautui yksinkertaisiin herkkyysanalyysihin ja 34 tutkimusta käytti formaaleja tutkimusmenetelmiä, eli joko Monte Carlo -analyysiä (9 tutkimusta), stokastista optimointia (18 tutkimusta), robusteja optimointimenetelmiä (3 tutkimusta) tai vaihtoehtoja generoivaa mallinnusta (engl. Modelling to Generate Alternatives, 4 tutkimusta). esimerkiksi Monte Carlo -menetelmässä valitaan aluksi todennäköisyysjakaumat epävarmuuden lähteiksi arvioiduille parametreille. Itse mallinnuksessa generoidaan aluksi näistä jakaumista satunnaisluvut, liitetään ne malliin, ja lasketaan vaikutukset mallin tuloksiin. Tätä mallinnusta toistetaan riittävän useasti, jotta aikaansaatu tulosjakauma tarjoaa riittävän luotettavia tilastollisia tuloksia. Saatuja tuloksia voidaan käyttää myös robustien eli vankkojen teknologioiden etsinnässä. Mitä useammin ja mitä kattavammin jokin teknologia on mukana kustannustehokkaassa allokaatiossa, niin sitä vankemmaksi se voidaan mieltää.

Katsauksen mukaan eri formaaleilla menetelmillä on omat käyttötarkoituksensa ja edut (Yuen ym. 2018):

- Monte Carlo -analyysi
 - Käyttökelpoinen, jos voidaan olemassa olevan tutkimuksen tai asiantuntija-arvioiden perusteella voidaan osoittaa epävarmuuden jakaumat riittävällä varmuudella.
 - Voidaan käyttää GSA-menetelmän kanssa yhdessä, jolloin mallin rakenteen läpinäkyvyys paranee.

- Stokastinen optimointi
 - Menetelmistä ainoa, joka sopii vaiheittaiseen päätöksentekoon.
 - Toimii parhaiten, kun epävarmuuden lähteitä on vain muutamia.
 - Tarjoaa päätöksentekijälle suojautumisstrategioita lyhyen aikavälin toimintaan.

- Robusti menetelmä
 - Laskennallisesti tehokas.
 - Pystyy käsittelemään ison joukon epävarmuuksia ja tarvitsee vain minimaalisen määrän tietoa epävarmojen parametrien jakaumista.
 - Menetelmässä lasketaan kustannuksia, joita epävarmuutta vastaan suojautuminen saa aikaan annetulla epävarmuuden suuruudella.
 - Menetelmä tulokset kertovat, mitkä teknologiat ovat kriittisen tärkeitä haluttujen tulosten saavuttamiseksi.

- MGA
 - Menetelmistä ainoa, joka pystyy käsittelemään mallinnuksen rakenteeseen liittyvää epävarmuutta.
 - Voidaan käyttää myös muiden menetelmien kanssa.

Yuen ym. (2018) esittävät kirjallisuudessa yleisemminkin toistuvan näkemyksen, jonka mukaan eSOM-mallien tarkoitus ei ole tarjota tarkkoja lukuja päätöksenteon tueksi, vaan niiden arvo piilee kyvyssä korostaa ja havainnollistaa politiikan seurauksia. Tekijät myöntävät, että yksinkertaiset herkkyyslaskelmat ovat yksinkertaisesti toteutettavia ja niiden tulokset on helppo kommunikoida päätöksentekijöille. Systemaattiset menetelmät ovat työläämpiä ja tulokset usein vaikeampia tulkita, mutta ne onnistuvat hyvin perustehtävien hoidossa. Näiden menetelmien käyttö parantaa tulosten vankkuutta ja tarjoaa runsaasti tuloksia politiikkavaihtojen seurausten havainnollistamiseen.

3.2 Tieliikenteen päästövähennysten kustannuslaskenta

edeltävän kustannuslaskennan käsitteitä ja määritelmiä sisältävän osuuden perusteella lienee selvää, että tutkimuskirjallisuuden kustannusvaikuttavuuslukuja on syytä tarkastella hyvinkin kriittisesti. erityisesti tulee olla selvillä siitä, kuinka hyvin esitetyn laskelman konteksti on yhteneväinen oman selvityksen kohteena olevan kysymyksen kanssa. Jokaisen tutkimuksen kohdalla päätöksentekijän tulee ensimmäisenä arvioida, miten hyvin se sopii hänen tavoitteisiinsa (Semkin ym. 2019). Mahdollisia tavoitteita ovat esimerkiksi kustannustehokkuuteen liittyvät kysymykset, toimenpiteen kustannusten laskenta tai ohjauskeinon suunnittelu.

Kuten Semkin ym. (2019) ilmastopolitiikan kustannustehokkuuslaskelmia arvioivassa raportissaan toteavat, niin ei ole olemassa oikeaa menetelmää arvioida päästövähennysten kustannustehokkuutta eri menetelmissä on omat etunsa ja rajoitteensa. Jokaisen menetelmän mallinnuksessa joudutaan tekemään oletuksia, ja oletusten lukumäärän kasvaessa laskennan kattavuus paranee, mutta vaikutusten jäljittäminen vaikeutuu ja tulosten tarkkuus kärsii. Yksittäistarkastelujen etuna onkin tarkastelun kapea rajaus, joten sen avulla laskettujen kustannusten syntyä on helppo seurata ja laskelmia voidaan pitää suhteellisen tarkkoina. Rajaus voidaan toisaalta nähdä rajoittavana tekijänä. Kesickin ja ekinsin (2012) mukaan (katso myös Huang ym. 2016, Taulukko 3) haasteita asiantuntijaperusteisille yksittäistarkasteluille aiheuttavat intertemporaalisten, sektorien välisten ja sektorien sisäisten suhteiden ja riippuvuuksien puuttuminen sekä behavioraalisten rajoitteiden ohittaminen (mm. informaatioon ja rahoitukseen liittyvät rajoitteet). Lisäksi tarkastelujen lopputulokset ovat herkkiä niissä tehdyille oletuksille investointikustannusten ja diskonttokoron suuruuksien suhteen.

Mallintavat tutkimukset tarjoavat puolestaan alustoja talouden toimijoiden ja sektorien välisten riippuvuuksien ja takaisinkytkentöjen tarkasteluun, mutta ne ovat yksityistarkasteluja monimutkaisempia. esimerkiksi ilmastotavoitteiden laatimisessa liikennesektorin kytkeminen energiasektoriin on ensiarvoisen tärkeää. Laskelmien laajentaminen edelleen kokonaistaloudellisiin tarkasteluihin on perusteltua, sillä liikennesektorilla on merkittävä rooli kokonsa ja verkostoroolinsa perusteella. Verkostoroolista seuraa huomattava määrä epäsuoria kokonaistaloudellisia vaikutuksia. Kesicki ja ekins (2012) tosin huomauttavat, että tasapainomalleissa on myös omat puutteensa, sillä niissä kaikkia vaikutuksia ei välttämättä pystytä mallintamaan (esimerkiksi behavioraaliset rajoitteet, innovaatiot ja oppiminen). Lisäksi malleista voi puuttua joitakin tärkeitä talouden sektoreita (esimerkiksi maatalous- ja metsäsektorit). Tosin mallinussuunnitelmien kehitystyö on parantanut laskelmien kattavuutta ja luotettavuutta (BeIS 2021). Myös Huangin (2016) kirjallisuuskatsaus on johtopäätöksissään näiden päätelmien suuntainen. Se tunnistaa mallintavien

laskentamenetelmien edut ja kehitystyön, mutta varoittaa luottamasta liikaa mallintaviin tasapainomalleihin, sillä niihin on yhä vaikea sisällyttää kattavasti ja luotettavasti ohjauskeinojen aikaansaamia kysyntä- ja teknologiareaktioita.

Semkinin ym. (2019) tiivistävät liikennesektoria koskevan aineistonsa Taulukkoon 7–4. Aineiston tutkimuksissa käytetään tyypillisesti yhdistettyjä menetelmiä, joissa aluksi mallinnetaan liikennesektori erikseen, ja saatu tulos kytketään yleiseen tasapainomalliin. Liikennesektori mallinnuksessa käytetään yleisesti osittaistasapanomalleja, jossa kuluttaja- tai järjestelmätason teknologiavalintojen kustannuksia minimoidaan suhteessa skenaariossa asetettuun CO₂-päästörajaan. Kyseistä yhdistettyä mallia on hyödynnetty mm. kansallisen energia- ja ilmastostrategian taustaselvityksessä (Koljonen, et. al. 2017i, 2017ii). Liikennesektorin mallintamiseen on käytetty VTT:n ylläpitämää TIMeS-VTT energiajärjestelmämallia, joka kuvaa koko energiajärjestelmän primaarienergian hankinnasta hyötyenergian kysyntään, joten se pystyy mallintamaan energia- ja liikennesektorit väliset riippuvuudet. Samaiseen selvitykseen sisältyy nk. FINAGe-malli, jonka avulla arvioidaan energia- ja ilmastopoliittisten toimien vaikutuksia Suomen kansantalouteen kansantaloutta kuvaavan laskennallisen tasapainomallin avulla. epäsuorien vaikutusten huomioidussa on suurta vaihtelua aineiston tutkimuksissa ja yleensä laskennassa on mukana vain suorat teknologiakustannukset. Tämä tarkoittaa esimerkiksi vaihtoehtoisten käyttövoimien elinkaarikustannusten vertaamista polttomoottoriautojen kustannuksiin. Kustannukset diskontataan yleisesti sosiaalisella diskonttauskorolla.

Kokin ym. (2011) kirjallisuuskatsauksessa tutkitaan erilaisia metodologioita, joita käytetään tieliikenteen kasvihuonekaasujen vähennystoimenpiteiden kustannustehokkuutta arvioitaessa. Tutkimuksen kohteena ovat esimerkiksi polttoaineen kulutukseen ja hiilidioksidipäästöihin liittyvät standardit Yhdysvalloissa ja eU:ssa. Katsauksessa termi kustannusvaikuttavuus (engl. cost-effectiveness) määritellään rahamääräisenä päästövähennyksen yksikkökustannuksena (USD/t CO₂-ekvivalentti). Kirjoittajat tunnistavat lukuisia eroavaisuuksia kustannustehokkuustutkimusten metodologioissa. He tutkivat eroavaisuuksia kuuden eri otsikon alla:

- A. Analyysin laajuus (engl. scope of cost-effectiveness analysis)
- B. Kustannusten kohdistuminen (engl. cost perspective)
- C. Päästöleikkauksen kustannusten mallinnus (engl. abatement costing approach)
- D. Toimenpiteet (engl. type of measures)
- e. Keskeiset oletukset (engl. key assumptions)
- F. Kustannustehokkuuden laskenta (engl. cost-effectiveness calculation)

Vaihtelu alimman ja ylimmän kustannusestimaatin välillä on noin 400 USD/t CO₂-ekv. Aineisto myös osoittaa, että yhden metodologisen valinnan vaihtaminen toiseen voi helposti saada aikaan 100–200 USD/t CO₂-ekv suuruiseen muutokseen kustannusestimatissa. Kok ym. (2011) painottavatkin samaa näkökulmaa kuin mikä jo aiemmin oli esillä eli tutkimusten kontekstin huomioon tärkeyttä. Tämä näkökulma koskee myös kirjallisuuskatsausten käyttöä päätöksenteon tukena. Kirjallisuuskatsausten keskimääräiset kustannusarviot voivat olla hyvinkin harhaisia tai tehottomia, jos aineistossa hyödynnetyt metodologiat eivät ole yhteneväisiä päätöksentekijän esittämän kysymyksen kanssa.

Liikennemarkkinan kehittymiseen liittyvää epävarmuutta pyritään ymmärtämään erinäisten skenaariolaskelmien avulla. Päästövähennysten kustannusskenaarioissa pyritään haarukoimaan erilaisten teknologia-, talouskasvu- ja sääntelypolkujen vaikutuksia kustannuksiin. Semkinin ym. (2019) aineisto sisältää tutkimuksen, joka havainnollista hyvin skenaarioiden käyttöä ja niiden kohtaamia haasteita tieliikenteen päästövähennyskustannusten arvioinnissa. Copenhagen economicsin (2016) selvityksessä tutkitaan 12 eri skenaarion avulla Ruotsin liikennesektorin päästövähennyskustannuksia, kun tavoitteena on saavuttaa vuoden 2030 ilmastotavoitteet. Skenaarioissa päästöleikkaukset voidaan toteuttaa joko teknologisen kehityksen avulla tai tieliikennesuoritetta leikkaamalla. Kustannusvaikutuksissa löydettiin hyvin suuria eroja eri skenaarioiden välillä, sillä kustannusten vaihteluväli oli 0,5–9 % vuoden 2030 BKT:stä. Korkeimmat kansantaloudelliset kustannukset syntyvät skenaarioissa, joissa päästöleikkaukset perustuvat matkustus- ja kuljetus-suorituksen vähentämiseen. Kustannuksia syntyy kerrannaisvaikutuksista, kun taloudellinen toimeliaisuus vähenee usealla talouden sektorilla.

Tutkimuksessa raportoitiin haasteita jokaisen skenaarion kohdalla. Korkeimpien kustannusten skenaariot perustuvat epätodennäköisiin oletuksiin siitä, miten vaihtoehdotiset käyttövoimat ja niiden päästövähennyspotentiali kehittyvät. Tutkimuksen mukaan tärkeää on kuitenkin tutkia kustannusten kehittymistä myös hitaan teknologiakehityksen skenaarioissa. Teknologiakeskeiset skenaariot voivat helposti yliarvioivat uusien teknisten ratkaisujen leviämisenopeutta, sillä uuden tekniikan käyttöönotto voi olla hidasta ja kohdata esteitä johtuen mm. kuluttajien mieltymyksistä, epäsuorista kustannuksista, epävarmuudesta, infrastruktuurin kehityksestä ja markkinoinnista. Teknologiakeskeisistä skenaarioista on myös vaikea määrittää niitä seurauksia, joita muutokset talouden keskeisten alojen (lämmitys, teollisuus, sähkö) kustannusrakenteissa saavat aikaan. (Semkin ym. 2019.)

Yue ym. (2020) hyödyntävät mallintavaa MAC-analyysiä selvittäessään kustannustehokkaita päästövähennyspolkuja Irlannissa. Analyysin perustella julkinen liikenne on hiilineutraalia hyvin alhaisilla marginaalikustannuksilla, jonka mahdollistaa siirtymä biopolttoaineisiin. Hinnalla 180 €/tCO₂ henkilöliikenne on puolestaan hiilineutraalia, jolloin käyttövoimina ovat biopolttoaineet (19 %), sähköautot (9 %) and PHeV-autot (72 %).

Hieman korkeammilla vähennyskustannuksilla (240 €/tCO₂) kustannustehokas jakauma koostuu pelkästään sähköautoista, sillä biopolttoaineiden tuotantorajoitteiden vuoksi niiden käyttö tulee suunnata tavaraliikenteeseen. Koko liikennesektori on hiilineutraali hinnalla 518 €/tCO₂.

Yuen ym. (2020) painottavat mallintavan MAC-analyysin hyötyjä skenaariolaskelmien vaihtoehtona. Verrattuna skenaarioanalyysiin, joka rajoittuu vain muutamaan ennalta erikseen valitun vaihtoehdon tarkasteluun, niin MAC-analyysi harjaa huomattavasti tiheämmällä kammalla läpi eri päästövähennysmääriä ja teknologiavaihtoehtoja, joten se tarjoaa kattavamman näkymän eri teknologiavaihtoehdoista päätöksenteon taustalle. Skenaarioanalyysiltä voi esimerkiksi helposti jäädä huomaamatta kustannustehokkaan vähennyspolun nk. "flip-flop-käyttäytyminen". Irlannin liikennesektorilla tämä ilmenee 59 %:n leikkaustavoitteen kohdalla, kun biopolttoaineet katoavat äkillisesti pois henkilöliikenteestä. Jos skenaariot keskittyvät tieliikenteen fossiilittomuuteen, niin tämä siirtymä jää huomaamatta. Tällöin Yuen ym. (2020) mukaan henkilöliikenteen sähköistäminen saa liian suuren roolin fossiilittoman liikenteen tiekartoissa.

3.3 Ohjausmenetelmien valinnasta

Liikennesektorin ilmastopolitiikan tuloksellisuus ei riipu pelkästään yritysten ja kuluttajien onnistuneista valinnoista vaan myös viranomaisten oikeista päätöksistä ja toimista. Hallinnon tehtävä on asettaa strategisen tason tavoitteet politiikalle, mutta tämän tavoitteen operationalisoiminen sisältää lukuisia alemman tason valintoja ja päätöksiä. esimerkiksi jo päätettyjen päästövähennysten kustannukset riippuvat vahvasti siitä, miten ja millä keinovalikoimalla liikenteen käyttäjät näihin leikkauksiin ohjataan. Keskeinen vaikuttava tekijä tässä prosessissa on epävarmuus tavoitteiden ja tulosten välillä. epävarmuus liittyy pääasiassa säänneltävien toimijoiden reaktioihin eli siihen, miten kuluttajat ja yritykset reagoivat niille asetettuihin ohjauskeinoihin. Lisäksi epävarmuuden määrän ja luonteen voidaan katsoa muuttuvan aikahorisontin pituuden muuttuessa. esimerkiksi suhteellisen pitkällä aikavälillä teknologinen kehitys asettaa lisähaasteen viranomaispäätöksille. Viranomaisten pitäisi kuitenkin huomioida tämä tärkeä yksityiskohta päätöksissään, sillä ne omalta osaltaan ohjaavat liikkujia kohti erilaisia teknologioita.

Puhumme potentiaalisista päästövähennyksistä tilanteessa, joissa epävarmuutta liittyy sääntelyn aikaansaamiin leikkausmääriin. esimerkiksi Liikenne- ja viestintäministeriön esitys (2021) viittaa liikenne palveluna -konseptin potentiaaliin liikenteen hiilidioksidivähennysten yhteydessä. Haasteena tässä tapauksessa on ohjauskeinojen puute, sillä kirjallisuus ei tunnista toimenpiteitä, jonka avulla liikenteen digitalisaatio ja palveluistumisen realisoituvat mitattaviksi päästövähennyksiksi. Toisaalta polttoaineen verotus muodostaa selkeän instrumentin, mutta viranomaisen näkökulmasta veron korotuksen liittyvä

päästövähennemä on epävarma, koska autoilijoiden reaktioihin liittyy epävarmuutta. Tämä veronkorotuksen epävarmuus liittyy sekä liikkumisen määrään että kulkutapaan. Kulkutavan valintaan liittyvän epävarmuuden yhteydessä on syytä myös mainita nk. energia-paradoksi (Parry & Small 2015). On olemassa evidenssiä, jonka mukaan kuluttajat eivät kiinnitä (yhteiskunnallisten laskelmien näkökulmasta) riittävästi huomiota pitkän aikavälin polttoainesäästöihin, kun he valitsevat kulutukseltaan erilaisten autojen väliltä.

Tärkeää on tehdä ero suoran hallinnollisen ohjauksen (nk. command and control -ohjaus) ja taloudellisen ohjauksen välillä. Siinä missä suora hallinnollinen ohjaus asettaa autokoh- taisia säädöksiä, rajoitteita ja standardeja, niin taloudellinen ohjaus voidaan kuvata hajautettuna järjestelmänä. Keskiössä on taloudellisten insentiivien aikaansaama ohjaus. Toisin kuin suorassa hallinnollisessa ohjauksessa, jossa päästövähennysten toimenpide koskettaa kaikkia autoilijoita samalla tavoin, niin taloudellisessa ohjauksessa jokainen autoilija itse päättää, millä tavoin sääntely häntä koskettaa. Hän päättää, vähentääkö päästöjä vai mak- saako hän korvauksen aiheuttamastaan vahingosta.

esimerkiksi tieliikenteen päästökauppajärjestelmä (Liski ym. 2019; Seppänen ym. 2022) pystyy toteuttamaan varmuudella ne määrälliset tavoitteet, joita Fossiilittoman liikenteen tiekartta (Liikenne- ja viestintäministeriö 2021) asettaa. Käytännössä tämä tarkoittaa asteittain vähenevää lupamäärää tieliikenteen fossiilisille polttoaineille. Sääntelyn käänttöpuolena on, ettei se pysty kiinnittämään päästön yksikköhintaa. Toisaalta hinta- eli veroinstrumenttiin turvautumalla viranomainen kykenee kiinnittämään päästön yksikkö- hinnan, mutta samalla päästövähennysten ura muuttuu epävarmaksi. Tässä tapauksessa päästövähennyksien näkökulmasta merkitseväksi muuttuu politiikanteon konteksti, eli kuinka hyvin viranomainen pystyy säätämään veroinstrumentin tasoa ja kuinka hyvin hän pystyy ennakoimaan säätämisen muutosten vaikutukset. Lisäksi voidaan ajatella, että pitkäaikainen sitoutuminen tiettyyn instrumenttiin ja politiikkasuunnitelmaan luo arvo- kasta ennustettavuutta säädeltävien autoilijoiden keskuuteen.

Fossiilittoman liikenteen tiekartan (Liikenne- ja viestintäministeriö 2021) silmiinpistävä piirre on, että se muodostuu useasta tavoitteesta ja toimenpiteestä, jotka yhdessä tähtäävät tieliikenteen päästövähennystavoitteen saavuttamiseen. Tämä moninaisuus ei sinänsä ole ainutlaatuaista, sillä myös muissa maissa useaan tavoitteeseen pyritään usean toimen- piteen avulla. Myös tutkimuskirjallisuus on herännyt ilmiöön, ja politikayhdistelmistä löytyy runsaasti viimeaikaista tutkimusta (Axsen ym. 2020; Bhardwaj ym. 2020; Givoni 2014; Justen ym. 2014i; Justen ym. 2014ii; Rogge & Reichardt 2016).

Perusajatus politiikkayhdistelmien käytössä lienee se, että viranomaisen mielestä jokaisella lisätyllä instrumentilla on oma lisäinen vaikutus kokonaistavoitteen saavuttamisen kannalta. Poliitiikan onnistumisen mahdollisuuksia arvioitaessa on kuitenkin arvioitava myös yhdistelmien toimivuutta. Yksittäiset toimenpiteet voivat hyvinkin olla keskenään päällekkäisiä, ne voivat sisältää keskinäisiä synergioita tai jopa olla keskenään ristiriidassa.

Bhardwaj ym. (2020) huomauttavat myös sääntelyn kontekstisidonnaisuudesta. Siinä missä politiikkapakkaus (engl. policy package) on heidän mukaansa teoriapohjainen ideaali instrumenttien optimaaliseen yhdistelyyn, niin termi politiikkakerrostuma (engl. policy layering) kuvaa usein tosielämän sääntelykokonaisuuden sisältöä. Poliitikka kerrostuu, kun politiikkaikkunan aukeamiseen reagoidaan instrumenttien lisäyksillä sen paremmin miettimättä, onko kokonaisuuden osilla joitain merkittäviä yhteyksiä. Poliitiikan korjaussarja (engl. policy patching) puolestaan tunnistaa ja huomioi jo olemassa olevat institutionaaliset rakenteet (ml. olemassa oleva sääntely). Tavoitteena on lisätä sääntelyyn välineitä, jotka johdonmukaisesti täydentävät jo olemassa olevaa sääntelyä.

europaan unionin ilmastopoliitikassa talouden sektorit on jaettu päästökauppa- ja taakanjakosektoreihin. Nykyisellään päästökauppasektori koostuu sähkön- ja lämmön tuotannosta, energiantensiivisestä teollisuustuotannosta sekä sisämarkkinailmailusta. Komissio tosin suunnittelee, että päästökaupan piiriin liitettäisiin esimerkiksi tie- ja vesiliikenne. Liittämisen toteutustapa on vielä avoin. esimerkiksi tieliikenteen kohdalla on ehdotettu erillistä päästömarkkinaa, jonka liittämistä suurempaan markkinaan voidaan myöhemmin harkita (eU-Lex 2023)¹⁴.

Ilmastopaneelin tuoreessa raportissa (Seppänen ym. 2022) tutkitaan päästökaupan vaikutuksia Suomen liikennesektoriin. Raportissa keskustellaan erityisesti tieliikenteen kansallisesta päästökaupasta, joka voidaan toteuttaa myös eU:n päästökaupan rinnalla. Kansalliselle päästökaupalle on tarvetta, sillä eU:n päästökauppa ei välttämättä ehdi auttamaan Suomea kansallisten päästövähennystavoitteiden saavuttamisessa, ja eU:n päästökauppaa tuskin mitoitetaan niin, että Suomi saavuttaa vähennystavoitteensa pelkästään sen avulla. Ilmastopaneelin raportissa tarkastellaan viittä eri skenaariota ja niiden vaikutuksia polttoaineen hintaan, päästöoikeuksien hintaan ja tieliikenteen päästöihin. Raportissa kiinnitetään huomio myös liikenteen päällekkäiseen päästöohjaukseen, johon

14 Vuoden 2022 lopussa eU:n neuvosto, europaan parlamentti ja komissio pääsivät yhteisymmärrykseen päästökauppadirektiivistä, joka kattaa tieliikenteessä ja rakennusten erillislämmityksessä käytettävien polttoaineiden hiilidioksidipäästöt. ehdotuksen mukaan sääntely kohdistetaan polttoaineen jakelijoihin ja päästökaupan mukainen päästöoikeuksien huutokauppa käynnistyy vuonna 2027. (Liikenne- ja viestintäministeriö 2022.)

päästökauppajärjestelmä luonnollisesti rakentaa uuden kerroksen. Päällekkäisyyksien karsiminen voikin olla järkevää. Keskustelua herättää varmastikin polttoaineveron rooli tilanteessa, jossa liikennettä säädellään jo päästökaupan avulla¹⁵.

3.3.1 Suomalaisia hankelaskelmia liikenteen päästövähennysten kustannuksista

Kuten yllä jo mainittiin, liikennesektorin päästövähennysten kustannuksia voidaan tarkastella hyvinkin erilaisista näkökulmista. Tämä moninaisuus heijastuu myös Suomessa tehtyihin tutkimuksiin ja laskelmiin. Ohessa on tiivis esitys Suomessa tehdyistä hankelaskelmista viimeisimmän kymmenen vuoden ajalta. Ne on jaettu kolmeen osaan: energia-, liikennesektori ja käyttövoimamallinnuksiin. Tämän jako tulee juuri korostaneeksi näkökulmien moninaisuutta.

3.3.1.1 Energiasektorimallinnus

Ilmastopolitiikkatoimien kustannustehokkuus, indikaattorit ja vaikutukset (IMPAKTI)-hankkeessa (Lindroos ym. 2012) arvioitiin uusiutuvan energian käytön lisäämisen vaikutuksia kasvihuonekaasupäästöihin, työllisyyteen, valtion kustannuksiin ja yleisesti kansantalouteen. Hankkeen näkökulma on tuotantolähtöinen, sillä siinä keskitytään kotimaisen uusiutuvan energian tuotantoon eli metsähakkeen hyödyntämiseen, tuulivoimaan, bio-kaasureaktoreihin sekä liikenteen biopolttoaineiden tuotantoon. Liikennesektoria ei itsessään mallinneta, vaan se on osa taakanjakosektoria. Raportissa esitetään myös sektorien välisiä riippuvuuksia. esimerkiksi liikenteessä käytetyn biopolttoainemäärän kasvu ei ainoastaan laske päästöjä taakanjakosektorilla vaan se lisää päästöjä päästökauppa- ja LULUCF-sektorilla. Huomionarvoista myös on, että raportoitu kustannustehokkuus painottaa valtion suoria kustannuksia, eli yksityisiä tai epäsuoria kustannuksia ei laskelmissa esitetä.

15 ehdotetun direktiivin mukaan perustetaan ns. sosiaalinen ilmastorahasto, joka tullaan rahoittamaan ensisijaisesti uuden päästökaupan huutokauppatuloilla. Suomi ei ole kannattanut kyseistä rahastoa. (Liikenne- ja viestintäministeriö 2022) Yksi syy lienee polttoaineverotuksen merkittävä rooli valtion budjetin rahoituksessa. Jos polttoaineen päällekkäisestä hinnoittelusta joudutaan poistamaan vero-osuus, niin tämä jättää merkittävän loven Suomen kansallisiin verotuloihin. Toisaalta voidaan tässä yhteydessä myös kysyä, miten polttoaineen kulutus voi toimia tulevaisuudessa veropohjana, kun liikennepolitiikan keskeinen tavoite on polttomoottoriautoilusta luopuminen.

Raportissa laskettiin vaikutuksia kahdella eri tavalla. Kasvihuonekaasuvaikutuksia tutkittiin ensin yksinkertaisten vaikutuskertoimien avulla. Näihin kertoimiin tiivistyy korvausvaikutus, joka syntyy siirryttäessä nykyisestä tuotannosta kotimaisiin uusiutuviin energiatuotantomuotoihin. Kertoimiin ei kuitenkaan voida sisällyttää Suomen energiajärjestelmän toimintaa tai ilmastopolitiikan kehitystä, joten vaikutuskertoimia vastaavia arvioita tehtiin myös TImeS-energiajärjestelmämallilla. Kyseessä on Suomen energiainfarktinnat mallintava osittaistasapainomalli. Raportissa esitetyt julkisen vallan kustannukset laskettiin puolestaan VATT:in VATTAGE-kansantalousmallilla.

KeIJU-hankkeessa (Koljonen ym. 2017i, 2017ii) tarkasteltiin puolestaan laaja-alaisesti Suomen mahdollisuuksista saavuttaa kustannustehokkaasti energia- ja ilmastotavoitteita. Hanke tuotti myös vaikutusarvioita (Koljonen, 2017ii) ensimmäiseen keskipitkän aikavälin ilmastopolitiikan suunnitelmaan (KAISU, Ympäristöministeriö 2017), joka koskee ilmastopolitiikan toteutusta taakanjakosektorilla. Keskeistä raportin arvioinnissa on energiajärjestelmämallinnus, eli siinä hyödynnetään energiainfarktinnoiden TImeS-VTT osittaistasapainomallia. Täten liikennesektorin päästömuutokset mallinnetaan osana energiainfarktinnoiden päästöleikkauksia. Liikennesektoria koskevissa laskelmissa hyödynnetään ALIISA-autokantamallia TImeS-VTT-mallin lähtötietoina.

Raportissa kustannuksia arvioidaan sekä järjestelmätasolla (bottom-up-näkökulma) että kansantalouden tasolla (top-down-näkökulma). Raportin mukaan taakanjakosektorin merkittävin päästövähennyspotentiaali löytyykin juuri liikenteessä, erityisesti tieliikenteestä. Vähennystoimet jaotellaan kolmeen toimenpidekokonaisuuteen (kokonaisvähennys 3,1 Mt CO₂ vuonna 2030): (1) fossiilisten polttoaineiden korvaaminen uusiutuville (1,5 Mt CO₂), (2) energiatehokkuuden parantaminen (0,6 Mt CO₂) ja (3) liikennejärjestelmän energiatehokkuuden parantaminen (1 Mt CO₂). Raportissa toisaalta todetaan, että liikenteen päästöjen vähentämiseen, kustannuksiin ja ympäristövaikutuksiin liittyy myös merkittävimmät epävarmuudet. Järjestelmätason laskelmissa kaksi vuoden 2030 keskeistä epävarmuustekijää ovat öljyn markkinahinta sekä sähköautojen hankintakustannus.

Sitran (Granskog ym. 2019) laskelmissa esitetään tavoitteeksi 60 %:n kokonaispäästövähennys vuoteen 2030 mennessä, kun vertailuvuodeksi on asetettu vuosi 2015. Tutkimus keskittyy neljän suuripäästöisen toimialan päästövähennyksiin, joita ovat teollinen tuotanto, sähkön ja lämmön tuotanto, liikenne, sekä rakennusten lämmitys. Laskelmat perustuvat osittaistasapainomallinnukseen, eli mallissa optimoidaan toimijoiden yhteisten ylijäämien määrää. Laskelmat tehdään järjestelmätasolla, eli mallinnus pystyy huomioimaan neljän sektorin keskinäisiä riippuvuuksia. Käytetty malli ei raportin perusteella ole julkisesti saatavilla eikä sitä ole kovin tarkasti dokumentoitu itse raportissa. Tosin käytetyt oletukset on esitetty selkeästi.

Laskelmien mukaan päästövähennystavoite tarkoittaa liikennesektorilla 57 %:n kokonaispäästövähennystä (6.2 Mt CO₂) vuosien 2015 ja 2030 välillä. Tämä jakautuu seuraavasti: (1) Siirtyminen sähköautoihin (4.6 Mt CO₂) (2) sekoitevelvoitteen kasvattaminen (1.1 MtCO₂) ja (3) polttomoottorienautojen tehokkuuden kasvattaminen (0.5 Mt CO₂). Merkittävä piirre laskelmissa on, että vaikka leikkaustavoite on kunnianhimoinen, niin se on mahdollista toteuttaa kustannusnegatiivisesti: Järjestelmätason laskelmat osiotavat, että liikennesektorin leikkausten keskimääräinen kustannus on -77 €/tCO₂. Tämä arvio tosiaankin kertoo sen, että tieliikennettä kannattaa voimakkaasti sähköistää jopa ilman ilmastopoliittisia tavoitteita.

3.3.1.2 Liikennesektorimallinnus

VTT:n ja VATT:in yhteistyönä syntyi tutkimusraportti (Tamminen ym. 2015), jossa selvitettiin tieliikenteen hiilidioksidipäästöjen vähennysuraa vuoteen 2030 saakka. Tutkimuksen tavoitteeksi asetettiin päästöjen väheneminen 40 prosentilla perusvuoden 2005 tasosta. Haastetta lähestytään erilaisten teknologiaskenaarioiden avulla. Perusskenaarioksi asetetaan bensiini- ja dieselautoihin perustuva autokanta, joka vallitsevaan jakeluvaihtoteeseen ja verotukseen perustuen tuottaa 21 %:n päästövähennyksen. Lisävähennyksien saavuttamista tutkitaan aluksi skenaarioilla, joilla vähennys toteutetaan pelkästään yhteen teknologiavaihtoehtoon tukeutumalla. Nämä skenaariot osoittautuvat joko käytännössä toteutumiskelvottomiksi tai vähintään kalliiksi, joten tutkimuksessa luodaan myös nk. KeHITYS-skenaario. Tutkimuksen perusteella tässä skenaariossa tarvittava päästövähennys vuonna 2030 saavutetaan siirtymällä biokaasuun (5 %:n osuus vähennyksestä), sähköön (9 %) ja nestemäisiin biopolttoaineisiin (86 %).

Tutkimuksessa lasketaan autokannan lukumäärä ja koostumus, eri polttoaineiden käyttöosuudet ja kokonaispäästöjen määrä VTT:n kehittämällä ALIISA-mallilla. Tällä mallilla lasketaan myös eri teknologiavaihtoehtojen ajoneuvokustannukset ja päästövähennyksien aikaansaamat lisäkustannukset. ALIISAN tulosten perusteella arvioitiin myös polttoaineen ja energian jakelusta aiheutuvat kustannukset. Joillekin skenaarioille lasketaan myös kansantaloudellisia kustannuksia VATT:in VATTAGE-mallilla eli yleisen tasapainon mallilla.

Suomen ilmastopaneeli (Liimatainen ym. 2015) esittää raportissaan päästövähennysten saavuttamiseksi erilaisia toimenpidekokonaisuuksia. Teknisten muutosten lisäksi esitetään muutoksia yhteiskuntarakenteeseen ja henkilöautojen käyttötapoihin. Kävelyn ja pyöräilyn infrastruktuurin kehittämistoimenpiteet ovat yhteiskunnallisesti kannattavia, koska niihin tyypillisesti liittyy myös kansanterveydellisiä hyötyjä. Sosiaalinen autonkäyttö tarkoittaa kimpakkyytejä ja yhteiskäyttöautoja. Sosiaalisen autonkäytön kasvava suosio tarkoittaisi sekä kasvavaa energiatehokkuutta ilman lisäkustannuksia että pienenevää autokantaa. Raportin laskelmat osoittavatkin, että nämä ei-tekniset päästövähennykset

ovat yhteiskunnallisesti hyvin kannattavia¹⁶. Liikenteen hiilidioksidipäästöjen ennakointiin käytetään raportissa puolestaan excel-malliin perustuvaa skenaariotyökalua. Tämä työkalu yhdistää henkilöliikennesuoritearvion henkilöautoilun päästömalliin. Tieliikennekuljetuksia mallinnetaan hieman henkilöliikennettä kevyemmällä työkalulla.

Raportissa päästövähennykset ja niiden kustannukset esitetään kolmen skenaarion avulla, joista yksi on BAU-perusskenaario. Varsinaisia päästövähennysskenaarioita ovat Ilmasto-paneelin suosittelemiin toimenpiteisiin perustuva SUOSITUS-skenaario sekä ja puhtaisiin ajoneuvo- ja käyttövoimatoimenpiteisiin perustuva TEKNOLOGIA-skenaario. Raportin mukaan päästövähennystavoitteiden saavuttaminen on toki mahdollista pelkästään teknisillä toimenpiteillä, mutta se edellyttää vaihtoehtoisten käyttövoimien nopeaa käyttöönottoa. Tämän teknologiapainotteisen toteutuksen varjopuolena on, että yhteiskunnalta jää saamatta mittavia yhdyskuntarakenteeseen, kulkutapavalintoihin ja autojen käyttötapojen muutoksiin liittyviä hyötyjä.

Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisussa (Fossiilittoman liikenteen tiekartta, Liikenne- ja viestintäministeriö 2021), esitetään toimenpiteitä, joiden avulla nykyiseen hallitusohjelman liikennesektorille asetetut tavoitteet saavutetaan kustannustehokkaasti. Tiekartta sisältää kolme eri vaihetta. Tämä on seurausta siitä, että eri toimenpiteiden vaikutukset ja eU:n toimet sisältävät epävarmuuksia, joten toimenpiteitä joudutaan tulevaisuudessa mitä todennäköisimmin säätämään. Raportissa esitetään näille erilaisille toimenpiteille myös päästövähennys- ja kustannusvaikutuksia. Näiden vaikutusten arviointimenetelmiä tai lähteitä ei sen tarkemmin avata. Joidenkin toimenpiteiden tai hankkeiden kohdalla (esimerkiksi eU:n lainsäädäntövalmisteluun vaikuttaminen tai liikenteen digitalisaation ja palveluistumisen edistäminen) vaikutusten arviointi on luonnollisesti vaikeaa¹⁷.

3.3.1.3 Käyttövoimamallinnus

Viimeaikaisesta suomalaisesta hankekirjallisuudesta löytyy myös raportteja, jotka eivät niinkään tarkastele koko liikennesektorin kustannustehokasta päästövähennystä, vaan keskittyvät tätä rajoitetumpaan tavoitteeseen. Tällöin tyypillisesti tarkastellaan yhden

16 VN-TeAS- hankkeen raportti (Tuominen ym. 2015) esittelee eräitä liikenteen energia-tehokkuustoimenpiteiden potentiaalisia päästövähennyksiä ja niiden taloudellisia merkitsevyyksiä.

17 Liikenteen ilmastopolitiikan työryhmä (Särkijärvi ym. 2018) esittää laajan toimenpide-ehdotusten listan, joka tekijöiden mukaan mahdollistaa muutospolun kohti hiiletöntä liikennettä. Raportin loppuosan taulukot (luku 8) sisältävät myös arvioita ehdotettujen toimenpiteiden seurauksista. Taulukot esittävät arvioita toimenpiteiden aikaansaamista päästövähennyksistä, julkisen vallan kustannusvaikutuksista sekä vaikutuksista kotitalouksille ja elinkeinoelämälle. Nämä laskelmat ovat kuitenkin luonnosmaisia, mikä tarkoittaa, ettei niiden taustoja avata lukijalle.

käyttövoiman lisääntyvää käyttöä, sen päästövähennyksiä ja kustannuksia. VN-TeAS-hankkeessa (Biopolttoaineiden kustannustehokkaat toteutuspolut vuoteen 2030, Sipilä ym. 2018) tuotettiin vaikutusarvio siitä, kuinka kotimaisten biopolttoaineiden osuutta voidaan nostaa ja biopolttoaineiden sekoitusvelvoite toteuttaa kustannustehokkaasti. Raportissa esitetään erillisiä skenaarioita erilaisille sähköautojen määrille, sillä sähköautojen määrällä on vaikutusta tarvittavien biopolttoaineiden määriin. Kustannusvaikutuksia lasketaan kuluttajille, eri tuotantosektoreille ja valtion talouteen. Afryn (Sipilä ym. 2021) toteuttamassa tutkimuksessa tarkasteltiin entistä suurempaa jakeluvaihtoehtoa. Tämä on mahdollista, jos kestäväksi luokitellun kotimaisen uusiutuvan dieselin ja biokaasun saatavuus paranee ja mittavat investoinnit sähköpolttoaineiden teollisen mittakaavan tuotantoon toteutuvat. Myös tässä työssä esitetään kustannusvaikutusarviot valtiontaloudelle, tuotannon eri sektoreille ja kuluttajille.

Sähköautomäärien kasvulle asettuja tavoitteita ja kasvuun tarvittavia ohjauskeinoja käsitellään GASELLI-hankeen raportissa (Pihlatie ym. 2019). Työ sisältää myös mallintavan osan, jossa hyödynnetään systeemidynaamista mallinnusta. Kyseisessä mallinnuksessa pystytään tarkastelemaan kuluttajan auton valintaa ja siihen vaikuttavia tekijöitä ja vuoro-vaikutuksia. Mallinnuksessa simuloidaan useita erilaisia skenaarioita, jotka pohjautuivat erilaisiin sähköautojen valintaan kannustaviin ohjauskeinoihin. Simulointituloksissa raportoidaan myös ohjauskeinojen tehokkuus ja kustannukset. Ohjauskeinon kustannuksella tarkoitetaan tässä kohtaa sähköautojen edistämistoimen aikaansaamaa suoraa menoerää.

Mainittakoon vielä Ilmastopaneelin kehittämä ja julkaisema Autokalkulaattori (<https://www.ilmastopaneeli.fi/autokalkulaattori/>). Autokalkulaattori on nettipohjainen laskuri, johon voi syöttää ajoneuvokohtaisia tietoja ja laskuri ilmoittaa ajoneuvon koko elinkaaren kattavat kasvihuonekaasupäästöt ja kustannukset.

3.3.2 Liikennesektorin hankelaskenta ilmastopolitiikassa

Yksi mielenkiintoinen näkökulma koskee jo vakiintuneiden hallinnon laskentamallien suhdetta ilmastopolitiikan kustannuslaskentaan. esimerkiksi liikenneväylien hankearvioinnin yleisohje (Väylävirasto 2020a) määrittelee yleiset periaatteet valtion liikenneväyläinvestointien hankearvioinnista. Tämän yleisohjeen käsitteistö ja kustannuslaskennan rakenne ja toteutus ovat hyvin yhteneväisiä jo esitetyn ilmastopolitiikan kustannuskehikon

kanssa¹⁸. Yksittäisten hankearvioiden lisäksi Väylävirastolla on vakiintunut tapa suunnittelu- ja investointiohjelman laatimiseen (Väylävirasto 2022). Ns. PRIO-työkalun avulla pystytään tuottamaan tietoa hankkeiden ja hankekorien keskinäisistä kannattavuuksista¹⁹.

Liikenneväyliin liittyviin investointeihin on olemassa vakiintuneet hankearviointiohjeet, jotka sisältävät vaikutusten arvioinnin ja kannattavuuslaskennan periaatteet. Väylähankkeiden kannattavuuslaskennassa tutkitaan vertailuvaihtoehdon ja yhden tai useamman hankevaihtoehdon hyötyjen ja kustannusten eroja. Laskennassa otetaan huomioon kaikki vaikutukset, jotka voidaan arvottaa yksikköarvo-ohjeiden mukaisesti, eli käytännössä:

- investointikustannukset,
- vaikutukset väylänpidon kustannuksiin,
- käyttäjähyödyt (ajoneuvokustannukset, aikakustannukset, verot ja maksut),
- tuottajan ylijäämän muutokset (liikennöintikustannukset, lipputulot, verot ja maksut),
- onnettomuus- päästö- ja melukustannusten muutos,
- investoinnin jäännösarvo ja
- vaikutukset jukistalouteen (vero-, maksu- ja muut tulot, tuet, ostot ja muut menot).

Hyödyille ja kustannuksille lasketaan nykyarvo 30 vuoden laskenta-ajalta. Kannattavuuslaskelmista tulee myös tehdä herkkyystarkastelu, jossa tarkastellaan yleensä investointikustannusten ja liikenne-ennusteiden epävarmuuksia. (Väylävirasto 2020b.) Nämä väylähankkeiden kannattavuuslaskennan osa-alueet voivat toimia arvioinnin lähtökohtana myös päästövähennystoimenpiteiden kokonaisvaltaisen kustannustehokkuuden arvioinnissa. Soveltamisessa on kuitenkin syytä tunnistaa, että väylähankkeiden vaikutusten arviointi tapahtuu väyläverkon yksittäisten kohteiden tasolla, kun taas päästövähennystoimenpiteet kohdistuvat lähtökohtaisesti liikennejärjestelmä- ja yhteiskuntataloudellisille tasoille, jolloin vaikutusten rajaaminen ja täsmällinen arviointi ovat ongelmallisia.

Nykyinen hankelaskenta sisältää ilmastopolitiikan kustannuselementin, sillä väylähankkeiden vaikutusten jäsentely huomioi liikenteen ilmastovaikutukset eli liikenteen ja väylienpidon CO₂-päästöt (Väylävirasto 2020a, Taulukko 1, s. 23). Arvottamisessa käytetään

18 Hankearvion kustannuslaskennan ohjeistus on toki yksityiskohtaisempi kuin edellä esitetty ilmastopolitiikan yhteiskunnallisen kustannuslaskennan kehikko. Hankearvio-ohjeessa mm. määritetään, miten verot tulee ottaa huomioon kustannuslaskennassa.

19 Väylävirastossa on myös kehitteillä nk. Ihku-laskentapalvelu (Peltola ym. 2022), jonka tarkoituksena on kehittää panoksiin pohjautuvaa päästölaskentaa väylärakentamisen päästöistä.

kasvihuonekaasujen yksikköhintaa. Ilmeistä on, että tämän yksikköhinnan tulisi heijastaa ilmastopolitiikan tavoitteita, eli kiristyvän ilmastopolitiikan tulisi siirtyä myös tähän yksikköhintaan. On kuitenkin selvää, että yksittäisten väylähankkeiden tarpeisiin kehitetty laskentamalli ei pysty vastaamaan tieliikenteen ilmastopolitiikan kaikkiin tarpeisiin. Haasteita on kolmenlaisia: i) Ilmastopolitiikan hankkeet eivät aina ole suoraan verrattavissa väylähankkeisiin, ii) ilmastopolitiikan hankekorien vertailu on huomattavasti väylähankkeiden vertailua monimutkaisempaa ja iii) ilmastopolitiikan toteutus ei vastaa väylähankkeiden toteutustapaa.

Väylähanke on suhteellisen selväpiirteinen yksittäinen kohde. Toki hankelaskelmien nettohyödyn kattavuuteen, mittaamiseen ja käyttökelpoisuuteen liittyy useita erilaatuisia kysymyksiä (Liimatainen 2016; Liikenne- ja viestintäministeriö 2020), mutta sinänsä keskeiset erät ovat helposti hahmotettavissa ja niiden suuruusluokat arvioitavissa. Tutustumalla esimerkiksi Fossiilittoman liikenteen tiekarttaan (Liikenne- ja viestintäministeriö 2021) käy selväksi, että ehdotetut ilmastopolitiikan toimenpiteet ovat huomattavan erilaisia ja monimuotoisia verrattuna väylähankkeisiin. Toimenpiteet koskettavat esimerkiksi autoilun käyttövoimamuutosta, jossa keskeistä ei ole pelkästään siirtymä uuteen käyttövoimaan, vaan jakauma uusien käyttövoimien kesken. Tällöin toimenpiteen kohteena on kuluttajien valinnat, joten kustannuslaskennan tulisi rekisteröidä kaikki kulutusmuutoksiin liittyvät kustannuserät. Käyttövoimamuutos nostaa uusia tietotarpeita kustannuslaskentaan, kuten esimerkiksi kuljettajan ajoneuvohyödyt (kts. liite). Lisäksi käyttövoimamuutos ei tapahdu pelkästään ajoneuvokantaa uudistamalla, vaan hankelaskelmaan tulee liittää jakeluverkon investointikustannus ja epävarmuus siitä, missä määrin kannattaa investoida yhteen käyttövoimaan. Verrattuna yksittäisen väylähankkeen epävarmuuksiin, käyttövoiman muutoksen epävarmuudet ja riskit ovat aivan omaa luokkaansa.

Sekä Ilmastopolitiikka että väylien investointiohjelma sisältävät lukuisia hankkeita sekä hankkeiden välisiä rahamääräisiä arviointeja. Ilmastopolitiikan toimenpidejoukon ja väyläinvestointien hankekorien välillä on kuitenkin yksi merkittävä ero. Ilmastopolitiikan rajoitteena on päästörajoite, kun taas investointiohjelman rajoitteena on investointibudjetti. Suomen ilmastopolitiikka asettaa päästömääräiset tavoitteet liikenteen päästövähennyksille. Täten ilmastopolitiikan analyysimenetelmien tulee erota väylähankkeiden vastaavista menetelmistä. Päästörajoitteiden tapauksessa keskeiseksi käsitteeksi nousee päästötoimenpiteen yksikköhinta, joka mahdollistaa vertailun eri toimenpide-ehdotusten välillä ja auttaa päätöksessä toimenpidekokonaisuuden valinnassa.

Väylien investointiohjelman toimeenpano on perustaltaan yksinkertaista hallinnollista budjettiohjausta, jossa parhaiksi katsotuille hankkeille osoitetaan varat väyläbudjetista. Hankkeen toteutuksen ohjauksessa voi tulla eroja, joista voi myös seurata merkittäviä tehokkuuseroja. Ohjauksessa voidaan käyttää taloudellisiin insentiveihin perustuvia menetelmiä (esim. allianssimalli), jossa hankkeen riskejä jaetaan etukäteen sovittujen

sääntöjen mukaisesti. Ilmastopolitiikan toteutuksessa tarjolla on puolestaan suuri määrä luonteeltaan erilaisia ohjauskeinoja, ja eri ohjauskeinot voivat tuottaa erilaisia kustannuksia esimerkiksi sen perusteella, miten ne ohjaavat kuluttajia valinnoissaan. Kun autoilun kasvihuonekaasupäästöjä vähennetään joko polttomoottoriautojen tehokkuutta kasvattamalla tai siirtymällä uusiin käyttövoimiin, niin tutkimuskirjallisuuden perusteella siirtymän tehokkuuteen vaikuttaa se, käytetäänkö ohjauksessa päästörajoja, teknologia-standardeja, päästö- tai autoveroja tai tukipalkkioita. Tähän siirtymään tulee liittää myös kysymys uusien käyttövoimien jakeluverkostoinvestointien ohjauksesta. Kysymys kuuluu, että millä tavoin ja millä tarkkuudella nämä tehokkuustarkastelut voidaan siirtää kustannuslaskelmiin²⁰.

Voimme todeta, että kokemus tieliikenteen hankelaskennasta auttaa ilmastopolitiikan laskelmien suorittamista. On kuitenkin selvää, että ilmastopolitiikan hankekokonaisuus on väyläohjelmien hankekokonaisuuksia laajempi ja moninaisempi kohde. Hankearvioinnin ohjeistus ja kokemus laskennan suorittamisesta ovat tarpeen ilmastopolitiikassa erityisesti silloin, kun laskennan kohteena ovat ilmastopolitiikan yksittäiset toimet.

3.4 Yhteenveto kirjallisuudesta

Kirjallisuuden perusteella voidaan esittää seuraavat vastaukset tutkimuskysymyksiin.

1. Missä laajuudessa liikenteen ilmastopoliittisten toimenpiteiden kustannustenvaikutusten tarkastelu tulisi tehdä ja miten tarkasteltavia vaikutuksia ja vaikutusten ilmenemistä tulisi rajata?

Tutkimuskirjallisuuden perusteella kustannustarkasteluja tehdään hyvin eri laajuisina. Toisaalta kirjallisuudesta ei löydy normatiivista pohdintaa siitä, minkä laajuinen analyysi olisi optimaalisin vaihtoehto. Sinällään tutkimusaihe on laaja, sillä tieliikennesektori on hyvin merkittävä kansantalouden osa. Se on keskeinen sektori energiamarkkinoilla ja sen verkostot ja panoskustannukset määrittävät myös muiden toimialojen menestystä. Tie-liikennesektorin tuotanto saa myös aikaan useita ulkoisvaikutuksia ja näiden vaikutusten sisäistäminen tapahtuu suurien epävarmuuksien vallitessa.

20 Suomen kansantalouden näkökulmasta liikennesektori on yksi saastuttaja, ja kansantalouden hiilineutraalisuus vaatii kaikkien sektorien päästövähennyksiä ja näiden sektorien välisten vähennysten koordinoitua. eerola ym. (2021) on katsaus tämän tavoitteen kotimaisiin ohjaustoimiin.

Kun kustannustenvaikutusten tarkastelu laajenee, niin analyysiin tulee mukaan erilaisia markkinareaktioita ja epäsuoria vaikutuksia. Tarkastelun laajuutta voidaan havainnollistaa analyysin perusteella ratkeavien endogeenisten muuttujien lukumäärän mukaan. Nk. yksittäistarkastelut sisältävät pääosin toimenpiteiden aikaansaamia suoria vaikutuksia, joten mallien muuttujat ovat tyypillisesti tarkasteltavan mallin ulkopuolella määräytyviä eksogeenisiä muuttujia. energiamarkkinan sektoritarkasteluissa määräytyy jo joitakin endogeenisten muuttujien arvoja, kun energiavirrat jakautuvat eri käyttötarkoitusten välillä. Yleisissä tasapainomalleissa endogeenisten muuttujien lukumäärä puolestaan kasvaa entisestään, sillä ne pystyvät huomioimaan myös talouden eri sektorien välisiä riippuvuussuhteita.

Analyysin laajuuden kasvattamisella on kuitenkin hintansa. Talouden täsmällinen mallintaminen on haasteellista. esimerkiksi kirjallisuudessa keskustellaan kuluttajien valintojen yhteydessä taloudellisuuden rebound-efektistä ja energiaparadoksista, jotka vaikeuttavat kulkutapajakauman kehityksen ennustamista. Myös sähköautokysynnän hintajoustoja on vaikeaa arvioida aineistolla, joissa havaintoja on todella vähän. Monimutkaisissa talouden yleisissä tasapainomalleissa monet epävarmuudet helposti kertaantuvat, jolloin tulosten luotettavuus kärsii. Yksittäistarkastelujen etuna onkin tarkastelun kapea rajaus, joten sen avulla laskettujen kustannusten syntyä on helppo seurata ja laskelmia voidaan pitää suhteellisen tarkkoina.

Kustannusten syntymiseen vaikuttavat myös ilmastopolitiikan monet reunaehdot, joista erityisesti mainittakoon politiikan toteutuksessa käytetyt viranomaisten ohjauskeinot. esimerkiksi tutkimuskirjallisuuden tasapainomallien kustannukset on laskettu yleisesti sillä oletuksella, että yrityksiä säädellään hiiliveron avulla. Toisaalta monet tarkastelut esittävät pelkästään vähennyspotentiaaleja ilman linkkiä leikkausten ohjauskeinoihin. erityisesti, kun mietimme fossiilittoman liikenteen tiekartan toteutusta, niin päästökauppa (joko kansallisella tai euroopan unionin tasolla) mahdollistaa minkä tahansa päästövähennystavoitteen saavuttamisen siten, että päästövähennyksen määrään ei liity epävarmuutta. Tämän lisäksi päästökauppajärjestelmä on suorien leikkauskustannusten näkökulmasta edullinen verrattuna tilanteeseen, jossa meillä on lukematon määrä erilaisia (osin päällekkäisiä) ohjauskeinoja käytössä. Herääkin kysymys siitä, mihin lukuisia ohjauskeinoja tarvitaan tilanteessa, jossa yhden ohjauskeinon avulla saavutetaan ilmastopolitiikan tavoite kustannustehokkaasti.

2. Miten toimenpiteiden toteuttamiskustannuksia tulee kohdentaa nimenomaan päästöjen vähentämisen kustannuksiksi toimenpiteen muihin mahdollisiin vaikutuksiin nähden?

Liikkumispalveluiden ja liikenneinfrastruktuurin kehittämiseen liittyy kasvihuonekaasupäästöjen vähentymisen lisäksi muutoksia hengitysilman laadussa, meluisuudessa, ruuhkautumisessa sekä liikenneonnettomuuksien määrissä. Kasvihuonekaasuleikkauksen eri toteutustavoilla on erilaisia vaikutuksia kyseisiin ulkoisvaikutuksiin. esimerkiksi, jos päästöleikkaus tehdään siirtymällä sähköautoiluun, niin sillä on positiivinen vaikutus tieliikenteen meluun ja ilman laatuun. Jos siirtymä tapahtuu puolestaan pyöräilyä lisäämällä, niin melun ja ilmansaasteiden muutoksen lisäksi muutoksia tapahtuu myös liikenneonnettomuuksissa ja terveysvaikutuksissa.

Ilmastopolitikan laskelmissa nämä liitännäisedut tyypillisesti huomioidaan. Hyötyerien liittämisessä tulisi kuitenkin noudattaa harkintaa. ensinnäkin ilmastonmuutos on systeemitason ongelma, joten yksittäiset muutokset leviävät pitkälle talouden verkostoissa. Haasteeksi nousee kysymys siitä, millä laajuudella ja tarkkuudella on järkevää hyötyjä ja kustannuksia jäljittää. Toisaalta, jos toimenpiteen hyötyjä ja kustannuksia on mahdotonta laskea tarkasti, niin niiden kokoluokat tulisi ainakin selvittää.

Toinen haaste koskee haittojen perusurien määrittämisen vaikeutta, eli kysymystä siitä, mitä olisi tapahtunut, jos ilmastopolitiikkaa ei olisi olemassa. Liikkumispalveluita ja liikenneinfrastruktuuria kehitettäisiin todennäköisesti päästövähennystarpeista huolimatta, mutta päästöleikkauksiksi tulisi kuitenkin huomioida ainoastaan ilmastopolitiikan aikaansaamat lisävähennykset. Kolmas haaste liittyy kustannusten määrittämiseen. Ilmastopolitikan toimenpiteet eivät välttämättä ole halvin tapa toteuttaa liitännäisiä päästövähennyksiä.

Kuten ilmastovaikutusten yhteydessä, niin myös liitännäishyötyihin liittyy epävarmuutta. esimerkiksi kansanterveysvaikutusten arvioimiseen liittyy huomattavia epävarmuustekijöitä. erityisesti pitkän aikavälin terveysvaikutusten tunnistaminen ja niiden yhdistäminen yksiselitteisesti päästövähennystoimenpiteen seuraukseksi on haasteellista (Gao ym. 2018).

3. Tuleeko julkisia ja yksityisiä panostuksia sekä julkisia ja yksityisiä kustannusvaikutuksia käsitellä kokonaiskustannusten tarkasteluissa eri tavoin?

Yhteiskunnallinen (julkinen) kustannus sisältää saastumisen aikaansaamia ympäristökustannuksia ja saastumisen vähentämisen aikaansaamia kustannuksia. Yksityinen kustannus sisältää puolestaan päästöjen vähentämiskustannusten lisäksi myös ympäristöverot ja -maksut. Tämän selvityksen pääasiallinen tutkimuskohde on päästöjen vähentämisen kustannukset.

Julkisella panostuksella voidaan tarkoittaa joko julkisen vallan ohjauskeinojen käyttöä tai suoria investointeja päästöleikkauksiin. Ohjauskeinojen käyttö perustuu näkemykseen, jonka mukaan saastuminen on ulkoisvaikutus ja julkishaitake, joten yksityiset motiivit itsessään eivät saa aikaan yksityisiä panostuksia päästöleikkauksiin. Täten julkisen vallan panostus on ainoa keino saada liikkeelle yksityisiä panostuksia päästöjen vähennysoimiin.

Ohjaustoimi on mikä tahansa julkisen vallan toimi, joka saa aikaan päästövähennyksiä. Tie-liikenteen päästövähennysten yhteydessä julkisen vallan potentiaalisten ohjaustoimien määrä on suuri ja niitä voidaan myös luokitella eri tavoin. Rajoitteet voivat olla esimerkiksi määrällisiä, jolloin päästömääriä rajoitetaan asettamalla niille ylärajoja. Standardi voidaan asettaa päästömäärän sijaan koskemaan myös tietyn teknologian käyttöä tai se voi olla velvoite tarjota tietynlainen palvelu (kuten esimerkiksi huoltoasemien autojen sähkölatauspaikat). Ohjaus voi olla myös taloudellista, jolloin käytössä ovat erilaiset verot, maksut ja tukitoimet.

Julkinen panostus suoraan investoimalla puolestaan tarkoittaa verovaroin kustannettua päästövähennystä (kuten esimerkiksi investointi julkiseen sähköautojen latausverkostoon). Ympäristöverotusta voidaan tarkastella myös verokertymän näkökulmasta, joten tätä ohjausmuotoa voidaan käyttää myös päästövähennysten investointien rahoitukseen. Tyypillisesti ympäristöveron tarkoitus on ohjata saastuttajia vähentämään saastuttavaa toimintaa, joten tästä näkökulmasta verokertymän kartuttaminen ei ole veroinstrumentin asettamisen pääasiallinen tarkoitus.

4. Kuinka kustannusten tulevia vaihteluita ja siihen liittyvää epävarmuutta tulisi hallita kokonaiskustannusten laskennassa?

Päätöksenteon taustalla olevat mallinnukset sisältävät runsaasti epävarmuuksia. esimerkiksi vaihtoehtoisten käyttövoimainvestointien nykyarvoon vaikuttavat eri käyttövoimien polttoaineiden hintojen epävarmat kehityspolut sekä diskonttokorkoon liittyvät epävarmuudet/-selvyydet. Tällöin tutkimuksissa voidaan turvautua herkkyysoanalyysiin, joilla testataan eksogeenisten arvojen muutosten vaikutuksia tuloksiin. Voidaan esimerkiksi testata eri diskonttokorkojen vaikutusta käyttövoimainvestointien nykyarvoihin tilanteessa, jossa kustannukset ajoittuvat eri tavalla käyttövoimien kesken.

Poimimme tutkimuskirjallisuudesta kaksi lähestymistapaa epävarmuuden hallintaan. Näistä ensimmäinen liittyi MAC-analyysin ja toinen energiamarkkinoiden eSOM-mallinnukseen. Yue ym. (2020) painottavat mallintavan MAC-analyysin hyötyjä skenaariolaskelmien vaihtoehtona. Verrattuna skenaarioanalyysiin, joka rajoittuu vain muutamaan ennalta erikseen valitun vaihtoehdon tarkasteluun, niin MAC-analyysi harjaa huomattavasti tiheämmällä kammalla läpi eri päästövähennysmääriä ja teknologiavaihtoehtoja.

Yuen ym. (2018) kirjallisuuskatsauksessa tutkitaan puolestaan eri lähestymistapoja, joiden avulla eSOM-mallit käsittelevät mallinnuksen epävarmuuksia. eSOM-mallit ovat energiemarkkinaperusteisia osittaistasapainomalleja, joita käytetään runsaasti esimerkiksi tieliikenteen päästövähennysten kustannuslaskennassa. Aineiston 134 tutkimuksesta 100 turvautui yksinkertaisiin herkkyysanalyysihin ja 34 tutkimusta käytti formaaleja tutkimusmenetelmiä, eli joko Monte Carlo -analyysiä (*"Käyttökelpoinen, jos voidaan olemassa olevan tutkimuksen tai asiantuntija-arvioiden perusteella voidaan osoittaa epävarmuuden jakaumat riittävällä varmuudella"*), stokastista optimointia (*"Toimii parhaiten, kun epävarmuuden lähteitä on vain muutamia"*), robusteja optimointimenetelmiä (*"Pystyy käsittelemään ison joukon epävarmuuksia ja tarvitsee vain minimaalisen määrän tietoa epävarmojen parametrien jakaumista"*) tai vaihtoehtoja generoivaa mallinnusta (*"Menetelmistä ainoa, joka pystyy käsittelemään mallinnuksen rakenteeseen liittyvää epävarmuutta"*).

Tieliikenteen siirtymä fossiilittomiin käyttölähteisiin tarkoittaa autokannan ja sitä tukevan jakeluinfrastruktuurin täydellistä uudistamista. Tutkimuskirjallisuuden mukaan siirtymän tarkastelussa keskeisiä käsitteitä ovat epävarmuus, peruuttamattomuus, polkuriippuvuus ja lukittautuminen. Valtavirran kirjallisuudessa ei kuitenkaan esiinny rahamääräisiä estimaatteja näiden ilmiöiden kustannusvaikutuksista²¹.

5. Minkälainen kustannusvaikutusten tarkastelun ja vertailemisen laskentateknisen toteutuksen tulee olla yleisperiaatteiltaan ja laskentasääntöinä?

Kustannusten laskentamenetelmä riippuu tarkastelun laajuudesta. edellä jo esitimme, kuinka tutkimuskirjallisuus ei tarjoa yksiselitteistä suuruutta tarkastelun laajuudelle, joten se ei myöskään tarjoa yleisiä periaatteita kustannusten laskentaan. eri menetelmissä on omat etunsa ja rajoitteensa, sillä jokaisen menetelmän mallinnuksessa joudutaan tekemään erilaisia ja erilaajuisia oletuksia tutkimuksen kohteesta.

Perustuen laskennan laajuuteen, niin laskentamenetelmien ryhmiä ovat (Semkin 2019):

- osittaistasapainomallit
- panos-tuotosmallit
- yleiset tasapainomallit
- yksittäistarkastelut,

21 esimerkiksi käyttövoiman valinnan peruuttamattomuuden kustannusvaikutusta voidaan tutkia reaaliopitoiden avulla (Dixit & Pindyck 1994).

tai vaihtoehtoisesti menetelmät voidaan jakaa (Kesicki 2010) mallintaviin tai asiantuntija-perusteisiin lähestymistapoihin. em. luettelon kolme ensimmäistä laskentatapaa ovat mallintavia ja yksittäistarkastelu on asiantuntijapohjainen lähestymistapa. Sen jälkeen kun tutkimuksen laajuudesta on päätetty, niin tutkimuskirjallisuudesta löytyy runsaasti materiaalia laskennan toteutuksen ja tulosten kriittisen tarkastelun tueksi.

Tutkimuskirjallisuus myös osoittaa, että laskennan tekniset yksityiskohdat eivät aina ole yksiselitteisiä, joten paikoin laskenta vaatii tutkijalta myös valintojen tekemistä. esimerkiksi pitkän aikavälin laskennassa valintoja pitää tehdä kustannusten laskentakaavan (Kok ym. 2011) tai epävarmuuden käsittelyn (Yuen ym. 2018) suhteen. Laskelmissa on merkitystä myös diskonttokoron valinnalla. Yhteiskunnallisissa laskelmissa käytetään tyypillisesti yhteiskunnallista diskonttokorkoa, jonka suuruuden määrittämistä liikkuu kirjallisuudessa useita näkemyksiä.

Laskennan laajuus ja laskentamenetelmä tulee siis valita tietotarpeen pohjalta. esimerkiksi tieliikenteen ohjaustoimien suunnittelussa leikkausmääriä ja niiden aikaansaamia kustannuksia tulisi prosessin jossain vaiheessa selvittää tasapainopainomalleilla, eli suunnittelussa tulisi käyttää vähintään energiamarkkinoiden eSOM-osittaistasapainomallia. Tällainen tarkastelu valaisee perustavanlaatuisia kysymyksiä siitä, onko ehdotettu vähennystarve toteuttamiskelpoinen, minkälaisia vähennyskustannuksia eri päästöjen leikkausmäärillä on syytä odottaa ja minkälaisia vähennysmenetelmiä eri leikkausmäärillä todennäköisesti käytetään tai tulisi käyttää.

Yksi kustannuslaskennan yleinen näkökulma liittyy laskennan tulosten käyttöön sääntelyn päätöksenteon tukena. Iso-Britannia on esimerkki valtioista, joissa kasvihuonekaasujen määrää ja vähennyskustannuksia pyritään seuraamaan ja arvioimaan säännöllisesti. Yksi järjestelmän mielenkiintoinen elementti on säännöllisesti päivitettävä hiilen yksikköhinta, jota suositellaan käytettäväksi yhteiskunnallisissa investointilaskelmissa hiilidioksidipäästöjen yksikkökustannuksena. Hiilen yksikköhinnan laskennassa käytetään hybridimallia, jossa päästökauppasektoria koskevissa laskelmissa hyödynnetään päästöluvan markkinahintaa ja taakanjakosektoria koskevissa laskelmissa sovelletaan nk. välttämiskustannusmenetelmää. Toki erilaisia suositusarvoja on käytetty ja käytetään myös Suomen liikennesektorilla, mutta käytössä ei ole Iso-Britannian kaltaista toimintatapaa.

6. Miten tulisi ottaa huomioon eri toimenpiteiden vaikutukset Suomen pidemmän aikavälin kilpailukykyyn ja talouskehityksen kestävyteen?

Tutkimuskirjallisuudessa tehdään käsitteellisen eron kansatalouden kilpailullisuuden ja toimialojen kilpailullisuuden välillä. Kansatalouden kilpailullisuuden käsitettä ei kuitenkaan pidetä kovinkaan merkityksellisenä. Toimialojen kilpailukykyä voidaan puolestaan tarkastella kahdesta näkökulmasta: Miten sääntely ja sen käyttämät ohjauskeinot

vaikuttavat kilpailuun toimialan sisällä ja miten sääntely vaikuttaa kansainvälisillä markkinoilla toimivien yritysten kilpailukykyyn. esimerkiksi viimeaikainen tutkimus euroopan unionin päästölupakaupasta viittaa siihen, ettei sääntelyllä ole ollut vaikutusta säädeltyjen yritysten taloudelliseen asemaan, eikä sääntely ole saanut aikaan hiilivuotoa euroopan ulkopuolelle.

Koska ilmastopolitiikan tavoitteet ovat kunnianhimoisia, niin liikennesektorin rakenteessa tulee varmuudella tapahtumaan merkittäviä muutoksia. Lisäksi liikennesektorin ei ole ainoa ilmastosääntelyn alainen sektori, vaan sääntely koskettaa lähestulkoon kaikkea kansantalouden toimintaa. Laskentamenetelmien näkökulmasta voidaan todeta, että yleisen tasapainon mallinuksissa on mahdollista tutkia ilmastopolitiikan vaikutuksia sekä sektorien väliseen kehitykseen että talouden eri makromuuttujiin.

4 Laskentamenetelmän ja työkalun kehitys

4.1 Kirjallisuusselvityksessä havaittujen periaatteiden huomioon ottaminen

Yllä kirjallisuusselvityksessä havaittiin joitain periaatteita, joita liikenteen päästövähennystoimien kustannusvaikutusten kokonaisvaltaisessa arvioinnissa tulisi pyrkiä noudattamaan. Sekä arviointityökalun kehitys että sen käyttö tapahtuvat rajallisten resurssien toimintaympäristössä, joten lopputulos on aina kompromissi arvioinnin yksityiskohtaisuuden ja sen vaatimien resurssien välillä. Semkin ym. (2019) huomauttavat, ettei ole olemassa oikeaa menetelmää arvioida päästövähennysten kustannustehokkuutta. Hankkeessa kehitettävän työkalun johtavana periaatteena on ollut mahdollistaa yksityiskohtainen tarkastelu antamalla käyttäjän muokata vapaasti työkalun toiminnallisuuksia ja oletuksia. Samalla pyritään kuitenkin mahdollistamaan yksinkertainen käyttö tarjoamalla käyttäjälle oletusarvoja ja nostamalla käyttäjälle esiin tärkeimmät laskennan lopputulokseen vaikuttavat muuttajat selkeän lähtötietotaulukon avulla. Seuraavassa taulukossa 3 esitetään tärkeimmät kirjallisuusselvityksessä havaitut periaatteet ja hankkeessa kehitetyn työkalun ratkaisut näihin liittyen:

Taulukko 3. Päästötoimenpiteiden taloudellisten vaikutusten arvioinnin periaatteet ja työkalun ratkaisut.

Periaate	Työkalun ratkaisu
Taloudellisen analyysin laajuus ja epäsuorien vaikutusten (terveyshyödyt ja ulkoiskustannukset, kuten hiilidioksidipäästön yksikköhinta) huomioon ottaminen.	Työkalu tarkastelee liikenteen kustannusten muutoksia, sisältäen mm. verottomat energiakustannukset, huoltokustannukset, ajoneuvojen poistokustannukset sekä energia- ja käyttövoimaverot. Ulkoiskustannuksia, kuten päästö- ja terveystaloudellisia tai -hyötyjä ei käsitellä. Poikkeuksena on CO ₂ -päästöjen yksikkökustannus, joka otetaan laskennassa huomioon hyötyeränä.
Analyysin kytkentä kokonaistaloudellisiin tarkasteluihin esimerkiksi talouden tasapainomalleilla.	Kuorma-autokuljetusten suoritettavien taustatietona on käytetty toimialojen arvonlisäystä ja kuljetussuorite-ennustetta, jotka perustuvat kokonaistaloudellisiin tarkasteluihin, mutta työkalussa ei ole suorita takaisinkytkentöjä näihin. Mallien tuloksia voidaan käyttää kokonaistaloudellisten mallien lähtötietona.
Liikenneinfrastruktuurin kehittämiseen liittyvät kustannukset ja vältettyjen infrainvestointien hyödyt.	Työkalu toimii valtakunnallisella tasolla, kun taas liikenneinfrastruktuurihankkeille leimallista on hyvin paikalliset vaikutukset ja toisaalta Suomessa liikenneinfrastruktuurin kuormitus on alhainen ja mahdollistaa kohtuulliset kulkutapasiirtymät ilman merkittäviä infrainvestointitarpeita. Laskenta-ajan loppupuolella suuria kulkutapasiirtymiä sisältävissä skenaarioissa on syytä arvioida investointitarpeita erillistarkasteluna ja nämä kustannukset voidaan ottaa mukaan laskentamallissa.
Menneiden tai jo päätettyjen toimenpiteiden vaikutusten huomioon ottaminen.	Työkalu tarkastelee vain uusien toimenpiteiden vaikutuksia. Menneet ja jo päätetyt toimenpiteet sisältyvät perusskenaarioon. Työkaluun voidaan ja tulee päivittää uusi perusskenaario uusien toimenpiteiden päätösten jälkeen. Työkalu myös mahdollistaa uuden perusskenaarion tuottamisen.
Laaja-alaisten yksittäisten toimenpiteiden (esim. päästökauppa) vaikutusten arviointi.	Työkalu mahdollistaa sekä laaja-alaisten että suppeiden toimenpiteiden vaikutusten arvioinnin. Laaja-alaisten toimenpiteiden vaikutusten arviointi on usein ollut mekanistista liikennesuoritteiden hintajoustoihin perustuvaa laskentaa. Työkalu mahdollistaa myös tämän, mutta ohjaa käyttäjää pohtimaan, millaisten vaikutusmekanismien ja joustojen kautta suoritemuutokset liikennejärjestelmässä tapahtuvat, eli mitä tapoja toimijat käyttävät sopeutuessaan muuttuvaan toimintaympäristöön.

Periaate	Työkalun ratkaisu
Kustannusten jakautuminen (yhteiskunnalliset vs. kuluttajien, yritysten ja julkisen sektorin kustannukset).	Henkilöliikenteen työkalun laskenta tehdään kotitalouksien näkökulmasta ja kuorma-autoliikenteen laskenta kuljetusyritysten näkökulmasta, mutta kustannuksissa erotellaan verot. Näin ollen työkalut mahdollistavat toimenpiteiden kustannusmuutosten kohdentumisen tarkastelun kotitalouksien, yritysten ja julkisen sektorin kesken.
Kustannusten tulevat vaihtelut ja epävarmuuksien hallinta.	Työkalu mahdollistaa kustannusten vaihteluun liittyvien epävarmuuksien hallinnan erilaisilla oletuksilla tehtävien skenaarioiden yksinkertaisella muodostamisella. Tulevaisuuden kustannusmuutokset diskontataan nykyhetken ja diskonttaus korkoa voidaan muuttaa..
Tasa-arvo- ja oikeudenmukaisuusvaikutusten huomioon ottaminen	Henkilöliikenteen työkalu mahdollistaa kustannusmuutosten tarkastelun erilaisilla jaotteluilla, esimerkiksi kotitalouden tuloluokan tai kaupunki-maaseutu -luokituksen mukaisten aluejakojen kautta.

4.2 Henkilöliikenne

Henkilöliikenteen osalta laskentamenetelmä on kehitetty henkilöliikennetutkimuksen (HLT) aineistojen pohjalle. Tämä aineisto on kytketty Tampereen yliopiston Liikenteen tutkimuskeskus Vernessä kehitettyyn SALAMA-autokantamalliin. Henkilöliikenteen osalta lasketaan Suomen sisäisestä maaliikenteestä syntyvät päästöt ja liikenteen käyttäjälle kohdistuvat kustannukset, sekä kerätyt verotulot.

4.2.1 Lähtötiedot

Henkilöliikennetutkimusaineistossa vuodelta 2016 on tilastoitu 31 211 henkilön tekemänä 92 398 matkaa. Tietoaineistossa henkilöstä on tiedossa mm. hänen kotisijaintinsa, talouden automäärä, vuotuinen suorite, sekä henkilön perustiedot. Matkojen osalta aineistossa on tiedossa mm. matkan kulkumuoto, ajankohta, matkasyy ja matkan pituus. Näitä tietoja voidaan käyttää hyväksi, kun arvioidaan matkasta aiheutuneita päästöjä, sekä matkan käyttäjälle aiheuttamia kustannuksia.

SALAMA-autokantamalli (Viri ym. 2021) on mallinnustyökalu, joka laskee Suomen autokannan kehitystä vuoteen 2040 erilaisten perusolettamusten pohjalta. Se tuottaa jokaiselle laskentavuodelle alueellisen autokannan perustietoineen, jota voidaan käyttää päästöjen arvioinnissa. Matkojen kustannusten ja päästöjen arvioimiseksi SALAMA-mallin

autokanta kytkettiin käyttäjätietojen avulla HLT-aineiston matkoihin. SALAMA-aineistossa mallissa on pohjalla vuoden 2022 perusskenaario, jossa sähköautojen myynnin kehitys jatkuu vuoden 2021 kasvun mukaisena niin, että skenaariossa toteutuu 700 000 ladattavan auton tavoite vuoteen 2030. Käytännössä peruskehitys vuoteen 2030 mukailee Autoalan tiekarttaa tulevaisuuden käyttövoimista (Autoalan Tiedotuskeskus 2022b) ja VTT:n vuoden 2021 esittämää WAM-arviota (LVM 2021).

Vaikka sekä suoritteet että käyttövoimajakauma tulevat lähtokohtaisesti yllä mainittujen mallien ja aineistojen tuloksena, on käyttäjällä mahdollisuus muokata perusskenaarion lähtöarvoja vuositasolla haluamukseen ja parempien ennusteiden ilmetessä pyrkiä korjaamaan näin mallin tarjoamaa tulosta vastaamaan todellista suoritetta tai autokantaa ilman laajaa lähtödatojen päivitystä.

4.2.2 Laskentaprosessi ja laskennan oletukset

HLT-aineistossa jokaiselle tausta_id:lle (eli vastaajalle) oli määritettävissä ikäryhmä, kodin sijainti, auton omistus sekä auton vuotuinen käyttöaste, mutta tiedossa ei kuitenkaan ole, millaisella autolla matkat on tehty. Vaikka yksittäinen tausta_id kuvaa yhtä henkilöä, on kyseisen henkilön tekemät matkat laajennettu aineistoissa laajennuskertoimilla niin, että ne lopulta kuvaavat koko Suomea. Käytännössä yhteen henkilöön ei ole mahdollista kytkeä yhtä yksittäistä autoa, mutta SALAMA-mallin tiedoista on mahdollista hakea, millainen autojakauma on vastaavalla käyttäjäryhmällä ja vastaavalla postinumeroalueella (kolmen ensimmäisen numeron tarkkuudella).

Jokaiselle henkilölle haetaan todennäköisyys siitä, millaisen auton hän omistaa sen perusteella, mihin ikäryhmään hän kuuluu ja millä postinumeroalueella (kolmen ensimmäisen numeron tarkkuudella) hän asuu. Mikäli otoskoko postinumeroalueella jää alle sadan auton, postinumeron sijaan katsotaan saman kunnan sisältä otanta kaikilta saman kaupunki-maaseutuluokitustyyppin alueilta. Mikäli otoskoko on yhä alle sadan, laajennetaan otanta vastaavalle kaupunki-maaseutuluokitukselle koko Suomen tasolle. Tällä tavoin tiedot saadaan laskettua 26 502 henkilölle. 4 709 henkilölle ei löydy mitään kohdenusta. Pääsyyinä tähän on, että kyseessä ovat HLT-aineistossa edustettuna olleet alle 18 vuotiaat, joita ei esiinny autonomistajissa autokannassa. Näiden lisäksi on muutama yksittäinen alue- ja ikäryhmä jossa autonomistus on niin vähäistä, että tietoja ei ole saatavilla. Lopuksi, 26 502 yhdistetystä tiedosta 25 566 (96 %) saadaan tarvittava otanta samalta postinumeroalueelta, 621 osalta tieto tulee saman kunnan vastaavilta kaupunki-maaseutuluokitusalueilta ja 315 henkilön osalta tieto haetaan koko maan tasolta vastaavalta kaupunki-maaseutuluokitusalueelta.

Tietojen yhdistämisen jälkeen voidaan laskea jakauma siitä, millaisia ajoneuvokokoja ja käyttövoimia eri ryhmissä on edustettuna. Käytännössä laskenta tehdään viidelle käyttövoimalle, sekä viidelle eri auton? kokoluokitukselle. Käyttövoimien osalta tarkastelussa ovat mukana bensiini, diesel, kaasu, plug-in hybridi ja sähkö. Itselataavia hybridejä ei eritelty, vaan ne laskettiin osaksi bensiini- ja dieselautokantaa. Kokoluokkien osalta laskennassa käytetään SALAMA-mallin (Viri et al. 2021) logiikkaa²², jossa eritellään pituuden mukaan minikokoiset ($\leq 3,6$ m), pienet ($> 3,6$ ja $\leq 4,1$ m), keskikokoiset ($> 4,1$ m ja $\leq 4,55$ m) ja suuret autot ($> 4,55$ m). Näiden ohella yli 1,6 m korkeat autot merkitään pituudesta huolimatta suuriksi autoiksi, sillä tässä ryhmässä olivat mm. tila-autot. merkitään suuriksi autoiksi myös pienet autot jossa on tehoa yli 120 hevosvoimaa tai keskikokoiset autot, joissa on tehoa yli 240 hevosvoimaa. Jos mittatietoja autoille ei ole saatavissa, auton kokoluokaksi merkittiin erillinen virhe-luokitus. Virhe-kokoluokituksen saaneille autoille käytetään kustannus- ja päästölaskennassa aina kyseisen käyttövoiman parametrien keskiarvoa.

Jokaiselle käyttövoima-kokoluokkaparille lasketaan esiintymistodennäköisyys käyttäjäryhmässä ja perustiedot, joihin kuuluvat CO₂-päästöt, ajoneuvon arvonalenema, vuotuiset yleiskustannukset, polttoainekustannukset sekä vuotuiset verokustannukset.

4.2.2.1 Hinnottelu ja päästöt

Arvonalema lasketaan auton kokoluokan hinta-arvion ja kyseisessä käyttäjäryhmässä olevan keskimääräisen auton keskimääräisen iän mukaan tarkasteluvuonna käyttäen Autoalan tiedotuskeskuksen (2020) arviota arvonalemasta kyseisen vuoden kohdalla. Arvonalema muodostaa laskurissa käyttäjän näkemän hinnan siitä, mitä hänelle maksaa käyttää autoa /tarkasteluvuosi sen sijaan, että hän luopuisi siitä. Koska uuden auton hintaa katsotaan arvonaleman näkökulmasta, ei tämä huomioi autoverokertymää tai sen laskentaa. Tähän ei myöskään ole olemassa yksinkertaista kaavaa tai taulukkoarvoja, joilla tämä olisi mahdollista ottaa huomioon mallista. Auton arvoina on tämän työn esimerkkilaskennassa käytetty Autokalkulaattorin (2023) hinta-arvioita kokoluokille, mutta nämä ovat täysin käyttäjän muokattavissa. Lisäksi näissä arvioissa ei ole huomioitu autojen hintojen kehitystä, vaan hinta pysyy vuoden 2022 tasolla.

22 Mittojen suhteen on hyvä huomioida, että etenkin viime vuosina pienempien segmenttejen autojen mitat ovat kasvaneet, jolloin uudet, pienempiin segmentteihin kuuluvat autot saattavat saada tällä mittalogiikalla suuremman kokoluokan, mutta koko autokannan tasolla virhe ei muodostu merkittäväksi.

Yleiset kustannukset (vakuutukset, huollot, katsastukset, yms) lasketaan tässä vaiheessa kaikilla autoilla yhteisenä vuosisummina (1 500 €) jokaiselle vuodelle. Tästä oletetaan muodostuvan ALV-verokertymää 24 % verokannalta, joka laskurissa huomioidaan verokustannukseksi.

Polttoainekustannukset lasketaan ilmoitetun CO₂ päästötiedon perusteella bensiinin, dieselin ja kaasun osalta kilometritasolle. Sähkönkulutuksen osalta kulutustieto arvioidaan auton kokoluokituksen mukaan. Päästötietoihin lisättävä kulutuskerroin on täysin käyttäjien määritettävissä, mutta tässä esimerkissä bensiinin, dieselin ja kaasun kulutukselle on oletettu 5 % lisäys rekisteröintidatassa olevaan WLTP-kulutukseen (mm. Dornoff et al. 2020). Sähkön osalta kulutustiedot on mahdollista päivittää vuositasolla haluamukseen. Oletuslaskennassa on käytetty Autokalkulaattorin (2023) kulutusarvoja kokoluokittain ja sähkön kulutuskertoimeksi on arvioitu 20 % johtuen lataushäviöstä ja lämmitykseen menevästä energialisästä.

Polttoaineiden bio-osuuksien kehitys on tässä laskennassa arvioitu seuraavan taulukon 4 mukaan:

Taulukko 4. Polttoaineiden bio-osuuksien kehitys laskennassa.

Polttoaine	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Bensiini	7 %	7 %	7 %	7 %	7 %	7 %	7 %	7 %	7 %
Diesel	14 %	16 %	38 %	39 %	39 %	41 %	42 %	44 %	47 %
Kaasu	60 %	60 %	60 %	60 %	60 %	60 %	60 %	60 %	60 %

Kaasun osuus on laskettu 60 % arviolla, joka voi ennakkotietojen valossa olla hieman konservatiivinen arvio todellisesta osuudesta. Virallisten tilastojen puuttuessa ja mahdollisen biokaasun rajallisuuden (etenkin suurissa automäärämuutoksissa) vuoksi tätä käytetään kuitenkin laskennassa. Mikäli henkilöautojen laskennassa kaasun bio-osuus nostetaan 100 %:iin, on sen päästövaikutus vuonna 2022 -0,02 Mt (-0,22 %) ja vuonna 2030 -0,02 Mt (-0,39 %), ja merkitys esimerkkilaskelmiin näin ollen hyvin pieni. Kuljetusten laskennassa kaasun bio-osuudella on hieman suurempi merkitys, minkä vuoksi kaasukuorma-autojen hankintatukiskenaariossa esitetään laskenta myös 100 %:n bio-osuudella (luku 4.3.5.2). Päästövaikutus on perusskenaariossa vuonna 2023 -0,02 Mt (-0,8 %) ja vuonna 2030 -0,06 Mt (-4 %).

Polttoaineiden kokonaispohjahinnat on esimerkkitarkasteluun määritetty alkuvuoden 2023 tasolle ja valmisteverot ovat suoraan vuoden 2023 nesteimäisten polttonesteiden verotaulukosta (Vero 2023a). Taulukossa 5 esitellyt polttoaineiden tarkat pohjahinnat fosfiilisen ja biokomponentin on arvioitu sille tasolle, että toteuttavat sekoitevelvoitteella tuotetut nykyiset pumppuhinnat:

Taulukko 5. Polttoaineiden hinnat komponenteittain.

Polttoaine	Fos. hinta	Bio hinta	Fos. valmistevero	Bio valmistevero	Fos. ALV%	Bio ALV%
Bensiini	0,8 €/l	1,2 €/l	75,96 snt/l	35,98 snt/l	24 %	24 %
Diesel	1 €/l	2,2 €/l	59,48 snt/l	33,00 snt/l	24 %	24 %
Kaasu	2 €/kg	1,5 €/kg	31,49 snt/kg	13,4 snt/kg	24 %	24 %

Käyttäjä voi tarvittaessa muuttaa polttoainehintoja ja niiden kehitystä. Lisäksi bio-osuuksia päivittäessä malli kääntää sekoitevelvoitteen lämpöarvoista automaattisesti litroihiin ja siten myös polttoaineen hinnat päivittyvät automaattisesti tätä vastaavaksi.

Sähkön hinnalle on esimerkissä oletettu 24 % ALV-verokanta ja hinnaksi (sisältäen siirron) 20 snt/kWh. Hinta on arvioitu kotitaloushinnan ja verotuksen perusteella sillä oletuksella, että pääosa latauksessa tapahtuu kotona. energiaverona on käytetty 2,253 snt/kWh (Vero 2023b).

Vuotuinen ajoneuvovero lasketaan WLTP-ilmoitetun päästöarvon avulla suoraan ilmoitetun verotaulukon perusteella ja käyttövoiman verotus lasketaan koko vuodelle käyttövoiman taulukkoarvon perusteella. Käyttövoimaveron laskentaan tarvittava auton paino arvioidaan vuoden 2022 autokantadatan keskimääräisten painojen suhteen eri käyttövoimille ja kokoluokille. Verotuksen arvoja voi sekä ajoneuvo- että käyttövoimaveron osalta muuttaa vuosittain, mikäli näiden arvot tulevaisuudessa muuttuvat tai käyttäjä haluaa testata jonkin muutoksen vaikutusta.

Näiden tietojen avulla on pystytty muodostamaan kustannus sekä kilometri- että vuositasolle jokaiselle tiedossa olevalle käyttövoima-kokoluokkaparille, joka mallissa esiintyi jokaisen tarkasteluvuoden osalta. Koska näiden käyttövoima-kokoluokkaparien esiintyvyys pystyttiin laskemaan HLT-aineiston henkilöille, voitiin kyseisen henkilön kohdalla oletetut käyttökustannukset laskea painotettuna keskiarvona kyseisen

käyttövoima-kokoluokkaparin esiintyvyyden perusteella kullekin tarkasteluvuodelle. Tätä kustannustietoa käytetään henkilön tekemien matkojen keskimääräisen kustannuksen laskentaan silloin kun kulkutapana on auto.

Muiden kulkutapojen osalta kustannukset ja päästöt on mahdollista päivittää vuositasolla vapaasti haluamallaan tavalla taksin päästöjä lukuunottamatta, sillä ne päivitetään autokannan kehityksen mukaan. Tässä laskennassa on käytetty seuraavia lähtöarvoja vuodelta 2022 koko laskennan aikajänteellä.

Joukkoliikenteen hinnat on jaettu seudun sisäisiin ja pitkämatkaisiin sen perusteella, miten matka on aineistossa tilastoitu. Jos matka on kirjattu kaupunkiseutujen sisäisenä, on se seudun sisäinen ja sille lasketaan hinnaksi 2 €/matka²³ ja mikäli matka tapahtuu pitkämatkaisena tai kaupunkiseutujen ulkopuolella, on sen hinnaksi arvioitu 10 snt/km. Taksimatkan hinnaksi on arvioitu keskimäärin 1,60 €/km yhdeltä henkilöltä²⁴. Kaiken joukkoliikenteen ALV-kantana on laskennassa käytetty 10 %.

Päästöjen osalta laskennassa on oletettu, että seudun sisäinen raideliikenne on täysin päästötöntä ja pitkämatkaiselle raideliikenteelle on päästövaikutukseksi laskettu 2,2 g/km²⁵. Linja-autolle on seudulla arvioitu 53 g/hkm ja pitkällä matkalla 40 g/hkm (Green Office 2022), joskin näissä lukemissa on hyvä huomioida, että sähköbussien määrän selkeä kasvu laskenee merkittävästi seudun sisäisen liikenteen päästöjä. Takseissa on yleisesti edustettuina autokannassa uudemmat autot, ja taksiautokannasta sähköistyminen on muuta autokantaa yleisempää. Tämän vuoksi taksien päästöt lasketaan aina kunkin vuoden autokannan perusteella edustavan 10. persentiiliä päästöjen mukaisesti mitaten vähäisimmistä päästöistä.

Aiemmin mainittujen muutosten osalta käyttäjällä on mahdollisuus lisäksi muuttaa investointikustannuksia kahdella eri tapaa. Sähköautotuille on mahdollista määrittää ajoneuvo-kohtainen hinta ja säätää myös sähköauton hankintahintaa vastaavasti. Tällöin malli laskee vuositasolla uusien sähköautojen määrän ja laskee paljonko tuki tulee kokonaisuudessaan maksamaan. Lisäksi käyttäjä voi halutessaan tarkastella kustannuksissa mahdollisia

23 eri kaupunkiseuduilla joukkoliikenteen kertamatka ovat keskimäärin 3 € tai enemmän, mutta 2 € on arvioitu matkakohtaiseksi hinnaksi, koska erilaiset kuukausikortit ja alennushinnat laskevat keskimääräistä hintaa.

24 Taksien hinnat on pyritty arvioimaan suomalaisten taksitoimijoiden nykytilan perusteella, mutta tämä on haastavaa, sillä hinnan muodostamisessa huomioidaan myös matkalla ollut odotusaika, mutta mallissa on vain ajatut kilometrit

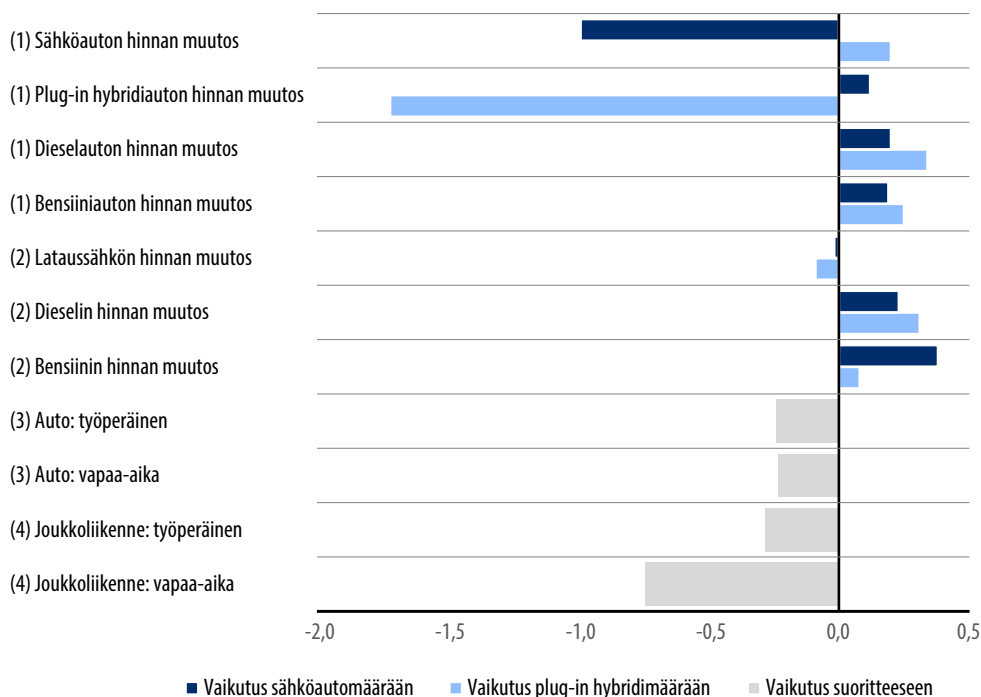
25 Tämä arvo ilmoitetaan VR:n vuosikertomuksessa päästöarvona johtuen niistä radanosista, joita ei ole sähköistetty

joukkoliikennetukia, ja syöttää vuositasolle tämän perusteella oikean joukkoliikennetukea, jolla voidaan hakea esimerkiksi joukkoliikenteen kysynnän nostoa. Tämä tuki siirtyy parametreistä tukitasolta suoraan diskontattuna lopulliseen laskentaan.

4.2.2.2 Joustot

Käyttäjän on mahdollista säätää perusskenaarion käyttövoima- ja suoritekehitystä ennen laskennan aloittamista, mikäli mallissa arvioitu kehitys ei kuvaa nykytilaa ja kehitysarvioita tarkasteluhetkellä. Tämän suoritteiden päälle lasketaan perusskenaarion arvot, mutta vertailuskenaarion aiheuttamat muutokset laskentaan tämän päälle hintajoustojen avulla. Käytännössä joustoja lasketaan neljällä eri tavalla: (1) auton hankintahinnan muutoksella käyttövoimajakaumaan, (2) polttoaineen hinnan muutoksella käyttövoimajakaumaan, (3) auton käytön hinnoittelulla suoritejakaumaan, ja (4) joukkoliikenteen käytön hinnoittelulla suoritejakaumaan. Tiivistetysti joustot on esitetty alla kuvassa 8:

Kuvio 8. Mallissa käytetyt joustoarvot, tiedot: Fridstrøm & Østli (2021); Wardman (2022).



Auton hintojen muuttuessa pohja- ja vertailuskenaarioiden välillä lasketaan auton hinnalle prosentuaalinen muutos ja joustoarvoilla lasketaan, miten eri käyttövoimien hinnan muutokset kehittävätkä sähkö- ja plug-in hybridi-autojen myyntimäärien kehitystä. Lisäksi käyttövoimien hinnan muuttuessa skenaarioiden välillä, lasketaan käyttövoiman hinnoittelun kehityksen vaikutus sähkö- ja plug-in hybridi-autojen myyntimäärien kehitykseen. Mallin kannalta tämä tarkoittaa sitä, että jouston avulla lasketaan paljonko kyseisiä autoja tulee lisää ja ne lisätään tasaisesti kaikille alueille, sillä aluejakaumasta ei ollut vastaavaa tutkimustietoa, jonka pohjalta aluejakauman olisi voinut tarkemmin määrittää. Vastavasti bensiini- ja dieselautoja poistetaan sama määrä, joten autokannan koko pysyy mallissa vakiona eri skenaarioiden välillä.

Mallissa on käytetty oletuksena taulukossa 6 esitettyjä joustoarvoja ajoneuvojen ja polttoaineen hinnan muutoksen vaikutuksesta (Fridstrøm & Østli 2021). Nämä arvot kertovat, paljonko yhden prosentin muutos hinnassa muuttaa sähkö- ja plug-in hybridimääriä mallissa²⁶. Käyttäjällä on mahdollisuus muuttaa joustoarvoja, mikäli näkee tälle tarvetta.

Taulukko 6. Sähkö- ja plug-in hybridi-autojen määrään vaikuttavat joustot.

Muutos	Vaikutus sähköautomäärään	Vaikutus plug-in hybridimäärään
Sähköauton hinnan muutos	-0,99	0,2
Plug-in hybridi-auton hinnan muutos	0,12	-1,72
Dieselauton hinnan muutos	0,2	0,34
Bensiiniauton hinnan muutos	0,19	0,25
Lataussähkön hinnan muutos	-0,018	-0,09
Dieselin hinnan muutos	0,23	0,31
Bensiinin hinnan muutos	0,38	0,08

26 Mikäli sähköauton hinta laskee 5 %, lasketaan tämän aiheuttama muutos sähköautokantaan olevan $-0,05 * -0,99 = 0,0495$ ja plug-in hybridimäärään $-0,05 * 0,2 = -0,01$, eli sähköautomäärä kasvaa 4,95 % ja plug-in hybridimäärä laskee 1 %.

Ajoneuvojen jouston ohella malli laskee myös suoritejoustot, eli kun autokannan kehitys on laskettu joustojen avulla uudelleen, lasketaan sen jälkeen keskimääräinen auton käytön kustannus pohja- ja vertailuskenaariossa eri aluetasolle (kaupunkialueet, kaupunkien kehys- ja lähialueet, maaseutu). Tähän vaikuttavat sekä käyttövoimahinnat että autokannan kehitys. Tämän jälkeen lasketaan prosentuaalinen muutos pohja- ja vertailuskenaarioiden välillä kumulatiivisesti vuosille, josta saadaan kustannustason muutos käyttökustannuksissa. Koska kirjallisuudessa esiintyy eri joustoarvoja työpohjaisille ja vapaa-ajan matkoille, on nämä jaettu myös matkalaskennassa erikseen HLT-datan tämän mahdollistaessa. Suoritejoustoilla lasketaan, paljonko suoritetta autoilta kustannusten muuttuessa poistuu tai lisääntyy ja mihin kulkutapaan se siirtyy, vai poistuu se kokonaan.

Autoliikenteen ohella myös joukkoliikenteelle lasketaan samoin aluetasolle muutos pohja- ja vertailuskenaarioiden välille. Kaupunkialueelle muutos lasketaan puhtaasti seututaso lippuhinnan muutoksesta ja maaseudulle pitkämatkaisen lippuhinnan muutoksesta. Kaupunkien kehys- ja lähialueille muutos lasketaan edellämainittujen keskiarvona. Näillä joukkoliikenteen kustannusarvioilla lasketaan miten joukkoliikenteen suorite muuttuu ja mihin mahdollinen muuttuva kysyntä siirtyy. Esimerkkilaskelmassa käytetyt siirtymät on kuvattu seuraavissa taulukoissa.

Suoritteiden hintajoustoissa käytetään oletuksena seuraavan taulukon 7 arvoja (arvioitu lähteistä Wardman 2022; Dunkerley et al. 2018), mutta myös nämä ovat käyttäjän vaihdettavissa niin halutessaan. Arvot lasketaan vastaavalla tavalla kuin aiemmassakin esimerkissä, mutta uutena tekijänä huomioidaan siirtymä²⁷:

27 Mikäli esimerkiksi autoilun kustannustaso kallistuu 10 % vertailuskenaariossa, lasketaan sen aiheuttama muutos seuraavasti vapaa-ajan automatkoille: $0,1 * -0,23 = -0,023$, eli vapaajan autoilu laskee 2,3 %. Mikäli vapaa-ajan automatkoja tehtäisiin tarkasteluajankohdalla yhteensä 1 000 000 kilometriä, tarkoittaisi tämä sitä, että ne vähenisivät 23 000 kilometriä. Tästä joukkoliikenteeseen siirtyisi 55 % (12 650 km), polkupyöräilyyn 5 % (1 150 km) ja kävelyyn 15 % (3 450). Ylijäävä 25 % (5 750 km) on kokonaan poistuvaa suoritetta, eli matkoja ei enää tehdä millään kulkutavalla.

Taulukko 7. Suoritteiden hintajoustopot ja kulkutapasiirtymät.

Muutos	Suoritemuutos	Siirtyy joukko- liikenteeseen	Siirtyy polkupyörään	Siirtyy kävelyyn
Auto työperäiset	-0,24	55 %	5 %	15 %
Auto vapaa-aika	-0,23	55 %	5 %	15 %

Muutos	Suoritemuutos	Siirtyy henkilöautoon	Siirtyy polkupyörään	Siirtyy kävelyyn
Joukkoliikenne työperäiset	-0,28	40 %	5 %	20 %
Joukkoliikenne vapaa-aika	-0,74	25 %	5 %	20 %

Joustopot ohella käyttäjällä on mahdollista laskea joustot myös käsin. Oletusasetuksena laskenta tapahtuu hintajoustopotilla automaattisesti, mutta halutessaan käyttäjä voi säätää vertailuskenaariossa sekä automäärä- että suoritekehityksen haluamukseen säätämällä kehitystä vuositasona vastaavasti. Käsisäätö toimii tilanteissa, jossa hintajoustopotilla ei voida huomioida tehtyjä muutoksia tai toimenpiteistä on jo tehty laajempia vaikutusselvityksiä, joiden tulokset on näin hyödynnettävissä. Jos esimerkiksi joukkoliikenneinvestointi parantaa merkittävästi palvelutasoa, mutta ei muuta joukkoliikenteen hintaa, voi käyttäjä käsin nostaa joukkoliikenteen osuutta haluamallaan alueella ja vastaavasti laskea henkilöauto-suoritetta, jolloin nämä otetaan huomioon vertailuskenaariossa. Samoin jos esimerkiksi sähköautotuen vaikutuksia on arvioitu jo aiemmin muissa selvityksissä, voidaan näitä korjata käsin, jotta kustannushyödyn laskenta osuu oikealle tasolle.

4.2.2.3 Tulosten esittäminen

Laskennan tulosraportilla käyttäjälle esitetään sekä perusskenaarion tulokset, että vertailuskenaarion tuoman muutokset. Käyttäjä saa vuotuisen kehityksen aluetasolle jaettuna päästöistä, kokonaiskustannuksista ja verotuloista. Lisäksi koko Suomen tasolla lasketaan autokannan kehitys ja kustannusten jakautuminen eri lajeihin: kokonaiskustannukset, ajoneuvo- ja käyttövoimaverot, käyttövoimista kerätyt verot (sis. alv), muut arvonlisäverot sekä verotulot yhteensä. Perusskenaarion osalta tulokset on esitetty laskentaesimerkkien yhteydessä.

Käyttäjälle esitetään pohja- ja vertailuskenaarioiden kumulatiivinen päästövähennä ja kustannusvähennä diskontattuna nykyarvoon. Näiden tietojen pohjalta lasketaan vertailuskenaarioiden kustannusvaikuttavuus (€/t) aina vuoteen 2030 asti. Oletuksena diskonttaus tapahtuu vuoden 2022 nykyarvoon 3,5 % laskentakorkokannalla, mutta käyttäjällä on mahdollisuus muuttaa sekä korkokantaa että nykyarvovuotta. Esimerkeissä valittu laskentakorkokanta perustuu Väyläviraston hankearvioinnin yksikkökustannuksiin (Väylävirasto 2020a).

Yllä mainittujen tulosten osalta käyttäjälle esitetään vuotuinen kehitys:

- Päästöistä kulkutavoittain
- Suoritekehityksestä kulkutavoittain
- Kokonaiskustannuksista kulkutavoittain
- Verotuloista kulkutavoittain
- Kilometrikustannuksista kulkutavoittain
- Kilometrikustannuksista vuosituloluokittain
- Kilometrikustannuksista perheeseen mukaan

Oletuksena ylläolevat tiedot tarjotaan koko Suomen tasolla, mutta käyttäjä voi halutesaan rajata tarkastelua myös seututasoon mukaan.

4.2.3 Laskentaesimerkit

4.2.3.1 Tieliikenteen EU-päästökauppa 2027 alkaen

ensimmäisenä laskentaesimerkkinä tarkastellaan eU:n tieliikenteen päästökaupan vaikutuksia henkilöliikenteen päästöihin ja käyttäjälle kohdistuviin liikkumiskustannuksiin, sekä verokertymään. eU on aloittamassa tieliikenteen päästökauppaa vuonna 2027 (LVM 2022) ja eräiden arvioiden mukaan se näkyy esimerkiksi fossiilisten polttoaineiden hinnoissa nostamalla niitä 7–8 % (Schroten et al. 2022). Tämä vaikutusarvio on valittu esimerkitarkasteluun, sillä siinä hinnoittelu on selkeästi ilmaistu. Laskennassa on tämän pohjalta arvioitu energiaveroihin kohdistuvana muutoksena bensiinille 13 snt/l korotus ja dieselille 14 snt/l korotus vuodesta 2027 eteenpäin, joka vaikuttaa suoraan polttoaineen hintaan. Muiden polttoaineiden hintoihin vaikuttavien tekijöiden (raakaöljyn hinta, jalostusmarginaalit, verotus ja käytössä jo olevat hintoihin vaikuttavat ohjaukset) pidetään ennallaan.

Koska polttoaineen hinnan muutos aiheuttaa vuodesta 2027 alkaen ajoneuvojen käyttökustannusten muutosta, tulee tämä aiheuttamaan hintajousteiden mukaisesti sekä autokannan uudistumista kohti halvempia käyttövoimia että suoritemuutosta pois autoilusta muihin kulkumuotoihin. Laskennasta on hyvä huomioida, että koska mallissa hinnan korotus astuu voimaan vuonna 2027, myös käyttövoima- ja suoritemuutokset aiheutuvat

vasta tästä vuodesta alkaen, sillä mallin hintajoustokomponentti laskee vasta toteutuneet muutokset. Todellisuudessa, kun toimenpiteet ovat tiedossa jo etukäteen, saattaa etenkin käyttövoiman uusiutuminen käynnistyä jo ennen vuotta 2027. Vuoden 2030 tilanteen tarkastelun osalta tällä ei kuitenkaan pitäisi olla merkitystä, sillä nämä muutokset toteutuvat joka tapauksessa tähän ajanhetkeen mennessä, mutta esimerkiksi vuoden 2025 tai 2026 osalta tuloksia voisi jo todellisuudessa näkyä. Tulokset on esitetty taulukossa 8:

Taulukko 8. Tieliikenteen päästökaupan vaikutukset indikaattoreihin ja kustannusvaikuttavuus²⁸.

	2022	2030 Pohja- skenaario	2030 Päästökauppa- skenaario
Kokonaissuorite (mrd. km)	69,8	68,5	68,3
Kokonaiskustannukset (mrd. €)	24,3	23,1	23,5
Kokonaiskustannukset, veroton (mrd. €)	17,7	18,1	18,2
Kokonaispäästöt (CO2 Mt)	9,02	5,59	5,30
Henkilöautosuorite (mrd. km)	52,3	51,3	50,2
Sähköautomäärä	18 090	339 555	388 644
Plug-in hybridien määrä	62 664	272 103	300 414
Henkilöautojen CO2-päästöt (Mt)	8,63	5,25	4,95
Kokonaiskäyttökustannukset (mrd. €) henkilöautot	21,6	20,4	20,7
Kokonaiskäyttökustannukset (mrd. €) henkilöautot, veroton	15,2	15,6	15,7
Verotulot yhteensä (mrd. €)	6,61	5,00	5,28
Ajoneuvo- ja käyttövoimaverot (mrd. €)	1,11	0,77	0,76
Käyttövoimista kerätyt verot, sis alv (mrd. €)	4,40	3,15	3,44

28 Käytämme termiä kustannusvaikuttavuus. Kustannustehokkuus -termiin voi liittyä ajatus erilaisten toimenpiteiden muodostaman kokonaisuuden tehokkuudesta tai toimenpiteiden vertailusta, kun taas termi kustannusvaikuttavuus voi olla käytössä yksittäisestä toimenpiteestä puhuttaessa (ks. luku 3.1.2). Kustannusvaikuttavuus esitetään tyypillisesti ilman veroja ja maksuja, joten tässä käytämme selkeyden vuoksi termiä kustannusvaikuttavuus täsmäten erikseen, ovatko verot ja tuet mukana (verollinen), vai eivät (veroton).

	2022	2030 Pohja- skenaario	2030 Päästökauppa- skenaario
Muut arvonlisäverot (julkisesta liikenteestä ja autoilun yleiskustannuksista) (mrd. €)	1,09	1,08	1,09
Julkiset tuet (milj. €)	0	0	0
Päästöjen kumulatiiviset muutokset 2022–2030 (Mt)		-3,43	-3,72
Toimenpiteen päästövähennä (Mt)			0,29
Kustannusten kumulatiiviset muutokset 2022–2030, veroton (mrd. €)		-3,96	-3,85
Toimenpiteen veroton kustannus (M€)			80
Toimenpiteen kustannusvaikuttavuus 2022–2030, veroton (€/t)			293
Kustannusten kumulatiiviset muutokset 2022–2030, verollinen (mrd. €)		-6,77	-6,44
Toimenpiteen verollinen kustannus (M€)			290
Toimenpiteen kustannusvaikuttavuus 2022–2030, verollinen (€/t)			1 028

Kokonaisuudessaan yllä olevista tuloksista nähdään, että päästökaupalla saavutetaan päästöhyötyjä vuodelle 2030 verrattuna peruskenaarioon n. 0,29 megatonnin edestä, mutta samalla käyttäjälle kohdistuvat liikkumiskustannukset kasvavat n. 0,29 miljardia euroa (vuoden 2022 nykyarvossa), joka tarkoittaa sitä, että toimenpiteen kustannusvaikuttavuudeksi muodostuu n. 1 028 €/t. Kustannusvaikuttavuudessa kustannukset muodostuvat perus- ja vertailuskenaarion välisestä erotuksesta käyttäjälle kohdistuneissa liikkumiskustannuksissa, sekä mahdollisista lisäinvestoinneista (kuten seuraavan esimerkin sähköautotuista, tässä esimerkissä lisäinvestointeja ei ole). Kustannukset on laskettu vuoden 2022 nykyarvossa. Päästöjen osalta katsotaan perus- ja vertailuskenaarion välistä erotusta. Vertailuskenaarion kustannuksissa on huomioitu säästetyn päästötonnin hinta (oletuksena 77 €/t, käyttäjän määritettävissä), eli vertailuskenaarion kustannukset vähenevät saavutettua päästösäästöä vastaavasti.

Jos kustannusvaikuttavuutta tarkastellaan verottomilla arvoilla, verottomaksi kustannukseksi muodostuu 80 M€, jolloin toimenpiteen hinnaksi jää 293 €/t. Vaikka päästökaupan hinta jääkin tällöin tarkastelun ulkopuolelle, eikä siten nosta kustannuksia, aiheutuu sähköautoilun yleistymisestä kustannuksia kotitalouksille, sillä arvokkaampien autojen arvonalenema on suurempaa. Lisäksi verottomia kustannuksia tarkastellessa on syytä

huomioida, että käyttökustannuksia laskiessa etenkin bensiini- ja dieselautojen kustannukset laskevat merkittävästi, sillä suurin osa niiden käyttökustannuksista muodostuu veroista. Vastaavasti sähköauton verokohtelu on jo valmiiksi alhaisempi, jolloin sähköauto näyttäytyy suhteellisesti kalliimpana vaihtoehtona. Vaikka suorite laskeekin kustannusten nousessa, ei suoritelasku itsessään riitä kumoamaan kasvaineita kustannuksia, vaan kokonaiskustannukset nousevat.

Päästöjen vähenemän osalta merkittävä vaikutus on autokannan sähköautoistumisella tehokkaammin, sillä kalliit käyttövoimahinnat ohjaavat käyttäjiä vuodesta 2027 eteenpäin entistä enemmän sähkö- ja plug-in hybridiautojen käyttäjiksi. Sähköautoja on vuonna 2030 kannassa 49 126 kappaletta enemmän ja plug-in hybridejä vastaavasti 28 359 kappaletta enemmän kuin perusskenaariossa. Tämä on isessään kohtuullinen määrä uusia sähköautoja, mutta kokonaisuudessaan toimenpiteet kustannukset kohdistuvat loppukäyttäjään, sillä kilometrikustannus auton käytölle nousee merkittävästi jossain ryhmissä. Vaikka autokannan sähköistyminen osaltaan laskeekin joidenkin käyttäjien kilometrikustannuksia, laskee ajoneuvosuorite arviolta jopa 1,1 miljardia kilometriä vuoteen 2030, mikä aiheuttaa suoraan noin 0,30 megatonnin päästövähennemän. Lopullinen 0,29 megatonnin päästövähennemä aiheutuu siitä, että lisääntynyt joukkoliikennekysyntä synnyttää osaltaan hieman lisäpäästöjä. Samalla tulisi myös huomioida, että päästökaupan aiheuttama polttoaineen hinnan kasvu voi vaikuttaa myös joukkoliikenteen operointikustannuksiin, ja siten nostaa myös joukkoliikennematkojen hintoja tai vaihtoehtoisesti kasvattaa julkisia tukikustannuksia. Tässä tarkastelussa joukkoliikenteen hinta on kuitenkin pidetty vakiona, eikä joukkoliikenteeseen ole laskettu investointikustannuksia.

Kustannusten osalta kustannukset nousevat vuodesta 2027 auton käytöstä merkittävästi, sillä päästökauppa nostaa merkittävästi kustannustasoa, ja suoritteen vähenemä vaikuttaa tähän vain vähäisesti. Käyttövoimista kerätään siis veroa 0,3 miljardia euroa perusskenaariota enemmän. Tässä on hyvä huomioida, että laskennassa käsitellään päästökaupan lisähinnan laskenta polttoaineen veroa vastaavasti, vaikka todellisuudessa suunnitelut mekanismi on hieman erilainen ja osa päästökauppatulosta tuloutuu eU:lle.

4.2.3.2 Hankintatuet sähköautoille

Tarkastellaan tilannetta sähköautojen hankintatuesta. Tarkasteltavaksi tueksi on otettu aempina vuosina käytössä olleen kaltainen, eli 2000 € uutta sähköautoa kohden ja esimerkiksi lasketaan tämän vaikutukset, kun se on käytössä vuosina 2024 ja 2025. Kuten aiemmissakin sähköautotuissa, myös tässä tarkastellaan vaihtoehtoa, jossa tukea ei saa yli 50 000 € maksavalle autolle. Laskuri ei suoraan mahdollista tätä tarkastelua, mutta tuet on mahdollista antaa kokoluokittain.

Lasketaan siis tilanne, jossa iso sähköauto ei saa tukea ja sen hinta säilyy vakiona. Vastaa-
vasti minikokoinen, pieni ja keskikokoinen auto saavat kukin 2000 € tuen, jolloin auton
hankintahinta laskee vastaavasti 2000 €. Muuten skenaariot ovat täysin identtiset. Alla tau-
lukossa 9 on esitetty laskennan tulokset:

Taulukko 9. Sähköautojen hankintatuen vaikutukset indikaattoreihin ja kustannuvaikuttavuus.

	2022	2030 Pohja- skenaario	2030 Hankintatuki- skenaario
Kokonaissuorite (mrd. km)	69,8	68,5	68,6
Kokonaiskustannukset (mrd. €)	24,3	23,1	23,1
Kokonaiskustannukset, veroton (mrd. €)	17,7	18,1	18,1
Kokonaispäästöt (CO2 Mt)	9,02	5,59	5,59
Henkilöautosuorite (mrd. km)	52,3	51,3	51,3
Sähköautomäärä	18 090	339 555	343 097
Plug-in hybridien määrä	62 664	272 103	270 618
Henkilöautojen CO2-päästöt (Mt)	8,63	5,25	5,24
Kokonaiskäyttökustannukset (mrd. €) henkilöautot	21,6	20,4	20,4
Kokonaiskäyttökustannukset (mrd. €) henkilöautot, veroton	15,2	15,6	15,7
Verotulot yhteensä (mrd. €)	6,61	5,00	5,00
Ajoneuvo- ja käyttövoimaverot (mrd. €)	1,11	0,77	0,77
Käyttövoimista kerätyt verot, sis alv (mrd. €)	4,40	3,15	3,15
Muut arvonlisäverot (julkisesta liikenteestä ja autoilun yleiskustannuksista) (mrd. €)	1,09	1,08	1,08
Julkiset tuet (milj. €)	0	0	64,52
Päästöjen kumulatiiviset muutokset 2022–2030 (Mt)		-3,43	-3,44
Toimenpiteen päästövähennys (Mt)			0,01
Kustannusten kumulatiiviset muutokset 2022–2030, veroton (mrd. €)		-3,96	-3,96
Toimenpiteen veroton kustannus (M€)			4
Toimenpiteen kustannusvaikuttavuus 2022–2030, veroton (€/t)			743

	2022	2030 Pohja- skenaario	2030 Hankintatuki- skenaario
Kustannusten kumulatiiviset muutokset 2022–2030, verollinen (mrd. €)		-6,77	-6,71
Toimenpiteen verollinen kustannus (M€)			60
Toimenpiteen kustannusvaikuttavuus 2022–2030, verollinen (€/t)			10 938

Yllä olevan taulukon tuloksista näkee, että hankintatuki vaikuttaa vain vähäisesti ja sen kustannusvaikuttavuus on erittäin heikko (10 938 €/t). Kustannusvaikuttavuuden kustannukset muodostuvat perus- ja vertailuskenaarion välisestä erotuksesta käyttäjälle kohdistuneissa liikkumiskustannuksissa, sekä mahdollisista lisäinvestoinneista. Kustannukset on laskettu vuoden 2022 nykyarvossa. Päästöjen osalta katsotaan perus- ja vertailuskenaarion välistä erotusta. Henkilöautosuoritteessa tapahtuu pieni nousu verrattuna perusskenaarioon, johtuen siitä, että sähköautojen hieman suurempi määrä laskee hieman ajokustannuksia, ja siten hintajoustolla autoilun kysyntä nousee hieman. Tästä pienestä suoritenoususta huolimatta päästöt laskevat hieman, koska autokannassa on hieman enemmän sähköä.

Kustannusvaikuttavuuden kääntää kuitenkin heikoksi se, että perusskenaariossa vuosien 2024–2025 aikana myydään noin 40 000 sähköautoa, ja hankintatuen avulla joustoilla laskettuna näiden määrä kasvaa vain 3 542 kappaletta, ja vastaavasti myös plug-in hybridien osuus vertailuskenaariossa pienenee 1 785 kappaletta, koska aiemmin plug-in hybridin valitsevat päätyvätkin aiemmin sähköautoon. Näistä 3 542 sähköautosta maksetaan arviolta kuitenkin merkittävä 64,52 miljoonan euron (59,19 milj. € 2022 nykyarvossa) hankintatuki, sillä tuki kohdistuu myös niihin 40 000 sähköautoon, jotka olisi myyty perusskenaariossa joka tapauksessa, mikä kasvattaa tukikustannuksia merkittävästi.

Mikäli kustannusvaikuttavuuden laskennassa ei huomioida veroja ja julkisia tukia, muodustuu kokonaishinnaksi 743 €/t. Sähköautojen pieni osuuden kasvu kasvattaa hieman kustannuksia, sillä samalla suoritemäärä kasvaa. Tämän aiheuttama päästövaikutus on kuitenkin niin vähäinen, että kustannusvaikuttavuudelle jää selkeä positiivinen arvo.

Tukea ei voi siis nähdä hyödyllisenä tilanteessa, jossa markkinoilla uusien sähköautojen myynti on jo valmiiksi merkittävällä tasolla, sillä tukea ei voi kohdistaa vain niihin käyttäjiin (tässä tapauksessa 3 542 käyttäjään), joihin sillä oli vaikutusta. Tilanteessa jossa

sähköautojen myynti on valmiiksi vähäisempää (kuten aiempien hankintatukikampanjojen aikana) tai myynnin voisi olettaa kasvavan tuen ansiosta merkittävästi enemmän, voisi tilanne olla toinen.

4.2.4 Huomioita henkilöliikennemallista

Kuten jo aiemmasta selviää, ei malli tällä hetkellä ole täydellinen, eikä se pysty ottamaan huomioon jokaista taloudellista näkökulmaa, eli esimerkiksi autoveron mahdollinen huomiointi ei tällä hetkellä ole mahdollista, sillä autoveron laskentaan ei ole olemassa suoraa kaavaa, vaan arviot täytyisi tehdä rankasti keskiarvottamalla käyttövoimen autoveroketymää. Käytännössä voidaan kuitenkin olettaa, että autoverokertymä laskee, mikäli sen laskentaperiaate pysyy nykyisen kaltaisena, sillä tarkastellut toimenpiteet kasvattavat sähköautokantaa, ja täten autoveroa uusista autoista kerättäisiin vähemmän.

Hankkeen toteutuksen aikana on ollut puhe myös terveysvaikutusten huomioinnista, joka olisi mahdollista, jos kasvihuonekaasupäästöjen lisäksi laskennassa olisivat mukana myös terveydelle haitalliset yhdisteet. Laskenta kuitenkin onnistuu helposti vain CO₂-päästöjen osalta, ja muut merkittävät terveyshaittoja aiheuttavat päästöt jäisivät tällöin tarkastelun ulkopuolelle, jolloin kokonaisuudessa terveyshyötyjen huomiointi mallilla jää vajaaksi, eikä sitä ole tässä vaiheessa otettu mukaan. Lisäksi päästöille altistumisen riskiä on vaikea arvioida nykyisellä, laajemmalla aluetasolla luotettavasti.

Laajempi aluetaso tuottaa haasteita myös tietullin tai kilometripohjaisen maksun laskentaan. Teknisesti maksut olisi mahdollista toteuttaa paikkasidonnaisesti, mutta koska matkatietojen aluerajaus on tällä hetkellä seutukuntatasolla, on haastavaa määrittää tarkasti, mitkä matkoista vaatisivat tietullin ja mitkä matkoista tapahtuisivat mahdollisen korkeamman kilometriverotuksen alueella. Siksi malliin on haastavaa toteuttaa menelmää, jolla tätä voisi arvioida luotettavasti. Lisäksi, koska malli ei tällä hetkellä tiedosta esimerkiksi aikasidonnaisuutta, ei tätä voida huomioida ollenkaan. Lisäksi tämän kytkeminen jo olemassa olevaan hintajoustokomponenttiin lisäisi laskentakerroksia ja sitten mallin ajamiseen tarvittavaa aikaa, eikä niitä siksi ole toteutettu tähän versioon.

Mallista on haluttu toteuttaa helposti kehitettävissä ja jaettavissa oleva versio, jonka vuoksi laskenta on toteutettu Microsoft excel -ohjelmistolla. Autokannan kehityksen laskenta vuosia eteenpäin pohja- ja vertailuskenaarioon on kuitenkin raskasta. Jo nykyisellään, vuoteen 2030, on autokannan kehityslaskenta jouduttu jakamaan kolmeen eri laskentatiedostoon. Joten malli on tällä hetkellä rajattu vain vuoteen 2030. SALAMA-malli mahdollistaisi jo nykyisellään taustaskenaarioiden tuottamisen vuoteen 2040 asti, ja myös sitä on mahdollista päivittää tarvittaessa luomaan skenaarioita pidemmälle.

2030 on tällä hetkellä valittu tavoitevuodeksi myös siksi, että hankkeen aikana käytössä ollut HLT-aineisto oli rajoittunut vuoden 2016 versioon, eikä tuorempi versio ollut saatavilla laskennan kehityksen kannalta tarpeeksi ajoissa. Tutkijaryhmä ei nähnyt hyödyllisenä, että vuoden 2016 aineistolla olisi pyritty rakentamaan skenaarioita vuodesta 2030 eteenpäin, sillä kyseinen aineisto on varsin vanhaa. Osaltaan tätä on pyritty korjaamaan mahdollisuudella päivittää peruskkenaariota käyttäjän haluamaksi sekä korjaamalla suoriteita automaattisesti virallisella väestönkehityssennusteella.

Jatkokehityksen kannalta laskentatyökalu olisi syytä päivittää paremmin laskentaoperaatioita tukevalle alustalle, jolloin sekä sen ajamisen nopeutta että aikajännettä olisi mahdollista kasvattaa. Mikäli aineiston laskennan siirtää uudelle alustalle, olisi samalla myös HLT-aineistojen osalta kannattavaa päivittää tuorempi lähtödata. Mikäli työkalun siirtäisi paremmalle alustalle, voi laskenta-aluerajausta laajentaa nykyisestään ja kaupunkiseututason ohella pyrkiä huomioimaan tarkemmin missä kaupungissa ja millaisilla alueilla matkat tapahtuvat, koska ylimääräisten matkarivien laskennasta ei tällöin syntyisi samanlaista vaikutusta laskennan nopeuteen. Tämä mahdollistaisi tietullimaksujen tai kilometriverotuksen rakentamisen malliin tarkalla tasolla. Samassa tilanteessa myös muut päästölajit kuin pelkkä CO₂ olisi mahdollista huomioida, ja päästöt voisi laskea myös tarkemmin alueitasolle, jolloin näiden terveysvaikutusten laskenta onnistuisi luotettavammin. Samalla mahdollistuisi myös joustojen huomiointi eri tavoin eri alueilla, eikä nykyisen kaltaisesti keskiarvotetusti koko maan tasolle. Samalla tämä mahdollistaisi myös laskennan pidemmälle aikajänteelle. Nykyisen, valitun työkalun rajallisuus on tiedostettu myös hankkeen aikana, mutta helposti jaettavan ja tietoturvallisen ratkaisun kehittämiseen tutkijaryhmä ei löytänyt hankkeen aikajänteelle paremmin sopivaa ratkaisua.

4.3 Tavaraliikenne

4.3.1 Lähtötiedot

Tavaraliikenteen mallinnus keskittyy kuorma-autokuljetuksiin. Pakettiautoliikenne jakautuu henkilö- ja tavaraliikenteeseen eikä pakettiautokuljetuksista ole saatavilla kattavaa tietoa. Rautatie- ja vesikuljetukset ovat mukana yksinkertaistetun kuljetussuoritepohjaisen kustannus- ja päästölaskennan avulla. Niiden merkitys kuljetuskustannuksiin ja päästöihin on hyvin vähäinen (<5 %), vaikka niiden osuus kotimaan kuljetussuoritteesta onkin merkittävä (n. 30 %). Tietolähteenä kuljetussuoritteista on rautatiekuljetusten osalta käytetty Tilastokeskuksen Rautatietilastoa ja vesiliikenteen osalta Tilastokeskuksen Kotimaan vesiliikennetilastoa. Päästötietojen lähteenä on käytetty rautatiekuljetuksissa VTT:n LIPASTO-tietokantaa ja vesiliikenteen osalta MeRIMA-mallin tulosraporttia (Salanne et al. 2021). Kustannustietojen lähteenä on käytetty Väyläviraston ohjeita Tie- ja rautatie liikenteen hankearvioinnin yksikköarvot 2018 (Väylävirasto 2022b) sekä Alusliikenteen

yksikkökustannukset 2018 (Väylävirasto 2020c). Laskennassa käytetyt rautatie- ja vesikuljetusten päästö- ja kustannuskertoimet oletetaan vakioiksi koko laskenta-ajalle. Kertoimet on esitetty taulukossa 10:

Taulukko 10. Rautatie- ja vesikuljetusten kustannus- ja päästökertoimet.

Kertoimet	Rautatiekuljetukset	Vesikuljetukset
Kustannukset snt/tkm	6,1	6,0
CO ₂ -päästöt g/tkm	5,8	20,4

Kuorma-autokuljetusten kysyntä liittyy vahvasti Suomen toimialarakenteeseen, joten mallinnuksen lähtökohtana on Tilastokeskuksen kansantalouden tilinpidon tilasto Tulot ja tuotanto sektoreittain ja toimialoittain, josta lähtötietona käytetään toimialojen nettoarvonlisäystä. Tulevaisuuden arvonlisäyksien arvoina toimialoittain on käytetty Tieliikenteen valtakunnallisen ennusteen (Traficom 2021) arvoja. Mallissa ei lähtökohtaisesti ole tarvetta muuttaa arvonlisäysennustetta, eikä se myöskään muutu laskennassa automaattisesti joustojen kautta, eli kuljetuskustannusten muutokset eivät vaikuta toimialojen arvonlisäykseen, eivätkä kokonaiskuljetussuoritteeseen, eli kuljetusmuotojen tonnikilometrien summaan. Arvonlisäyksen ja kokonaiskuljetussuoritteen muuttaminen on mahdollista, mutta tällöin kyseessä ovat liikennesektorin ulkopuoliset päästövähennystoimenpiteen vaikutukset, eikä mallia ole tarkoitettu tällaisiin tarkasteluihin. Tieliikenteen tavarankuljetustilasto on tiekuljetusten pääasiallinen tietolähde. Se on sähköisenä kyselynä tehtävä otostilasto. Vuosittain kysely osoitetaan yhteensä 10 000 kuorma-auton haltijalle, joilta pyydetään tietoja kuorma-autosta ja sen käytöstä kolmen tai neljän peräkäisen tutkimuspäivän aikana. Tilaston tulokset perustuvat kyselyn perusteella saatuihin kuorma-autojen matkatietoihin, jotka tilastollisin menetelmin korotetaan vastaamaan koko otoskehikkoa. Tilasto sisältää kotimaan ja ulkomaan kuljetusten tietoja, joista tässä tutkimuksessa käytetään kotimaan tietoja. Perusvuoden 2018 aineisto sisältää tiedot 8 628 matkasta. Jokaisesta matkasta tilastossa on lähtö- ja määräkunnan tieto, kuljetusetäisyys, tavaramäärä sekä kuorma-auton tietoja. Aineistoa täydennetään laskemalla jokaiselle matkalle polttoaineenkulutus sekä kustannukset. Tavarankuljetustilasto sisältää myös tiedon tavaralajista, jonka perusteella kuljetukset jaetaan toimialoille. Käytettävät toimialat ja tavaralajien kohdistuminen toimialoille on esitetty liitteessä 2.

Tieliikenteen tavarankuljetustilaston tunnettu ongelma on, että sen mukaan kuorma-autojen liikennesuorite on vain noin puolet tietilaston mukaisesta kuorma-autojen liikennesuoritteesta. ero johtuu pääosin tilastojen erilaisesta tiedonkeruusta, mutta osittain myös tietilastoon sisältyvien ulkomaisten kuorma-autojen puuttumisesta

tavarankuljetustilastosta. ero otetaan mallinnuksessa huomioon korottamalla kilometri-perustaiset tulokset (polttoaineenkulutus ja päästöt, polttoaine- ja huoltokustannukset) vastaamaan tietilaston mukaista liikennesuoritetta kilometrikertoimella. Kilometrikerroin on sama kaikille tavaralajeille/toimialoille, mikä ei välttämättä vastaa todellisuutta, esimerkiksi raakapuukuljetukset painottuvat vähäliikenteiselle tieverkolle, jolla tietilaston liikennelaskentaa tehdään harvoin.

Kuorma-autokannan muutoksia tarkastellaan valtakunnallisella kuorma-autokantamallilla, joka mahdollistaa tulosten tarkastelun toimialoittain ja kuorma-autotyypeittäin. Kuorma-autokantamalli perustuu Ilmastopaneelin (Liimatainen ym. 2015) selvityksessä käytettyyn Liikenteen tutkimuskeskus Vernen malliin, mutta sitä on kehitetty yksityiskohtaisemmaksi erottelemalla kuorma-autotyypeistä kevyet kuorma-autot omaksi luokakseen. Kuorma-autokantamallissa ennakoidaan nyt erikseen N2- (N2 KAIP) ja N3-luokan (N3 KAIP) kuorma-autokannan muutosta, eli kokonaismassaltaan alle ja yli 12-tonnin kuorma-autoja, sekä puoliperävaunullisten yhdistelmien (KAPP) ja perävaunullisten yhdistelmien (KAVP) autokannan muutosta.

Tieliikenteen tavarankuljetustilasto sisältää kuorma-autojen tekemistä matkoista tiedot lähtö- ja määräkunnasta, kuljetusetäisyydestä, tavaramäärästä sekä kuorma-auton ominaisuuksista, kuten omamassasta sekä vuosimallista, jonka perusteella määritetään euro-päästöluokka. Aineistoa täydennetään laskemalla jokaiselle matkalle polttoaineenkulutus sekä kustannukset. Polttoaineenkulutus lasketaan Liimataisen ja Pölläsen (2011) määrittelemien kulutusfunktioiden perusteella ottamalla huomioon omamassa, kuljettavan tavarantoiminnan massa, euro-päästöluokka sekä liikenneympäristö. Liikenneympäristön osalta käytetään kaupunkiajon kulutusfunktiota, mikäli kuljetuksen lähtö- ja määräpaikkakunta ovat samalla seutukunnalla pääkaupunkiseudun, suurten tai keskisuurten kaupunkien alueella, pienten seutukuntien sisäiset kuljetukset lasketaan maantieajon kulutusfunktiolla.

4.3.2 Laskentaprosessi ja laskennan oletukset

Perusskenaariossa oletetaan tiekuljetussuoritteiden muuttuvan Tieliikenteen valtakunnallisen ennusteen (Traficom 2021) mukaisesti, mutta rautatie- ja vesikuljetusten suoritteiden pysyvän samana koko laskenta-ajan. Näin tiekuljetusten osuus kasvaa hieman vuoteen 2030 mennessä ja laskee hieman vuoteen 2050 mennessä. Kuljetussuoritteiden jakauma rautatie-, vesi- ja tiekuljetusten välille on muutettavissa laskennassa, mutta se ei muutu laskennassa automaattisesti, vaan käyttäjä voi manuaalisesti muuttaa suoriteosuutta. Malli antaa suosituksen tiekuljetusten suoriteosuudeksi johtuen tiekuljetusten polttoainekustannusten ja €/tkm-kustannusten muutoksista. Suositus perustuu De Jongin et al. (2010) suosittelemiin tiekuljetusten hintajoustoihin, jotka on esitetty taulukossa 11:

Taulukko 11. Tiekuljetusten hintajoustop.

Muutos	Vaikutus polttoaineen- kulutukseen	Vaikutus liikenne- suoritteeseen	Vaikutus kuljetus- suoritteeseen
Polttoaineen hinnan muutos	-0,3	-0,2	-0,1
Tonnikilometrin hinnan muutos			-1,0

Yllä mainittuja joustoja hyödynnetään myös tiekuljetusten tehokkuuden muutosten laskennassa. Peruskennariossa tiekuljetusten keskiuormat toimialoittain sekä tyhjänä ajon osuus kunkin kuorma-autoluokan liikennesuoritteesta pysyvät perusvuoden tasolla, mutta käyttäjä voi syöttää malliin prosentuaalisen muutoksen keskiuormalle ja tyhjänä ajolle vuosille 2030 ja 2050. Muutosten myötä kuorma-autojen liikennesuoritteet muuttuvat, mikä vaikuttaa edelleen autokantaan, kustannuksiin ja päästöihin. Tällöin myös tiekuljetusten tkm-kustannus muuttuu ja käyttäjälle suositellaan tiekuljetusten kuljetussuoriteosuu- den muuttamista.

Kustannuslaskennassa edellä kuvatulla tavalla lasketun polttoaineenkulutuksen perusteella lasketaan jokaiselle matkalle verottomat polttoainekustannukset sekä polttoaineveron kustannukset. Polttoaineiden hinnat ja verotasot ovat samat kuin henkilöliikenteessä. Myös polttoaineen arvonlisäveron kertymä voidaan laskea, mutta sitä ei käytetä mallinnuksessa, koska suurin osa kuljetuksista on yritystoimintaa, jossa arvonlisävero voidaan vähentää. Liikennesuoritteen perusteella lasketaan jokaiselle matkalle huolto- ja rengaskustannukset taulukon 12 mukaisilla arvoilla:

Taulukko 12. Kuorma-autojen huoltokustannukset.

Kuorma-autotyyppi	N2 KAIP	N3 KAIP	KAPP	KAVP
Diesel €/km	0,143	0,183	0,163	0,22
Kaasu €/km	0,131	0,171	0,158	0,22
Sähkö €/km	0,074	0,114	0,133	0,19

Huoltokustannukset on arvioitu VTT:n (2021) raportin mukaisesti ja rengaskustannukset Palomäen (2013) opinnäytetyön perusteella ja ne ovat hieman korkeammat kuin yksikköarvoissa määritellyt muut käyttökustannukset (Väylävirasto 2022a). Polttoaine- ja huoltokustannukset laajennetaan vastaamaan otoskehikkoa auto- ja aikakertoimilla.

Jokaiselle autolle lasketaan myös käyttövoimavero ja arvonalenema. Käyttövoimaveron laskenta perustuu Traficomin kuorma-autojen käyttövoimaverotaulukoihin, joissa veron määrään vaikuttaa kokonaismassa, kuorma-auton tyyppi sekä akselien lukumäärä, jotka sisältyvät tilaston tietoihin (0,6–2,2 snt/päivä/alkava 100kg). Käyttövoimaveron laskennassa oletetaan kuorma-autojen olevan liikennekäytössä koko vuoden eli 365 päivää. Arvonaleneman osalta kuorma-autojen hankintahinnat on arvioitu VTT:n (2021) raportin perusteella taulukon 13 mukaisesti:

Taulukko 13. Kuorma-autojen hankintahinnat.

Kuorma-autotyyppi	N2 KAIP	N3 KAIP	KAPP	KAVP
Hankintahinta dieselkuorma-autolle €	125 000	165 000	165 000	200 000
Kaasukuorma-auton hintakerroin	1,3	1,3	1,3	1,3
Sähkökuorma-auton hintakerroin	2,5	2,5	2,5	2,5
Vetykuorma-auton hintakerroin	4	4	4	4

Kuorma-auton poiston arvoksi oletetaan 16 % edellisen vuoden arvosta, jolloin tilastovuoden aikana rekisteröidyn kuorma-auton arvo alenee 8 % hankintahinnasta, vuoden ikäisen kuorma-auton arvo alenee 16 % hankintahinnasta, ja esimerkiksi 10 vuoden ikäisen kuorma-auton 3 % hankintahinnasta. Kokonaisarvonalenema on siten hankintahinnan suuruinen noin 15 vuoden käytön jälkeen, eikä sillä ole laskennallista jälleenmyyntiarvoa.

Tulevaisuuden perusskenaarion lähtökohtana on talouden ja tiekuljetussuoritteiden ennuste. Arvonlisäyksien ja kuljetussuoritteiden ennusteena toimialoittain on käytetty Tie liikenteen valtakunnallisen ennusteen (Traficom 2021) arvoja. Tonnikilometrit jyvitetään toimialoittain kuorma-autotyypeille käyttäen perusvuoden 2018 jakaumaa, toisin sanoen kuorma-autotyyppien keskinäisessä työnjaossa toimialan sisällä ei oleteta tapahtuvan muutosta.

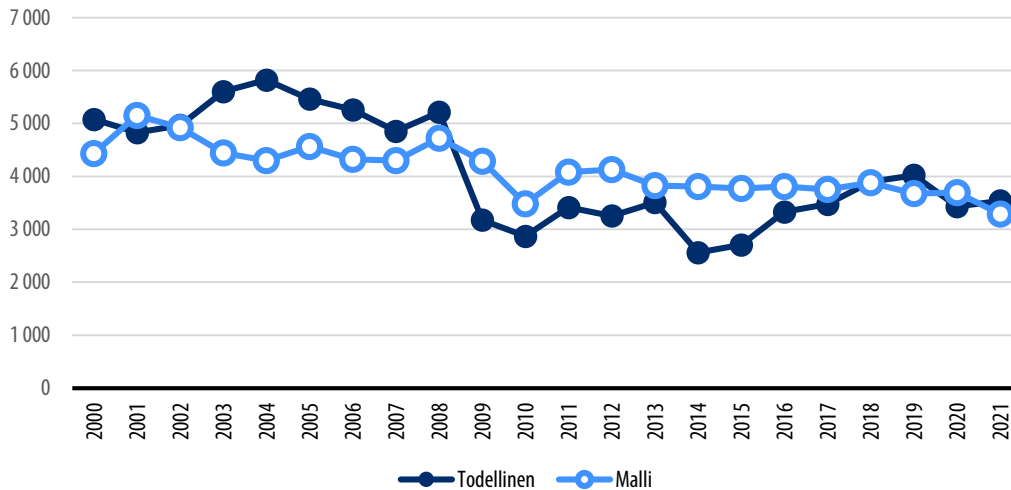
Kuorma-autojen kokonaisliikennesuoritteiden perusennuste perustuu VTT:n tekemään Suomen liikenteen kasvihuonekaasupäästöjen perusennusteeseen (VTT 2021), jossa kuorma-autojen liikennesuorite on jaettu kuorma-autoille ilman perävaunua ja

kuorma-autoyhdistelmille. Laskennassa nämä jaetaan edelleen neljälle kuorma-autotyypille (N2, KAIP, KAPP, KAVP) sekä toimialoille käyttäen perusvuoden 2018 mukaisia jakaumia. Vaihtoehtoisia tulevaisuuden skenaarioita luotaessa käyttäjä voi muuttaa kuorma-autotyypillä tyhjänä ajettavien kilometrien osuutta sekä toimialoittain kuljetusten keskikuormaa vuosille 2030 ja 2050, jolloin kuorma-autotyyppien liikennesuorite muuttuu ja tämä muutos välittyy autokantalaskentaan yksittäisen kuorma-auton vuosisuoritteen muutoksena.

Kuorma-autokannan uusien kuorma-autojen rekisteröintien määrät sekä käytettynä maahantuotujen kuorma-autojen määrät ja ikäjakaumat pohjautuvat perusennusteessa VTT:n tekemään Suomen liikenteen kasvihuonekaasupäästöjen perusennusteeseen (VTT 2021), jossa kuorma-autojen määrät on jaettu kuorma-autoille ilman perävaunua ja kuorma-autoyhdistelmille. Laskennassa nämä jaetaan edelleen neljälle kuorma-autotyypille (N2, KAIP, KAPP, KAVP) sekä toimialoille käyttäen vuosien 2008–2021 keskiarvojen mukaisia jakaumia, jotka saatiin hankkeeseen Tilastokeskukselta. Vaihtoehtoisia tulevaisuuden skenaarioita luotaessa käyttäjä voi itse esittää arvion uusien rekisteröintien ja käytettynä maahantuotujen kuorma-autojen kokonaismäärästä vuosille 2030 ja 2050. Vaihtoehtona on myös käyttää laskentaa varten luotua mallia, jossa rekisteröintien määrä riippuu kyseisen vuoden arvonlisäyksen määrästä ja edellisen vuoden arvonlisäyksen muutosprosentista seuraavan kaavan mukaisesti:

$$\text{ensirekisteröinnit} = 0,5 * (6,4678 * (\text{vuosimuutos} + 1) ^ 2 + 139,67 * (1 + \text{vuosimuutos}) + 3\,503) + 0,5 * (10\,087,877 * \text{EXP}(-0,000005534 * \text{arvonlisäys}))$$

Tämän kaavan tuottamat rekisteröintimäärät ja niiden vertailu toteutuneisiin rekisteröinteihin vuosina 2000–2020 on esitetty kuviossa 9. Mallin mukaiset tulevaisuuden kuorma-autojen rekisteröintimäärät ovat kymmeniä prosentteja pienemmät kuin VTT:n perusennusteen asiantuntija-arvioon pohjautuvat määrät. Tämä kuvaa arvonlisäyksen ja tiekuljetussuoritteen sekä sen kautta kuorma-autojen rekisteröintien välistä irtikytkentää, joka näkyy Suomessa rekisteröintimäärissä 2010-luvun alusta lähtien:

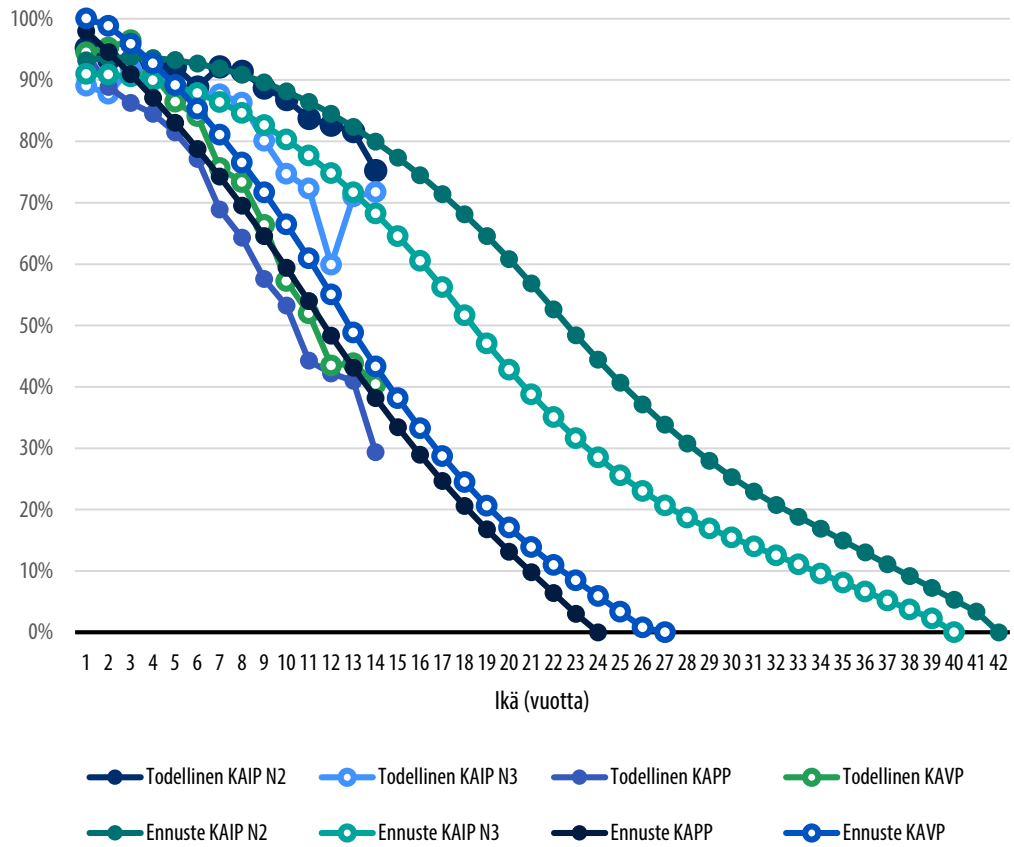
Kuvio 9. Mallilla tuotettujen kuorma-autojen ensirekisteröintimäärien vertailu toteutuneisiin.

Uusien kuorma-autojen käyttövoimajakauma on määritetty perusskenaariossa VTT:n ja LVM:n perusennusteen 2021 mukaisesti, eli kaasukuorma-autojen osuus KAIP-rekisteröinneistä on 5 % vuonna 2030 ja 10 % vuonna 2050 ja osuus KAPP/KAVP-rekisteröinneistä on 10 % vuonna 2030 ja 40 % vuonna 2050. Vastaavasti sähkökuorma-autojen osuudet ovat KAIP-rekisteröinneistä on 5 % vuonna 2030 ja 20 % vuonna 2050 ja osuus KAPP/KAVP-rekisteröinneistä on 3 % vuonna 2030 ja 15 % vuonna 2050.

Kuorma-autojen poistuma autokannasta on mallinnettu käyttäen pohjatietona Tilastokeskukselta saatuja tietoja rekisteröinneistä ja käytettynä maahantuoduista kuorma-autoista 2008–2021 sekä vuoden 2021 lopun liikennekäytössä olevaa autokantaa rekisteröintivuosittain. Kuorma-autojen poistuma autokannasta on mallinnettu kuviossa 10 näkyvien osuuksien mukaisesti:

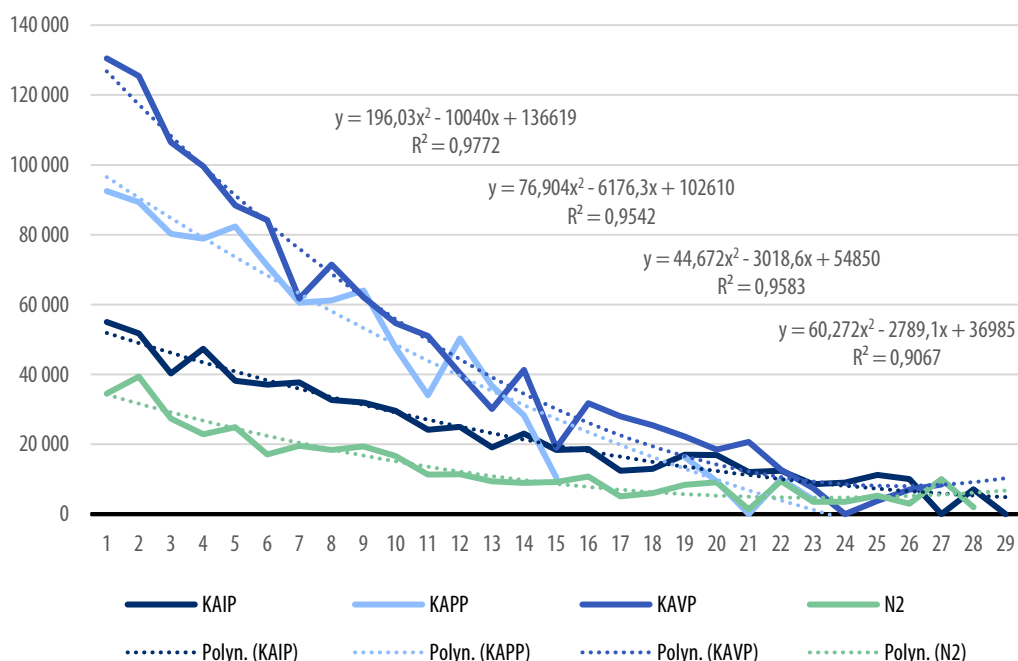
Kuvio 10. Kuorma-autojen poistumafunktiot mallissa.

Kannasta jäljellä
liikennekäytössä



Kuorma-autojen vuosittainen suorite laskee voimakkaasti iän myötä. Vuosisuoritteen lähtötaso ja iän mukainen alenema on arvioitu Tieliikenteen tavarankuljetustilaston aineiston perusteella ja vuosisuoritteen alenemat ovat kuvion 11 mukaiset:

Kuvio 11. Kuorma-autojen vuosisuoritteen alenemat mallissa.



Uusiutuvien polttoaineiden osuudet määrittyvät perusskenaariossa jakeluvelvoitteen mukaisesti, olettaen, että liikenteessä käytettävästä metaanista 60 % on biokaasua ja bensiinistä 7 % on etanolia. Jakeluvelvoitteen täyttämiseksi käytettävästä dieselistä uusiutuvaa tulee siten olla taulukon 14 mukaisesti:

Taulukko 14. Uusiutuvan dieselin osuus.

	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030–2050
Uusiutuvan dieselin osuus dieselin lämpöarvosta	16 %	38 %	39 %	39 %	41 %	42 %	44 %	47 %

4.3.3 Tulosten esittäminen

Kuorma-autokuljetusten tärkeimmiksi tunnusluvuiksi laskentamallilla saadaan edellä kuvatuilla oletuksilla taulukon 15 mukaiset arvot. Liikennesuoritteen suuri kasvu ilman tiekuljetussuoritteen kasvua ja tästä johtuva tiekuljetusten tehokkuuden heikkeneminen keskikuorman ilmaisevana osoittavat, että 2030 VTT rekisteröinnit skenaariossa käytetyt uusien kuorma-autojen rekisteröintimäärät ovat liian suuria. Tehokkuuden heikkeneminen VTT:n perusennusteen mukaisia kuorma-autojen rekisteröintimääriä käyttämällä korostuu edelleen vuoteen 2050 mennessä. Näin ollen on suositeltavaa käyttää perusskenaariona BKT:hen sidottua uusien kuorma-autojen rekisteröintimallia (2030mallin rekisteröinnit), jota käyttämällä tiekuljetusten tehokkuus pysyy lähempänä nykytasoa, kuten taulukosta 15 nähdään:

Taulukko 15. Peruskenaariovertailu.

	2021	2030 VTT rekisteröinnit	2030 mallin rekisteröinnit
BKT (mrd. €)	209	244	244
Kokonaiskuljetussuorite (mrd. tkm)	40,9	40,9	40,9
Kokonaiskustannukset (mrd. €)	3,5	4,0	3,7
Kokonaispäästöt (CO2 Mt)	2,5	1,8	1,6
Tiekuljetussuorite (mrd. tkm)	28,7	28,7	28,7
Tiekuljetusintensiteetti (tkm/€)	0,14	0,12	0,12
Liikennekäytössä olevat kuorma-autot (kpl)	93 839	90 880	87 286
Liikennesuorite (mrd. km)	3,1	3,4	3,2
Keskikuorma (t)	9,3	8,4	9,1
Energiankulutus (PJ)	42,4	43,7	40,4
Keskikulutus (kWh/km)	3,8	3,6	3,6
Kuorma-autojen CO2-päästöt (Mt)	2,4	1,7	1,5
CO2-sisältö (g/kWh)	206	135	136
Kokonaiskäyttökustannukset (milj. €) kuorma-autot	3 450	3 958	3 648
Kokonaiskäyttökustannukset (milj. €) kuorma-autot, veroton	2 703	3 294	3 030
Verotulot yhteensä (milj. €)	747	664	618

	2021	2030 VTT rekisteröinnit	2030 mallin rekisteröinnit
Ajoneuvo- ja käyttövoimaverot (milj. €)	115	111	105
Käyttövoimista kerätyt verot, ei sis. alv (milj. €)	632	553	513

4.3.4 Laskentaesimerkit

4.3.4.1 Tieliikenteen EU-päästökauppa 2027 alkaen

ensimmäisenä laskentaesimerkinä tarkastellaan eU:n tieliikenteen päästökaupan vaikutuksia kuljetusten päästöihin ja kustannuksiin. eU on aloittamassa tieliikenteen päästökauppaa vuonna 2027 (LVM 2022) ja päästökaupan arvioidaan nostavan fossiilisten polttoaineiden hintoja 7–8 % (Schroten et al. 2022) eli, joka Suomessa olisi noin 0,14 €/l. Päästökaupan aiheuttamaa korotusta käsitellään mallissa kuten polttoaineiden CO₂-veron korotusta. Laskentamallissa fossiilisen dieselpolttoaineen energiaverojen tasoa korotetaan 0,59–0,73 €/l vuonna 2027 ja tämän jälkeisille vuosille. Laskenta tehdään ensin ottamatta huomioon kuljetusmuotosiirtymää ja sitten ottamalla huomioon tiekuljetusten kustannusten noususta johtuva siirtymä juna- ja vesikuljetuksiin. Tulokset on esitetty taulukossa 16:

Taulukko 16. Tieliikenteen päästökaupan vaikutukset kuljetusten indikaattoreihin ja kustannusvaikuttavuus.

	2030 perus- skenaario	2030 päästökauppa- skenaario	2030 päästökauppa kuljetusmuoto- siirtymällä
BKT (mrd. €)	244	244	244
Kokonaiskuljetussuorite (tie+raide+vesi, mrd. tkm)	40,9	40,9	40,9
Kokonaiskustannukset (tie+raide+vesi, mrd. €)	3,7	3,8	3,7
Kokonaispäästöt (tie+raide+vesi, CO ₂ Mt)	1,64	1,62	1,60
Tiekuljetussuorite (mrd. tkm)	28,7	28,7	28,0
Tiekuljetusintensiteetti (tkm/€)	0,12	0,12	0,11

	2030 perus- skenaario	2030 päästökauppa- skenaario	2030 päästökauppa kuljetusmuoto- siirtymällä
Liikennekäytössä olevat kuorma- autot (kpl)	87 286	87 286	87 286
Liikennesuorite (mrd. km)	3,2	3,1	3,1
Keskikuorma (t)	9,1	9,2	9,1
Energiankulutus (PJ)	40,4	40,0	39,2
Keskikulutus (kWh/km)	3,6	3,5	3,6
Kuorma-autojen CO ₂ -päästöt (Mt)	1,53	1,51	1,5
CO ₂ -sisältö (g/kWh)	136	136	136
Kokonaiskäyttökustannukset (milj. €) kuorma-autot	3 648	3 694	3 639
Kokonaiskäyttökustannukset (milj. €) kuorma-autot, veroton	3 030	3 006	2 962
Verotulot yhteensä (milj. €)	618	688	677
Ajoneuvo- ja käyttövoimaverot (milj. €)	105	105	105
Käyttövoimista kerätyt verot, ei sis. alv (milj. €)	513	583	572
Julkiset tuet (milj. €)	0	0	0
Toimenpiteen päästövähennä 2023–2030 (Mt), sulussa ilman muutoksia 2023–2026		-0,09 (-0,06)	-0,24 (-0,16)
Toimenpiteen veroton kustannus 2023–2030, (milj. €)		-97	-287
Toimenpiteen kustannusvaikuttavuus 2023–2030, veroton (€/t)		-1 068	-1 208
Toimenpiteen verollinen kustannus 2023–2030 (milj. €), sulussa ilman muutoksia 2023–2026		144 (188)	-91 (39)
Toimenpiteen kustannusvaikuttavuus 2023–2030, verollinen (€/t), sulussa ilman muutoksia 2023–2026		1 583 (3 133)	-382 (244)

Taulukosta nähdään, että tieliikenteen päästökaupan myötä nouseva energian hinta johdattaa tiekuljetusten tehokkuuden paranemiseen (liikennesuorite pienenee, kun keskiuorma kasvaa) ja mahdollisesti kuljetusmuotosiirtymiin. Nämä muutokset eivät kuitenkaan ole riittäviä estämään kuljetusten kokonaiskustannusten merkittävää nousua. Vuonna 2030 kuljetusyriyten verottomat energiakustannukset ovat laskentamallin mukaan 21 Milj. € pienemmät, mutta päästökauppakustannukset (mallissa energiaverot) 70 milj. € suuremmat kuin ilman päästökauppaa. Kuljetusten kumulatiiviset kokonaiskustannukset 2023–2030, sisältäen kuorma-autojen, rautatiekuljetusten ja vesikuljetusten kustannukset, ovat 144 milj. € suuremmat ja kumulatiiviset päästövähennykset ovat 0,09 Mt, joten toimenpiteen kustannusvaikuttavuus vähennettyä päästötonnia kohti on 1 583 €/t. Laskentamalli mallintaa kuljetusten tehokkuuden paranemisentapahtuvan vähittäin vuodesta 2023 alkaen, vaikka päästökauppa vaikuttaa fossiilisen dieselin hintaan vasta vuonna 2027. Tämän voidaan tulkita vastaavan yritysten mahdollisuutta sopeutua ennakkoon kustannusten nousuun, kun sääntelyn muutos on tiedossa.

Laskentamallilla saadut arviot päästökaupan vaikutuksista kuorma-autojen liikennesuoritteeseen ja päästöihin sekä verokertymään vuonna 2030 ovat samaa suuruusluokkaa kuin Moilasan ym. (2021) ja Savikon ym. (2021) laskelmissa. Herkkyystarkastelu myös vahvistaa Kok ym. (2011) havainnon laskentamenetelmien valinnan suuresta vaikutuksesta kustannusarvioihin. Herkkyystarkasteluna on laskettu myös kumulatiiviset kustannusten ja päästöjen muutokset ilman ennakoitua, eli muutosten tapahtuessa vasta vuodesta 2027 eteenpäin. Mikäli ennakoitua ei tapahdu, heikkenee kustannusvaikuttavuus olennaisesti. Muutos on erityisen merkittävä kuljetusmuotosiirtymän kohdalla. Mikäli kuljetusmuotosiirtymää lähdetään toteuttamaan vähitellen jo 2023 alkaen, kuljetusten kumulatiiviset kokonaiskustannukset jopa laskevat ja toimenpiteen kokonaisvaikutus on yhteiskuntataloudelle positiivinen, mutta ilman ennakoitua kumulatiiviset kustannukset nousevat ja päästövähennyksestä aiheutuu kustannuksia 244 €/t. Herkkyystarkastelu osoittaa pitkäjänteisen ja ennakoitavan ilmastopolitiikan suuren merkityksen kuljetusten päästövähennysten kustannusvaikuttavuuteen.

4.3.4.2 Sähkö- ja kaasukuorma-autojen hankintatuki

Toisena esimerkkilaskelmana tarkastellaan sähkö- ja kaasukuorma-autojen hankintatukien kustannusvaikuttavuutta. Traficom (2021a) arvioi sähkökuorma-autojen hankintatuella saatavan liikenteeseen 695 sähkökuorma-autoa vuosina 2022–2025, kun tuen kokonaismäärä olisi noin 15,5 milj. €. Sähköistyminen painottuu pienempiin kuorma-autoihin ja tuella hankittavien kuorma-autojen arvioitiin vähentävän CO₂-päästöjä 27 000 tonnia vuosittain autojen elinkaaren ajan. Kaasukuorma-autojen osalta Traficom (2021b) arvioi tukea käytettävän noin 1,9 milj. €, jolla hankittaisiin noin 120 paineistettu metaania käyttävää CNG-kuorma-autoa ja noin 110 nesteytettyä metaania käyttävää LNG-kuorma-autoa.

Laskentamallissa tarkastellaan tukien vaikutusta, kun tuella hankittaisiin 695 sähkökuorma-autoa tai 230 kaasukuorma-autoa vuosina 2022–2025. Mallissa sähkökuorma-autojen määrä lisääntyy perusskenaarioon nähden vuonna 2030 noin 1 100 sähkökuorma-autolla, koska tuella hankittujen lisäksi sähkökuorma-autojen osuus vaikuttaa mallissa käytettynä maahan tuotujen kuorma-autojen ja vuosien 2026–2030 ensirekisteröintien käyttövoimajakaumaan. Tämä on sinänsä realistista, että latausinfraan investointi madaltaa kynnystä hankkia tulevaisuudessakin sähkökalustoa. Samoin kaasukuorma-autojen määrä lisääntyy 377 kuorma-autolla vuonna 2030, eli enemmän kuin hankintatuella hankittiin. Kuorma-autojen hankintatuki on valtion investointikustannus, joka yritykselle vähentää kuorma-autojen hankintahintaa ja siten arvonalenaan liittyviä poistokustannuksia. Tuen vaikutukset on esitetty taulukossa 17:

Taulukko 17. Kuorma-autojen hankintatukien vaikutukset kuljetusten indikaattoreihin ja kustannusvaikuttavuus.

	2030 perus- skenaario	2030 sähkötuki- skenaario	2030 kaasutuki- skenaario	2030 kaasutuki 100 % bio
BKT (mrd. €)	244	244	244	244
Kokonaiskuljetussuorite (tie+raide+vesi, mrd. tkm)	40,9	40,9	40,9	40,9
Kokonaiskustannukset (tie+raide+vesi, mrd. €)	3,7	3,7	3,7	3,7
Kokonaispäästöt (tie+raide+vesi, CO ₂ Mt)	1,64	1,62	1,64	1,57
Tiekuljetussuorite (mrd. tkm)	28,7	28,7	28,7	28,7
Tiekuljetusintensiteetti (tkm/€)	0,12	0,12	0,12	0,12
Liikennekäytössä olevat kuorma-autot (kpl), joista sähkö/kaasu	87 286 (1 164/2 629)	87 187 (2 262/2 629)	87 298 (1 164/2 928)	87 298 (1 164/2 928)
Liikennesuorite (mrd. km)	3,2	3,2	3,2	3,2
Keskikuorma (t)	9,1	9,1	9,1	9,1
Energiankulutus (PJ)	40,4	40,1	40,5	40,5
Keskikulutus (kWh/km)	3,6	3,5	3,6	3,6

	2030 perus- skenaario	2030 sähkötuki- skenaario	2030 kaasutuki- skenaario	2030 kaasutuki 100 % bio
Kuorma-autojen CO ₂ -päästöt (Mt)	1,53	1,50	1,53	1,46
CO ₂ -sisältö (g/kWh)	136	135	135	130
Kokonaiskäyttökustannukset (milj. €) kuorma-autot	3 648	3 640	3 647	3 632
Kokonaiskäyttökustannukset (milj. €) kuorma-autot, veroton	3 030	3 029	3 031	3 020
Verotulot yhteensä (milj. €)	618	611	616	612
Ajoneuvo- ja käyttövoimaverot (milj. €)	105	105	105	105
Käyttövoimista kerätyt verot, ei sis. alv (milj. €)	513	506	511	507
Julkiset tuet (milj. €)		15,2	1,9	1,9
Toimenpiteen päästövähennmä 2023–2030 (Mt)		-0,17	-0,02	-0,37
Toimenpiteen veroton kustannus 2023–2030, (milj. €)		19	12	-62
Toimenpiteen kustannusvaikuttavuus 2023–2030, veroton (€/t)		111	501	-168
Toimenpiteen verollinen kustannus 2023–2030 (milj. €)		-20	0,5	-90
Toimenpiteen kustannusvaikuttavuus 2023–2030, verollinen (€/t)		-113	22	-246

Kuten taulukosta nähdään, sähkökuorma-autojen hankintatuella hankittujen kuorma-autojen myötä tiekuljetusten kokonaiskustannukset alenevat vuonna 2030 perusskenaarioon verrattuna 8 milj. €. energiakustannukset, energiaverot ja huoltokustannukset vähenevät merkittävästi, eikä arvonaleneman lisäys ja valtion investointikustannus ole yhtä suuri kuin näiden vähenemä. Kumulatiivinen kokonaiskustannusten vähenemä on 20 milj. € ja kumulatiivinen päästövähennmä 0,17 Mt vuosina 2023–2030. Toimenpiteen

kustannusvaikuttavuus on siten -113 €/t, eli toimenpide on yhteiskunnalle erittäin kustannustehokas. Sähkökuorma-autojen hankintatuki on selkeästi kustannusvaikuttavuudeltaan parempi kuin edellä esitetty sähköhenkilöautojen hankintatuki. Kuorma-autojen hankintatuen vaikutukset ovat epävarmoja, koska vaikutukset on laskettu Traficomin asiantuntija-arvioon perustuen, eikä taustalla ole tutkimuksessa havaittuja joustoja, kuten henkilöautojen tapauksessa. Suomessa käytössä olevan kuorma-autojen hankintatuen vaikutuksia tulisi selvittää, jotta todellisista vaikutuksista saadaan tietoa laskentamalliin. On kuitenkin todennäköistä, että kuorma-autojen hankintatuen kustannusvaikuttavuus on selkeästi parempi kuin henkilöautojen, koska sähkökuorma-autot ovat vasta tulossa markkinoille, eikä investointia välttämättä uskalletaisi tehdä ilman hankintatukea. Kuorma-autojen vuosittaiset päästöt ovat myös paljon suuremmat kuin henkilöautojen verrattuna hankintatuen määrään ja kuorma-auton elinkaari on lyhyempi, joten hyödyt ehtivät henkilöautoa paremmin vaikuttaa vuoteen 2030 mennessä.

Kaasukuorma-autojen hankintatuen vaikutukset ovat hyvin pienet, jos kaasun bio-osuus on 60 %. Kumulatiiviset kustannusmuutokset ovat alle miljoona euroa ja päästövähennykset 0,02 Mt. kustannusvaikuttavuus on 22 €/t. Herkkyystarkasteluna on myös laskettu kustannusvaikuttavuus, mikäli kaasun bio-osuus on 100 % vuosina 2023–2030. Tällöin kustannusvaikuttavuus on selkeästi parempi, koska biokaasun hinta on mallissa selvästi fossiilista alempi.

4.3.4.3 Biopolttoaineiden jakeluelvoitteen kasvattaminen

Kolmantena esimerkkilaskelmana tarkastellaan biopolttoaineiden jakeluelvoitteen kasvattamista. Nykyisen jakeluelvoitteen mukaiset perusskenaarion uusiutuvan dieselin osuudet on esitetty taulukossa 14. Tarkasteltavassa jakeluelvoiteskenaariossa uusiutuvan polttoaineen osuutta dieselissä muutetaan vuosien 2025–2029 osuudet kasvamaan lineaarisesti vuoden 2024 nykyisen lain mukaisesta 38 % tasosta vuoden 2030 50 % tasolle. Tulokset on esitetty taulukossa 18:

Taulukko 18. Biopolttoaineiden jakeluelvoitteen kasvattamisen vaikutukset kuljetusten indikaattoreihin ja kustannusvaikuttavuus.

	2030 perus- skenaario	2030 jakeluelvoite- skenaario	2030 jakeluelvoite kuljetusmuoto- siirtymällä
BKT (mrd. €)	244	244	244
Kokonaiskuljetussuorite (tie+raide+vesi, mrd. tkm)	40,9	40,9	40,9

	2030 perus- skenaario	2030 jakeluelvoite- skenaario	2030 jakeluelvoite kuljetusmuoto- siirtymällä
Kokonaiskustannukset (tie+raide+vesi, mrd. €)	3,7	3,7	3,7
Kokonaispäästöt (tie+raide+vesi, CO ₂ Mt)	1,64	1,55	1,54
Tiekuljetussuorite (mrd. tkm)	28,7	28,7	28,4
Tiekuljetusintensiteetti (tkm/€)	0,12	0,12	0,12
Liikennekäytössä olevat kuorma-autot (kpl)	87 286	87 286	87 286
Liikennesuorite (mrd. km)	3,2	3,1	3,1
Keskikuorma (t)	9,1	9,1	9,1
Energiankulutus (PJ)	40,4	40,2	39,9
Keskikulutus (kWh/km)	3,6	3,6	3,6
Kuorma-autojen CO ₂ -päästöt (Mt)	1,53	1,44	1,42
CO ₂ -sisältö (g/kWh)	136	129	129
Kokonaiskäyttökustannukset (milj. €) kuorma-autot	3 648	3 667	3 644
Kokonaiskäyttökustannukset (milj. €) kuorma-autot, veroton	3 030	3 060	3 041
Verotulot yhteensä (milj. €)	618	607	603
Ajoneuvo- ja käyttövoimaverot (milj. €)	105	105	105
Käyttövoimista kerätyt verot, ei sis. alv (milj. €)	513	502	498
Julkiset tuet (milj. €)	0	0	0
Toimenpiteen päästövähennys 2023–2030 (Mt)		-0,56	-0,62
Toimenpiteen veroton kustannus 2023–2030, (milj. €)		123	43
Toimenpiteen kustannusvaikuttavuus 2023–2030, veroton (€/t)		220	69
Toimenpiteen verollinen kustannus 2023–2030 (milj. €)		71	-26
Toimenpiteen kustannusvaikuttavuus 2023–2030, verollinen (€/t)		128	-42

Biopolttoaineiden jakeluelvoitteen kasvattamisen myötä verottomat energiakustannukset nousevat 30 M€ 2030, energiaverot puolestaan alenevat 11 M€ 2030. Tiekuljetusten päästöt alenevat 0,09 Mt vuonna 2030. Kumulatiiviset muutokset perusskenaarioon verrattuna 2023–2030 ovat kokonaiskustannusten nousu 70 M€ ja päästövähennykset 0,56 Mt, kustannusvaikuttavuus siten 128 €/t.

Herkkyystarkastelussa uusiutuvan polttoaineen sekoitevelvoite nostaa uusiutuvan osuutta dieselissä kuten edellä, mutta tämän lisäksi otetaan huomioon kohonneiden tiekuljetusten energiakustannusten myötä tapahtuva kuljetusmuotosiirtymä raide- ja vesikuljetuksiin. Kuljetusten kokonaiskustannukset nousevat vain 0,2 M€ 2030. Rautatiekuljetusten ja vesikuljetusten kustannukset nousevat, mutta tiekuljetusten liikennesuoritteen vähenemisen myötä tiekuljetusten kustannukset laskevat, vaikka verottomat energiakustannukset nousevat biopolttoaineen vuoksi. Päästöt alenevat 0,1 Mt 2030. Kumulatiiviset muutokset perusskenaarioon verrattuna 2023–2030 ovat kokonaiskustannusten vähenemä 26 M€ ja päästövähennykset 0,62 Mt, kustannusvaikuttavuus on siten -42 €/t, eli biopolttoaineen jakeluelvoitteen korottaminen vähentää sekä päästöjä että kuljetuskustannuksia, jos se saa aikaan kuljetusmuotosiirtymän tiekuljetuksista raide- ja vesikuljetuksiin.

4.4 Laskentatulosten yhteenveto

Tutkimuskirjallisuus ei tarjoa yksiselitteistä yleisiä periaatteita kustannusten laskentaan tai vaikutustarkastelujen laajuuteen. eri menetelmissä on omat etunsa ja rajoitteensa, sillä jokaisen menetelmän mallinnuksessa joudutaan tekemään erilaisia ja erilaajuisia oletuksia tutkimuksen kohteesta. Tässä projektissa kehitettyjä työkaluja testattiin erityyppisten mahdollisten päästövähennystoimenpiteiden vaikutusten arviointiin. Laskennan tuloksena tuotettujen kustannusvaikuttavuuslukujen yhteenveto on esitetty seuraavassa taulukossa 19:

Taulukko 19. Laskentaesimerkkien päästövähennykset ja kustannusvaikuttavuus vuoteen 2030.

	Päästövähennelmä (Mt)	Kustannus- vaikuttavuus, verollinen (€/t)	Kustannusvaikuttavuus ilman veroja ja tukia (€/t)
Päästökauppa henkilöliikenteessä	0,29	1 028	293
Päästökauppa tavaraliikenteessä	0,09	1 583	-1 068
Hankintatuki sähköhenkilöautoille	0,01	10 938	743
Hankintatuki sähkökuorma- autoille	0,17	-113	111
Hankintatuki kaasukuorma- autoille	0,02	22	501
Jakeluvoite dieselille 50 % 2030 tavaraliikenteessä	0,56	128	220

esimerkilaskelmat osoittavat kehitettyjen työkalujen soveltuvan sekä laaja-alaisen toimenpiteiden, kuten päästökaupan, että suppeiden toimenpiteiden, kuten hankintatuet, tarkasteluun. erityyppisille toimenpiteille työkaluilla voidaan tuottaa hyvin yksityiskohtaista tietoa yksittäisille vuosille ja kumulatiivisesti vuoteen 2030 saakka sekä henkilö- että tavaraliikenteestä ja tavaraliikenteessä vuoteen 2050 saakka. Henkilöliikenteessä laskentatyökalun tulostaulukot sisältävät seuraavat tiedot:

- suoritteet aluetasolla (kaupunkialueet, kaupunkien kehys- ja lähialueet, maaseutu) ja kulkutavoittain
- päästöt aluetasolla ja kulkutavoittain
- kustannukset aluetasolla ja kulkutavoittain
- verotulot aluetasolla ja kulkutavoittain
- automäärät käyttövoimittain
- kustannukset lajeittain (kokonaiskustannus, ajoneuvoverot, energiaverot, arvonlisäverot)
- kilometrikustannukset kulkutavoittain
- kilometrikustannukset kotitalouden tuloluokittain (portaittain 20 000 €/vuosi luokkavälein)
- kilometrikustannukset kotitaloustyypeittäin (yksinasuva, lapseton pari, lapsiperhe)

Oletuksena ylläolevat tiedot tarjotaan koko Suomen tasolla, mutta käyttäjä voi halutessaa rajata tarkastelua myös seututasoon mukaan.

Tavaraliikenteen laskentatyökalun tulostaulukot sisältävät puolestaan seuraavat tiedot:

- liikennekäytössä olevat kuorma-autot käyttövoimittain ja kuorma-autoluokittain
- liikennesuorite käyttövoimittain ja kuorma-autoluokittain
- energiankulutus käyttövoimittain ja kuorma-autoluokittain (petajouleina sekä litroina, kilogrammoina tai kilowattitunteina)
- hiilidioksidipäästöt käyttövoimittain ja kuorma-autoluokittain
- kustannukset käyttövoimittain ja kuorma-autoluokittain (energiakustannukset, energiaverot, huoltokustannukset, käyttövoimaverot, arvonaleneman kustannukset)

Raportissa kuvatut hankkeessa kehitetyt laskentatyökalut ovat saatavissa asiasta kiinnostuneiden käyttöön. Voit pyytää työkalut käyttöösi täyttämällä lomakkeen osoitteessa:

<https://research.tuni.fi/verne/heetra/>

5 Menetelmäkehikon arviointi

Seuraavissa taulukoissa esitetään kehitettyjen laskentamenetelmien vertailu aiemmin esitettyihin suosituksiin. Menetelmiä arvioitiin myös sidosryhmätyöpajoissa, joiden tulokset on esitetty liitteessä 3. Luvussa 1 esiteltiin Suomen Ilmastopaneelin suositukset taakanjakosektorin päästövähennystoimenpiteiden arviointiin. Taulukossa 20 vertaillaan kehitettyjen menetelmäkehikon ratkaisuja näiden Ilmastopaneelin periaatteisiin:

Taulukko 20. Päästövähennystoimenpiteiden vaikutusten arvioinnin periaatteet ja menetelmäkehikon ratkaisut.

Periaatteet vaiheittain	Menetelmäkehikon ratkaisu
Päästöjen ennustaminen: Päästöjen perusuran ennustaminen on välttämätöntä. Perusura tarkoittaa kehitystä ilman uusia politiikkatoimenpiteitä	Henkilö- ja tavaraliikenteen laskentamalleissa toimenpiteiden vaikutuksia verrataan perusuraskenaarioihin, jotka on muodostettu ottaen huomioon tehdyt politiikkatoimenpiteet, kuten biopolttoaineiden jakelunelvoite, sekä aiemmat ennusteet esimerkiksi talous- ja väestökehityksestä sekä liikenteen suoritteista.
Sektorikohtaiset toimenpiteet: Tavoitteena on sektorikohtainen malli, joka tuottaa kokonaiskustannus- ja rajakustannusfunktiot päästövähennysten suhteen, kuitenkin vähintään toimenpiteiden €/t- kustannusvaikuttavuus. Kustannukset ilman veroja ja tukiaisia. Herkkyystarkastelut ovat tarpeen	Laskentamallit tuottavat toimenpiteiden kustannusvaikuttavuuden €/t-luvut ja näiden taustalta löytyvät henkilö- ja tavaraliikenteen avaintunnusluvut, jotka esitetään verot ja tuet eritellen. Mallit myös mahdollistavat herkkyystarkastelujen tekemisen laskennan lähtötietoja ja oletuksia, kuten joustoja muuttamalla.

Periaatteet vaiheittain	Menetelmäkehikon ratkaisu
Ohjauskeinojen arviointi: Hintaohjauksessa on tärkeää arvioida, kuinka toimijat reagoivat ohjauskeinoon. Ohjauskeinojen vaikutukset julkisen vallan budjettiin arvioidaan	Toimijoiden reagointi ohjauskeinoihin on toteutettu laskentamalleissa joustoilla, jotka perustuvat aiempaan tutkimukseen. Joustojen arvoihin tulee suhtautua kriittisesti, koska ne eivät perustu suomalaisiin tutkimuksiin, eikä tavaraliikenteen joustoista ole vielä olemassa tutkimusta, jossa sähkökuorma-autojen ristijoustoja dieselin hinnan suhteen olisi voitu tutkia. Julkisen sektorin välittömät budjettivaikutukset verojen ja investointien kautta ovat laskentamallissa mukana.
Toimien valinta: Edullisuus määrittyy ideaalitulanteessa rajakustannusrasituksen mukaan, tai €/t-tiedon mukaan. Toimenpiteiden tulee olla pitkän aikavälin (2050) päästövähennyspolun mukaisia	Laskentamallit tuottavat €/t-kustannusvaikuttavuusluvut, joiden perusteella päästövähennystoimia voidaan valita. Tavaraliikenteen malli ulottuu vuoteen 2050 saakka ja henkilöliikenteen mallia voidaan ensivaiheessa laajentaa vuoteen 2040 saakka nykyisestä 2030 ulottuvasta laskennasta.
Toimien riittävyys ja kokonaistaloudellisuus: Koko ohjelman kokonaistaloudelliset vaikutukset voidaan määrittää yleisen tasapainon mallilla, mutta tämä ei korvaa sektorikohtaisten kustannusten analyysiä	Laskentamallien tuottamia kustannus- ja suoritemuutoksia eri skenaarioissa voidaan mahdollisesti hyödyntää kokonaistaloudellisten vaikutusten arvionnissa lähtötietoina.
Sosiaalinen hyväksyttävyys: Sektorikohtaiset tarkastelut voivat tuottaa täsmällistä tietoa sosiaalisista voimavaroista eri sektoreilla	Henkilöliikenteen laskentamalli tuottaa tietoa toimenpiteiden vaikutuksista liikenteen kustannuksiin eri tuloluokissa ja aluejaoilla. Tämän tiedon pohjalta voidaan esimerkiksi toteuttaa haastatteluja tai kyselyjä, joissa sosiaalista hyväksyttävyyttä voidaan selvittää.

Semkin ym. (2019) korostivat avoimuuden lisäämistä toimenpiteiden vaikutusten arvioinnissa avaamalla lähtötiedot, oletukset ja laskentamenetelmä. edellisessä luvussa näitä on avattu ja seuraava taulukko 21 esittää vastaukset Semkinin ym. listaamiin avainkysymyksiin:

Taulukko 21. Päästövähennystoimenpiteiden vaikutusten arvioinnin avainkysymykset ja menetelmäkehikon ratkaisut.

Avainkysymykset osakokonaisuuksittain	Menetelmäkehikon ratkaisu
Toimenpidearvioinnin tavoite: Onko arvioinnin tavoitteena vertailla toimenpiteiden kustannustehokkuutta, arvioida toimenpiteestä aiheutuvia kustannuksia vai suunnitella ohjauskeinoa?	Laskentamallien tarkoituksena on vertailla toimenpiteiden kustannustehokkuutta ja arvioida toimenpiteestä aiheutuvia kustannuksia. Malleilla voi myös suunnitella ohjauskeinoa, esimerkiksi tarkastelemalla toimenpiteen vaikutuksia erilaisilla herkkyytstarkasteluilla.
Tarkastelujakso: Vertaillaanko päästövähennyksiä nykytasoon vai tiettyyn ajanhetkeen? Mikä on tarkastelun ajanjakso, esim. päästövähennyksiä vuonna 2030 vai kumulatiiviset päästövähennykset vuoteen 2030?	Laskentamallit tuottavat päästövähennykset sekä tiettyinä vuonna että kumulatiivisesti vuoteen 2030 (ja tavaraliikenteen osalta vuoteen 2050). Päästötasoja voidaan vertailla sekä nykytilanteeseen että perusurakehityksen mukaiseen tulevaisuuden vuosiin.
Perusura ja skenaariot: Miten muodostetaan perusura? Mitä oletuksia tehdään teknologian kehityksen ja maailmantalouden suhteen? Miten muodostetaan skenaario, jolla arvioidaan päästövähennyksiä perusuraa vasten?	Perusuraskenaarion muodostaminen ja laskentaoletukset on avattu edellä laskentamallien kuvauksessa. Skenaarioiden muodostamisen logiikkaa on kuvattu edellä laskentaesimerkeissä ja liitteenä olevissa laskentamallien ohjeissa. Käyttäjät voivat näiden ohjeiden avulla tehdä omia skenaarioitaan.
Laskenta- ja mallinnusmenetelmät: Valitaan soveltuva laskentamenetelmä toimenpiteiden, interaktioiden ja sektorin ominaispiirteet huomioon ottaen.	Laskentamallit ovat tulosta työryhmän tutkimusperinteestä yli vuosikymmenen ajalta ja oletukset perustuvat liikennesektorin tutkimuskirjallisuuteen..

Avainkysymykset osakokonaisuuksittain

Menetelmäkehikon ratkaisu

Ristikkäis- ja epäsuorat vaikutukset: Mitkä ovat keskeisimmät interaktiot toimenpiteiden ja sektoreiden välillä? Onko kompensatiovaikutuksia, aikavaikutuksia, polkuriippuvuuksia? Millä tavalla toimenpiteet vaikuttavat toisiinsa päästövähennys- ja kustannusnäkökulmista?

Laskentamallit keskittyvät liikennesektorin sisäisiin vaikutuksiin ja soveltuvat parhaiten yksittäisen toimenpiteen vaikutusten arviointiin. Useamman toimenpiteen yhteisvaikutusten arviointi on periaatteessa mahdollista, mutta tällöin näkemys yksittäisten toimenpiteiden kustannusvaikuttavuudesta hämärtyy. Polkuriippuvuus liikennesektorilla liittyy erityisesti autokannan uusiutumiseen, jonka mallintaminen on pohjana sekä henkilö- että tavaraliikenteen mallissa.

Kustannusnäkökulma: Millä tasolla kustannuksia arvioidaan? Arvioidaanko kustannusten kohdentumista yksilöille tai valtiolle? Millä korolla kustannuksia diskontataan?

Kustannuksia tarkastellaan liikennesektorin kokonaisuuden tasolla ja kohdentumista voidaan tarkastella henkilöliikenteessä alueittain ja tulotasoittain ja tavaraliikenteessä toimialoittain. Laskentamallit tuottavat kustannusten kohdentumisen yrityksille, kotitalouksille ja julkiselle sektorille. Diskonttokorko on oletuksena liikenteen hankearviointiohjeen mukaisesti 3,5 % ja sitä voidaan muuttaa.

Tulosten esittäminen: Millä tavalla tulokset esitetään? Käytetäänkö esim. MAC-käyriä?

Tulokset esitetään avainindikaattoreiden muutoksina ja tuloksena on toimenpiteen kustannusvaikuttavuus €/t arvona. MAC-käyrän muodostaminen ei suoraan ole laskentamalleilla mahdollista, vaan vaatii käyttäjältä eri toimenpiteiden kumulatiivisten vaikutusten vertailua.

Muiden hyötyjen tarkastelu: Tarkastellaanko muita hyötyjä, kuten pienhiukkaspäästöjä tai laajempia kansantaloudellisia vaikutuksia, kuten työllisyyttä?

Laskentamalleissa ei tällä hetkellä tarkastella muita hyötyjä tai laajempia kansantaloudellisia vaikutuksia. Terveydelle haitallisten lähipäästöjen tarkastelu on mahdollista, mikäli autokantaan voidaan tuottaa luotettavia arvioita päästökomponenttien yksikköpäästöjen kehityksestä CO₂-päästöjen tapaan.

6 Päätelmät ja suositukset

Hankkeen tarkoituksena oli tuottaa yleisesti käyttökelpoinen systemaattinen menetelmäkehikko ja suositukset siitä, millä kattavuudella ja miten liikenteen päästövähennystoimien taloudellisia vaikutuksia tulee arvioida kokonaisvaltaisesti ja toimien elinkaaren pituudelta. Hankkeen lopputuloksena syntyi liikennesektorin ilmastopoliittisten toimenpiteiden kustannusten ja kustannusvaikuttavuuden kokonaisvaltaiseen tarkasteluun soveltuvat henkilö- ja tavaraliikenteen laskentamallit ja ohjeet laskennan suorittamisesta ja toimenpiteiden vertailemisesta. Laskentamallien toimivuus on varmistettu soveltamalla niitä todellisten päästöjä vähentävien politiikkatoimien kustannusvaikutusten tarkasteluun. Ohjeistuksena tarkoituksena on mahdollistaa jatkossa valtionhallinnon itse tehtävät päästövähennystoimien taloudelliset tarkastelut. Laskentamallien tekninen toteutus taulukkolaskentatyökaluilla on toteutettu ottaen huomioon valtionhallinnon työkoneiden rajoitukset.

Tutkimuksen tuloksena voidaan vastata teemakuvauksessa esitettyihin tutkimuskysymyksiin:

1. Missä laajuudessa liikenteen ilmastopoliittisten toimenpiteiden kustannusvaikutusten tarkastelu tulisi tehdä ja miten tarkasteltavia vaikutuksia ja vaikutusten ilmenemistä tulisi rajata?

Tutkimuskirjallisuuden perusteella kustannustarkasteluja tehdään hyvin eri laajuisina. Toisaalta kirjallisuudesta ei löydy normatiivista pohdintaa siitä, minkä laajuinen analyysi olisi optimaalisin vaihtoehto. Sinällään tutkimusaihe on laaja, sillä tieliikennesektori on hyvin merkittävä kansantalouden osa. Tieliikennesektorin tuotanto saa myös aikaan useita ulkoisvaikutuksia. Hankeessa kehitetyt laskentamallit keskittyvät liikennesektorin sisäisiin vaikutuksiin ja soveltuvat parhaiten yksittäisen toimenpiteen vaikutusten arviointiin. Tarkasteltavat vaikutukset sisältävät ohjauskeinojen investointikustannukset, henkilöliikenteessä ohjauskeinon vaikutukset kulkutapajakaumaan, henkilöautojen käyttövoimavalintoihin, henkilöautojen liikennesuoritteeseen ja edelleen liikenteen verottomiin kustannuksiin ja verokertymiin verolajeittain. Tavaraliikenteen osalta laskentamalli sisältää ohjauskeinon vaikutukset kuljetusmuotojakaumaan, kuorma-autokuljetusten tyhjänä ajon määrään, keskikuormaan, liikennesuoritteeseen ja kuljetusten verottomiin kustannuksiin ja verokertymiin verolajeittain. Myös CO₂-päästövähennysten ulkoisvaikutus on

laskennassa hyötyeränä mukana. Muita ulkoisvaikutuksia ei laskennassa tällä hetkellä ole, mutta laskentamalleihin voidaan tuoda mukaan esimerkiksi terveyshyötyjen, eri päästö-
lajien yksikkökustannusten ja liikenneturvallisuuden muutosten laskentaa.

2. Miten toimenpiteiden toteuttamiskustannuksia tulee kohdentaa nimenomaan päästöjen vähentämisen kustannuksiksi toimenpiteen muihin mahdollisiin vaikutuksiin nähden?

Liikkumispalveluiden ja liikenneinfrastruktuurin kehittämiseen liittyy kasvihuonekaasupäästöjen vähentymisen lisäksi muutoksia hengitysilman laadussa, meluisuudessa, ruuhkautumisessa sekä liikenneonnettomuuksien määrissä. Kasvihuonekaasuleikkauksen eri toteutustavoilla on erilaisia vaikutuksia kyseisiin ulkoisvaikutuksiin. Laskentamallit tarkastelevat liikenteen kustannusten muutoksia, sisältäen mm. verottomat energiakustannukset, huoltokustannukset, ajoneuvojen poistokustannukset sekä energia- ja käyttövoimaverot. Kustannusten muutoksia tarkastellaan tilanteessa, jossa kokonaismatkustussuorite (hkm) tai -kuljetussuorite (tkm) eivät muutu perusskenaariosta. Ulkoiskustannuksia, kuten päästö- ja terveystaloudellisia tai -hyötyjä ei käsitellä. Poikkeuksena on CO₂-päästöjen yksikkökustannus, joka otetaan laskennassa huomioon hyötyeränä. Kotitaloudet ja yritykset siis ostavat markkinoilta tai tuottavat itse edelleen saman määrän liikennepalveluita, mutta laskentamalleilla voidaan tarkastella, miten näiden palvelujen toteuttamisen kustannukset muuttuvat, kun liikennesektoriin kohdistetaan jokin toimenpide, jonka tarkoituksena on vähentää CO₂-päästöjä.

Tarkasteltavaan toimenpiteeseen voi liittyä suora toteuttamiskustannus, kuten sähköautojen hankintatuki, joka syötetään laskentamalliin investointikustannuksena. Mikäli tarkasteltava toimenpide on laaja-alaisempi, kuten liikenneinfrastruktuurihanke, osa hankkeen kustannuksista voidaan kohdistaa laskentamalliin toimenpiteen investointikustannuksena harkinnanvaraisesti, ajatellen, että hanke toteuttaa osin päästövähennystavoitetta ja osin jotain muuta tavoitetta. Työkalu toimii kuitenkin valtakunnallisella tasolla, kun taas liikenneinfrastruktuurihankkeille leimallista on hyvin paikalliset vaikutukset ja toisaalta Suomessa liikenneinfrastruktuurin kuormitus on alhainen ja mahdollistaa kohtuulliset kulkutapasiirtymät ilman merkittäviä infrainvestointitarpeita. Laskenta-ajan loppupuolella suuria kulkutapasiirtymiä sisältävissä skenaarioissa on syytä arvioida investointitarpeita erillistarkasteluna ja nämä kustannukset voidaan ottaa mukaan laskentamallissa.

3. Tuleeko julkisia ja yksityisiä panostuksia sekä julkisia ja yksityisiä kustannusvaikutuksia käsitellä kokonaiskustannusten tarkasteluissa eri tavoin?

Julkisella panostuksella voidaan tarkoittaa joko julkisen vallan ohjauskeinojen käyttöä tai suoria investointeja päästöleikkauksiin. Ohjauskeinojen käyttö perustuu näkemykseen, jonka mukaan saastuminen on ulkoisvaikutus ja julkishaitake, joten yksityiset motiivit itsessään eivät saa aikaan yksityisiä panostuksia päästöleikkauksiin. Täten julkisen vallan panostus on ainoa keino saada liikkeelle yksityisiä panostuksia päästöjen vähennystoimiin. Yksittäisen autoilijan, kuljetusyrityksen ja julkisen vallan näkökulma on erilainen taloudellisen ohjauksen rahavirtojen suhteen. Siinä missä yksittäinen autoilija tai kuljetusyritys pitää veroa kustannuksena, niin yhteiskunnallinen laskelma pitää sitä tulonsiirtona. Ohjauskeinojen valinnalla voi siten olla vaikutusta myös sääntelyn oikeudenmukaisuuteen. Siten kokonaiskustannusten tarkastelussa on syytä erotella kotitalouksien, yritysten ja julkisen sektorin näkökulmat. Henkilöliikenteen työkalun laskenta tehdään kotitalouksien näkökulmasta ja kuorma-autoliikenteen laskenta kuljetusyritysten näkökulmasta, mutta molemmissa kustannuksissa erotellaan verot. Näin ollen työkalut mahdollistavat toimenpiteiden kustannusmuutosten kohdentumisen tarkastelun kotitalouksien, yritysten ja julkisen sektorin kesken.

4. Kuinka kustannusten tulevia vaihteluita ja siihen liittyvää epävarmuutta tulisi hallita kokonaiskustannusten laskennassa?

Päätöksenteon taustalla olevat mallinnukset sisältävät runsaasti epävarmuuksia. esimerkiksi vaihtoehtoisten käyttövoimainvestointien nykyarvoon vaikuttavat eri käyttövoimien hintojen epävarmat kehityspolut sekä diskonttokorkoon liittyvät epävarmuudet/-selvyydet. Tällöin tutkimuksissa voidaan turvautua herkkyysoanalyysiin, joilla testataan eksogeenisten arvojen muutosten vaikutuksia tuloksiin. Työkalut mahdollistavat kustannusten vaihteluun liittyvien epävarmuuksien hallinnan erilaisilla oletuksilla tehtävien skenaarioiden yksinkertaisella muodostamisella. Tulevaisuuden kustannusmuutokset diskontataan nykyhetkeen ja diskonttauskorkoa voidaan muuttaa vapaasti.

5. Minkälainen kustannusvaikutusten tarkastelun ja vertailemisen laskentateknisen toteutuksen tulee olla yleisperiaatteiltaan ja laskentasääntöinä?

Kustannusten laskentamenetelmä riippuu tarkastelun laajuudesta. Tutkimuskirjallisuus ei tarjoa yksiselitteistä suuruutta tarkastelun laajuudelle, joten se ei myöskään tarjoa yleisiä periaatteita kustannusten laskentaan. eri menetelmissä on omat etunsa ja rajoitteensa, sillä jokaisen menetelmän mallinnuksessa joudutaan tekemään erilaisia ja erilaajuisia oletuksia tutkimuksen kohteesta. Työkalu mahdollistaa sekä laaja-alaisten (esim. päästökauppa) että suppeiden (esim. hankintatuki) toimenpiteiden vaikutusten arvioinnin. Laaja-alaisten toimenpiteiden vaikutusten arviointi on usein ollut mekanistista liikennesuoritteiden hintajoustoihin perustuvaa laskentaa. Työkalu mahdollistaa myös tämän, mutta ohjaa käyttäjää pohtimaan, minkä vaikutusmekanismien kautta suoritemuutokset

liikennejärjestelmässä tapahtuvat, eli mitä tapoja toimijat käyttävät sopeutuessaan muuttuvaan toimintaympäristöön. Laskennassa käytettäviä joustoja voi muuttaa tai niillä lasketut muutokset voi korvata asiantuntija-arvioilla. Tämä mahdollistaa vaikutustarkastelut toimenpiteille, joille ei ole olemassa tutkimukseen pohjautuvia joustoja, kuten liikenteen digitalisaation mahdollistamille muutoksille.

6. Miten tulisi ottaa huomioon eri toimenpiteiden vaikutukset Suomen pidemmän aikavälin kilpailukykyyn ja talouskehityksen kestävyteen?

Tutkimuskirjallisuudessa tehdään käsitteellisen eron kansatalouden kilpailullisuuden ja toimialojen kilpailullisuuden välillä. Kansatalouden kilpailullisuuden käsitettä ei kuitenkaan pidetä kovinkaan merkityksellisenä. Toimialojen kilpailukykyä voidaan puolestaan tarkastella kahdesta näkökulmasta: Miten sääntely ja sen käyttämät ohjauskeinot vaikuttavat kilpailuun toimialan sisällä ja miten sääntely vaikuttaa kansainvälisillä markkinoilla toimivien yritysten kilpailukykyyn. esimerkiksi viimeaikainen tutkimus euroopan unionin päästö-lupakaupasta viittaa siihen, ettei sääntelyllä ole ollut vaikutusta säädeltyjen yritysten taloudelliseen asemaan, eikä sääntely ole saanut aikaan hiilivuotoa euroopan ulkopuolelle.

Koska ilmastopolitiikan tavoitteet ovat kunnianhimoisia, niin liikennesektorin rakenteessa tulee varmuudella tapahtumaan merkittäviä muutoksia. Lisäksi liikennesektori ei ole ainoa ilmastosääntelyn alainen sektori, vaan sääntely koskettaa lähestulkoon kaikkea kansantalouden toimintaa. Laskentamenetelmien näkökulmasta voidaan todeta, että yleisen tasapainon mallinnuksissa on mahdollista tutkia ilmastopolitiikan vaikutuksia sekä sektorien väliseen kehitykseen että talouden eri makromuuttujiin. Kuorma-autokuljetusten laskentamallin lähtötietona käytetään toimialojen arvonnäkökulmasta ja kuljetussuorite-ennustetta, jotka perustuvat kokonaistaloudellisiin tarkasteluihin, mutta työkalussa ei ole suoria takaisinkytkentöjä näihin. Mallien tuloksia voidaan mahdollisesti käyttää kokonaistaloudellisten mallien lähtötietona.

6.1 Laskentamallien jatkokehitys

Henkilöliikenteen laskentamallista on haluttu toteuttaa helposti kehitettävissä ja jaettavissa oleva versio, jonka vuoksi laskenta on toteutettu Microsoft excel -ohjelmiston päälle. Autokannan kehityksen laskenta vuosia eteenpäin pohja- ja vertailuskenaarioon on kuitenkin raskasta laskea. SALAMA-malli mahdollistaisi jo nykyisellään taustaskenaarioiden tuottamisen vuoteen 2040 asti, ja myös sitä on mahdollista päivittää tarvittaessa luomaan skenaarioita pidemmälle. 2030 on tällä hetkellä valittu tavoitevuodeksi myös siksi, että hankkeen aikana käytössä ollut HLT-aineisto oli rajoittunut vuoden 2016 versioon, eikä tuoreempi versio ollut saatavilla laskennan kehityksen kannalta tarpeeksi ajoissa. Tutkijaryhmä ei nähnyt hyödyllisenä, että vuoden 2016 aineistolla olisi pyritty rakentamaan

skenaarioita vuodesta 2030 eteenpäin, sillä kyseinen aineisto on varsin vanhaa. Jatkokehityksen kannalta laskentatyökalu olisi syytä päivittää paremmin laskentaoperaatioita tukevalle alustalle, jolloin sekä sen ajamisen nopeutta että aikajännettä olisi mahdollista kasvattaa. Samalla myös HLT-aineistojen osalta olisi mahdollista päivittää tuoreempi lähtödata. Mikäli työkalun siirtäisi paremmalle alustalle, voi laskenta-aluejausta laajentaa nykyisestään ja kaupunkiseututasoon ohella pyrkiä huomioimaan tarkemmin missä kaupungissa ja millaisilla alueilla matkat tapahtuvat, koska ylimääräisten matkarivien laskennasta ei tällöin syntyisi samanlaista vaikutusta laskennan nopeuteen. Tämä mahdollistaisi tietullimaksujen tai kilometriverotuksen rakentamisen malliin tarkalla tasolla. Samassa tilanteessa myös muut päästölajit kuin pelkkä CO₂ olisi mahdollista huomioida, ja päästöt voisi laskea myös tarkemmin alueitasolle, jolloin näiden terveysvaikutusten laskenta onnistuisi luotettavammin. Samalla mahdollistuisi myös joustojen huomiointi eri tavoin eri alueilla, eikä nykyisen kaltaisesti keskiarvotetusti koko maan tasolle. Samalla tämä mahdollistaisi myös laskemman pidemmälle aikajänteelle. Nykyisen, valitun työkalun rajallisuus on tiedostettu myös hankkeen aikana, mutta helposti jaettavan ja tietoturvallisen ratkaisun kehittämiseen tutkijaryhmä ei löytänyt hankkeen aikajänteelle paremmin sopivaa ratkaisua.

Tavaraliikenteen mallin osalta pohjalla oleva Tieliikenteen tavarankuljetustilaston aineisto on vuodelta 2018, mutta autokannan muutoksiin on otettu mukaan vuoden 2021 rekisteröinnit ja rautatie- ja vesikuljetusten osalta käytettyjen tietolähteiden tarkasteluvuodet vaihtelevat 2019–2021. Lähtötietojen perusvuoden yhtenäistäminen on selkeä mallin jatkokehityskohde. Toimialoittaisen analyysin mahdollistamiseksi lähtötietona olisi myös jatkossa syytä käyttää uudemman vuoden tietopohjaa, koska otospohjaisena tavarankuljetustilastossa on luontaisesti suurta vaihtelua vuosittain eri tavaralajien ja toimialojen kuljetusten määrässä. Kuorma-autojen poistuma autokannasta on mallinnettu käyttäen pohjatietona Tilastokeskukselta saatuja tietoja rekisteröinneistä ja käytettynä maahan-tuoduista kuorma-autoista 2008–2021 sekä vuoden 2021 lopun liikennekäytössä olevaa autokantaa rekisteröintivuosittain. Kuorma-autojen poistuma autokannasta perustuu siten erityisesti kevyiden kuorma-autojen osalta melko lyhyen aikavälin tietoihin kuorma-autojen elinkaaren pituuteen verrattuna.

Molempien mallien osalta oletetaan monien kustannuskomponenttien, kuten autojen hankintahintojen, energian hintojen ja eri kulku- ja kuljetusmuotojen kustannusten ja päästöjen, pysyvän vakiona tulevaisuudessa, mikä tuskin vastaa todellisuutta. Mallit kuitenkin mahdollistavat näiden kustannuskomponenttien muuttamisen uuden perusuran laatimiseksi. Molempien mallien käyttö vaatii käyttäjältä perehtymistä ja tarkkuutta, eikä taulukkolaskenta ole käyttäjäystävällisin käyttöliittymä. Taulukkolaskennan etuna on kuitenkin avoimuus ja muokattavuus. Perehtynyt käyttäjä voi muokata laskennassa käytännössä kaikkia lähtötietoja ja oletuksia, mikä mahdollistaa hyvin yksityiskohtaisten skenaarioiden muodostamisen. Aiemmin esitetyt hankintatukien laskentaesimerkit

ovat osoitus yksityiskohtaisesta analyysistä, joka on aiemmillä liikenteen päästövähennystoimenpiteiden arviointityökaluilla ollut vaikeaa. Laskentamallit myös toteuttavat kansainvälisessä ja kotimaisessa kirjallisuudessa esitetyt toimenpiteiden vaikutusten arvioinnin periaatteet. Hankkeessa kehitetyt työkalut ovat siten merkittävä kehitysaskel liikenteen päästövähennystoimenpiteiden kokonaisvaltaisessa taloudellisessa arvioinnissa.

Liitteet

Liite 1: Kustannuskäsitteitä

Tutkitaan lyhyesti erilaisia kustannuskäsitteitä yksinkertaisen (tyylitellyn) esimerkin avulla (katso myös Ollikainen ym. (2016), liite 3). Oletetaan, että polttomoottoriauto tarjoaa kuluttajalle verottoman nettohyödyn, jonka nykyarvo on B_b (euroa), ja että tämän kulkutavan verojen nykyarvo on T . Polttomoottorilla käyvän auton vaihtoehto on sähköauto, jonka tuoton nykyarvo kuluttajalle on B_e . Voimassa on tulos $B_b - T > B_e$, eli kuluttaja ei nykytilanteessa ole valmis vaihtamaan autoa, vaikka sähköauto olisi hänelle täysin veroton vaihtoehto.

Oletetaan seuraavaksi, että sääntelyinstrumenttien lukumäärää on mahdollista kasvattaa polttomoottoriauton ympäristöverolla t ja sähköauton tukipalkkiolla s (molemmat nykyarvoisia suureita). Voimme nyt esittää seuraavanlaisia tuloksia:

- Kuluttajan valitsee sähköauton, jos $B_e + s > B_b - T - t$, tai vaihtoehtoisesti kirjoitettuna, jos $B_e + s - (B_b - T - t) > 0$. Tekijä $B_b - T - t$ on sähköauton vaihtoehtoiskustannus.
- Kuluttajan valintaehto voidaan kirjoittaa myös muotoon $B_b - B_e > s + T + t$. Huomionarvoista on, että eri instrumenttien asettamisen peruste ei sinällään vaikuta ostopäätökseen, vaan ainoastaan näiden instrumenttien yhteenlaskettu suuruus $s + T + t$.
- Vero t voi perustua joko omistamiseen tai käyttöön. Jälkimmäisessä tapauksessa vero on tyypillisesti yksikkövero, joka on sidottu käytetyn polttoaineen määrään. Käyttöön perustuva verotus vaikuttaa sekä polttomoottoriautolla ajettuihin kilometreihin että käyttövoiman valintaan bensiinin ja sähkön välillä. Omistamiseen perustuva verotus vaikuttaa vain käyttövoiman valintaan.
- Tekijä $B_b - B_e > 0$ on päästöjen vähentämisen kustannus. Se mitataan kuluttajan nettohyödyn laskuna, jonka investointi uuteen vihreään kulkutapaan saa aikaan.
- Instrumenttien valinta veron ja tukipalkkion välillä vaikuttaa siihen, miten tieliikenteen maksut jakautuvat autoilijoiden ja veronmaksajien välillä. Ohjauskeino t siirtää rahaa autoilijoilta veronmaksajille ja s veronmaksajilta autoilijoille.

- Instrumenttien aikaansaamat rahakertymät eivät kuitenkaan ole yhteiskunnan näkökulmasta kustannuksia toisin kuin nettohyödyn väheneminen $B_b - B_e$ on.

Verot ja tukipalkkiot ovat siis yhteiskunnan näkökulmasta tulonsiirtoja ja päästövähennysten aikaansaamat reaaliset vaikutukset ovat kustannuksia. Huomionarvoista myös on, että valtio kerää saman määrän verotuloja sekä vero- että tukipalkkiojärjestelmässä. Verojärjestelmässä rahat kerätään autoilijoilta ja tukipalkkiojärjestelmässä kaikilta veronmaksajilta. Jos ilmastopolitiikassa toimitaan saastuttaja maksaa -periaatteen mukaisesti, niin ohjausjärjestelmäksi tulisi valita verotus.

Voimme laajentaa edeltävää tarkastelua kirjoittamalla verottoman nettohyödyn B ajoneuvohyödyn b ja ajoneuvokustannuksen c erotuksena, $B = b - c$. Tässä tapauksessa voimme kirjoittaa päästöjen vähentämisen kustannuksen $B_b - B_e$ muotoon $b_b - c_b - (b_e - c_e)$. erityisesti, jos autoilija ei koe eroja eri käyttövoimien ajoneuvohyötyjen välillä, niin $b_b = b_e$ ja vähennyskustannus on $c_e - c_b$.

Voimme olettaa, että ajoneuvokustannukset ovat yleisesti tunnettua informaatiota. Autoilijoiden ajoneuvohyödyt sen sijaan voidaan usein olettaa epäselviksi julkiselle valalle. Tällöin julkinen valta joutuu tekemään arvion hyötyjakaumasta käyttövoimien kesken. Julkinen valta voi esimerkiksi olettaa, että hyödyt ovat yhtä suuret käyttövoimien kesken, jolloin käyttövoima- ja vähennyskustannusennusteet perustuvat ajoneuvokustannuksen erotukseen $c_e - c_b$.

Liite 2: Tavarankuljetustilaston tavaralajien kohdistuminen toimialoille

Numero	Tavaralaji	Toimiala
1	viljat	muut kuljetukset
2	vihannekset, hedelmät	muut kuljetukset
3	elävät eläimet	elintarviketeollisuus
4	kukat, taimet, siemenet, jne.	muut kuljetukset
5	raaka maito	elintarviketeollisuus
6	tukki- ja kuitupuu	metsäteollisuus
7	energiapuu	metsäteollisuus
8	puru, hake	metsäteollisuus
9	mekaanisen metsäteollisuuden tuotteet	metsäteollisuus
10	paperimassa, selluloosa	metsäteollisuus
11	paperi, kartonki, painotuotteet	metsäteollisuus
12	juomat	elintarviketeollisuus
13	elintarviketeollisuuden tuotteet	elintarviketeollisuus
14	kuivat elintarvikkeet	elintarviketeollisuus
15	eläinten ruoat aj rehut	elintarviketeollisuus
16	hiili	muut kuljetukset
17	koksi, pelletiti	kemianteollisuus
18	polttoturve	muut kuljetukset
19	nestemäiset polttoaineet	kemianteollisuus
20	asfaltti	muut kuljetukset
21	metallimalmit	mineraalituotteiden valmistus
22	raakateräs, metallipuolivalmisteet	metallien ja metallituotteiden valmistus
23	sora, hiekka	muut kuljetukset
24	betoni, tiilet, rakennusmateriaalit	mineraalituotteiden valmistus
25	lannoitteet	kemianteollisuus
26	peruskemikaalit	kemianteollisuus
27	kemianteollisuuden tuotteet	kemianteollisuus

Numero	Tavaralaji	Toimiala
28	sähkölaitteet	koneiden ja laitteiden valmistus
29	autot	koneiden ja laitteiden valmistus
30	koneet	koneiden ja laitteiden valmistus
31	metallituotteet	metallien ja metallituotteiden valmistus
32	tekstiilit	muu teollisuus
33	lasi ja keramiikka	mineraalituotteiden valmistus
34	muovituotteet	kemianteollisuus
35	talousjätteet	muut kuljetukset
36	kierrätysmateriaalit	muut kuljetukset
37	kontit, joiden sisältö ei tiedossa	muut kuljetukset
38	pakkausmateriaalit	muut kuljetukset
39	muuttokuormat	muut kuljetukset
40	huonekalut	muu teollisuus
41	postilähettykset	muut kuljetukset
42	erityyppiset tavarat	muut kuljetukset
43	Muut tavarat	muut kuljetukset
44	tyhjänä ajo	tyhjä
45	kunnossapito	muut kuljetukset

Liite 3: Sidosryhmätyöpajan tuloksia

Menetelmäkehikon arvioimiseksi järjestettiin sidosryhmätyöpaja Helsingissä 1.2.2023. Työpajassa esiteltiin menetelmäkehikon oletuksia ja laskentaperiaatteita ja arvioitiin tulosten käyttökelpoisuutta ja oikeellisuutta. Näkemysten tulkinnessa on syytä ottaa huomioon, että menetelmäkehikot eivät olleet lopullisia työpajan ajankohtana. Seuraavaksi kuvataan työpajan keskeiset havainnot erikseen henkilöliikenteen - ja tavaraliikenteen laskentatyökalujen osalta.

Henkilöliikenne

Laskentaoletusten ja tavoiteltavan lopputuloksen pohdinta

Henkilöliikenteen laskentatyökalu koettiin yleisesti vaikeammin ymmärrettävämpänä kuin tavaraliikenteen työkalu. erityisesti nähtiin tarve yksilöidä lähtöoletukset samalla tavalla kuin tavaraliikenteen työkalussa. Todettiin kuitenkin, että lähtöaineistojen olisi tarpeen olla mahdollisimman ajantasaiset ja laadukkaat. Lisäksi henkilöliikennetutkimuksen tulosten käyttöä työkalun taustamateriaalina tulisi kuvata tarkemmin. Keskusteluissa todettiin, että vuoden 2016 henkilöliikennetutkimusta ei voi pitää nykytilanteessa enää edustavana, eikä uusi koronan liikkumiseen aiheuttamat vaikutukset sisältävä vuoden 2021 henkilöliikennetutkimuskaan ole todennäköisesti edustava, sillä koronan aiheuttamista muutoksista johtuen on tapahtunut suuria muutoksia liikkumisessa lyhyessä ajassa. Henkilöliikennetutkimuksen sijasta keskusteltiin myös mahdollisuudesta hyödyntää ajantasaisempaa teleoperaattorien aineistoa tehdyistä matkoista tai Tilastokeskuksen rekisteridataa yksilötason automatkoista. Vaihtoehtoisissa aineistoissa todettiin myös olevan puutteita tai rajoitteita hankkeessa soveltamisen kannalta.

Työkalulla saatuja tuloksia on tarkoitus käyttää politiikan tukena, joten tarkastelujen on oltava yksinkertaistettuja, vaikka yksityiskohtaisemmat tarkastelut olisivat myös kiinnostavia. Todettiin myös, että useat yksityiskohdat laskennassa eivät tuo lisäarvoa. esimerkiksi ei koettu tarvetta tarkastella sitä, että lopettaako jokin henkilö autoilun kokonaan henkilösuoritteiden laskiessa vai jakaantuu henkilösuoritteiden lasku tasaisesti auton käyttäjille. Pohdittiin myös, että voidaanko huomioida säästöt uusissa väylähankkeissa tai niiden tarpeettomuudessa, jos autojen suorite ei toimenpiteen myötä kasvakaan. esimerkiksi säästöt uuden moottoritien rakentamisen välttämiseksi voivat olla huomattavia. Todettiin myös, että tämä on vaikea asia huomioitavaksi, joten on perusteltua tarkastella vain suoria kustannuksia. Työkalua ei pitäisi keskustelujen mukaan käyttää yksittäisten liikenneinfrastruktuurihankkeiden vaikutusten tarkasteluun, mutta pidemmän aikavälin infrarahoituksen painopisteen muutosten tarkastelu olisi kiinnostavaa, esimerkiksi valtakunnallisen liikennejärjestelmäsuunnitelman vaikutusten tarkastelun osana.

Aluejako on perusteltua olla osana työkalua, sillä esimerkiksi asuinalueen asukkaiden tuloilla on vaikutusta siihen, minkälaisia autoja on mahdollista hankkia. Lisäksi todettiin, että uudet sähköautot korvaavat pääosin autoja, joilla ajetaan keskimääräistä suurempia suoritteita. Samoin autojen elinkaari on hyvin erilainen eri kotitalouksilla

Henkilöliikennetyökalussa käyttäytymisen muutoksen huomioiminen nähtiin tärkeänä asiana. Yksi esimerkki on dieselin hinnan korotuksen vaikutus päästöihin ja käyttäytymiseen. Työpajassa pohdittiin esimerkiksi, että näkyykö dieselin hinnan korotus sähköautojen oston ja joukkoliikenteen käytön lisääntymisessä.

Tulosten oikeellisuus ja käyttökelpoisuus

Henkilöliikenteen työkalun tuloksista todettiin, että tärkeintä on saada tulosten suuruusluokat ja tulokset suhteessa eri toimenpiteisiin oikein. Täsmällisen oikeaa tulosta ei pidetty yhtä tärkeänä. Päättäjän näkökulmasta on tärkeää tietää, miten paljon toimenpiteellä saadaan päästövähennystä ja millä hinnalla, joten €/t on tavoiteltava lopputulos, mutta tämän ohella on tärkeää esittää myös erikseen muutokset eri kustannuskomponenteissa ja kohdentuminen julkiseen talouteen ja eri kotitaloustyypeille. Toimenpiteiden vaikutusten vertailu esim. kuvan avulla mainittiin myös hyvänä tapana tulosten esittämiseksi.

Yksityiskohtaisempien asioiden osalta työkalun toivottiin näyttävän, miten hankintatuki näkyy ylimmissä tuloluokissa. Lisäksi todettiin, että hankintatuki realisoituu heti kilometrimuutoksia tarkasteltaessa. epäselvänä nähtiin, miten sähköautojen hankintatuki suhteutuu joukkoliikenteen lipun hinnanalennuksiin tai joukkoliikenteen palvelutason parantamiseen.

Autojen kokoluokan huomioimista toivottiin tarkastelussa. Todettiin kuitenkin, että tulokset voidaan esittää käyttövoimittain. Työpajassa pohdittiin myös sitä, että huomioidaanko tarkastelussa, että noin 30 % kotitalouksista ei omista autoa ollenkaan, kun työkalu kuitenkin rakentuu autojen ympärille.

Terveysvaikutusten huomiointia pidettiin tärkeänä asiana, sillä kävelyn ja pyöräilyn terveyshyödyt ovat suuria. Yksi mahdollisuus olisi HeAT-työkalun huomioiminen hankkeessa. Todettiin myös, että laajempi vaikutusten parempi huomioiminen olisi muutenkin toivottavaa, esimerkiksi aika- ja onnettomuuskustannusten ja muiden liikenneväylien hankearvioinnissa käytettävien hyöty- ja kustannuserien avulla. Terveysvaikutusten lisäksi saatavilla olisi aineistoa lähipäästöistä ja arvottamisessa voitaisiin käyttää liikenneinfrastruktuurihankkeissa käytettäviä yksikkökustannuksia.

Työpajassa herätti keskustelua kustannusten nimellinen ja reaalinen tarkastelu. esimerkiksi miten kustannukset alenevat, jos mitään ei tehdä. Lisäksi nousi esille, että tiedetäänkö ladattavien hybridien todellista polttoaineen kulutusta. Myös vaikutusten rajauksesta keskusteltiin, koska liikennesektorin toimenpiteet vaikuttavat esimerkiksi sähköautojen kotilatauksen kautta energiasektorin sähköverojen kertymään tai sähköauton käytön päästöt ovat liikennesektorilla nolla, mutta sähköntuotannon päästöt kasvavat. Rajausta liikennesektorin sisäiseen tarkasteluun päästöjen ja kustannusten osalta pidettiin perusteltuna.

Tavaraliikenne

Laskentaoletusten ja tavoiteltavan lopputuloksen pohdinta

Tavaraliikenteen laskentatyökalussa kuljetuskustannusten muutokset eivät vaikuta alustavassa työkalussa tuotantoon, mutta työpajassa kuitenkin arvioitiin, että kuljetuskustannusten muutosten pitäisi vaikuttaa, sillä todellisuudessa asia on näin. Kuljetusmuotojakauman muutosten vaikutusten laskennan pitäisi myös olla työkalulla mahdollista. Työpajassa myös todettiin työkalun taustalla olevan kuljetustilaston kattavuuspuutteet. Samalla kuitenkin muistutettiin, ettei parempaakaan aineistoa ole saatavilla. Rambollin tieliikenne-ennusteen todettiin ennustavan isoa kasvua henkilö- ja kuorma-autojen suoritteeseen, mutta ennusteet eivät yleensä vastaa toteutunutta tilannetta.

Kuorma-autojen käyttövoimajakaumasta todettiin, että VTT:n perusennuste vaikuttaa konservatiiviselta, esim. dieselin osuus vuonna 2050 vaikuttaa suurelta. Vaihtoehtoisten käyttövoimajakaumien pohjana voi hyödyntää esimerkiksi SKAL:n uutta ennustetta (SKAL 2023). ehdotettiin, että dieselin osuus voisi olla pienempi ja sähköön suurempi pienemmissä kuorma-autoluokissa vuonna 2050. Suuremmissa luokissa kehitystä on vaikeampi arvioida, mutta vedyn osuus voisi olla arvioiden mukaan suurempi, kun aihe on tällä hetkellä poliittisestikin tärkeä. Työpajassa myös huomautettiin, että pienille kuorma-autoille on mahdollisesti tulossa vuonna 2040 nollapäästötavoite, joka muuttaisi taulukon osuuksia huomattavasti.

Kuorma-autojen lähtöhintojen arvioitiin olevan liian korkeita vuodelle 2018. Taustamateriaalissa lähtövuodeksi on annettu vuosi 2018. Työpajassa kuitenkin todettiin, että hinnat saattaisivat olla lähellä nykyhetken (vuosi 2023) arvoja. Sähkökuorma-auton hinnasta huomautettiin, että sen pitäisi pienentyä vuoteen 2050 mennessä. Lisäksi todettiin, että hintaeroja eri käyttövoimien välillä voisi esittää nykyistä tarkemmalla tasolla. Vetykuorma-autoista todettiin, että niiden hinta on parhaimmillaan samalla tasolla kuin sähkökuorma-auton hinta, mutta aineistossa vetykuorma-auto on esitetty huomattavasti kalliimpana. Työpajassa myös huomautettiin, että hintojen lähtötaso voisi olla lähempänä nykyhetkeä. Arvonalenemat ja joustot arvioitiin oikeansuuntaisiksi.

Joustoista todettiin, että käytettyjen lähteiden merkitseminen selkeästi ja joustojen muutosmahdollisuus työkalussa ovat tärkeitä asioita huomioitavaksi. Vakiojouston oletus voi olla väärä, koska tasapainotila voi yritystoiminnassa muuttua nopeasti, kun keikahduspiste (tipping point) saavutetaan. Joustot voivat olla myös hyvin erilaisia eri toimialoilla.

Muuttuvien kustannusten bio-osuuksista todettiin, että kaasun bio-osuus on jo lähes 100 %, mutta taulukossa on esitetty luku 60 %. Näin ollen bio-osuutta kaasussa voisi kasvattaa. Polttoaineen hintojen arviointi nähtiin vaikeaksi, joten laskenta vuoteen 2050 saakka on erittäin epävarmaa. Biopolttoaineiden hinnat voivat olla hyvin korkeita vesi- ja lentoliikenteen tarpeiden vuoksi. Työpajassa kuitenkin todettiin, että voisi käyttää samoja hinta-arvioita kuin kansallisessa energia- ja ilmastostrategiassa, jotka perustuvat komission antamiin, kaikille eU-maille yhteisiin arvoihin. Kuorma-autojen elinkaareen ja vuosisuoritteisiin ei ollut lisättävää.

Liikenneinfrastruktuurin osalta keskustelu oli samanlaista kuin henkilöliikenteen osalta, eli yksittäisten väylähankkeiden tarkastelu työkalulla ei nähty mielekkääksi, mutta pidemmän aikavälin erilaisten rahoituspainotusten tarkastelu valtakunnallisen liikennejärjestelmäsuunnitelman ohessa olisi kiinnostavaa. Yksittäisenä vahvasti infraan vaikuttavana mahdollisuutena on tavaraliikenteessä sähköteiden rakentaminen, jonka vaikutusten arviointi olisi kiinnostavaa.

Tulosten oikeellisuus ja käyttökelpoisuus

Työpajassa todettiin, että tavaraliikenteen laskentatyökalun lähtöoletukset on kuvattu selkeästi. Tulosten tarkastelu suoritealoittain todettiin toimivaksi ratkaisuksi. Lisäksi esitettiin, että voisi myös arvioida erikseen pieniä ja suuria yrityksiä, sillä näiden välillä voi olla suuria eroja. Vuosi 2030 nähtiin sopivana laskenta-aikana, koska taakanjakoasetuksen velvoite kohdentuu tähän. Henkilöautojen osalta pidemmän aikavälin tarkastelu on perustellumpaa kuin kuorma-autoissa.

Työpajassa esitetyt esimerkkilaskelmat vaikuttivat pääosin loogisilta. Jakeluvaihtoehtojen korotuksesta todettiin, että aiemmin ei ole laskettu hinnannousun aiheuttamaa päästövähennystä, joten tätä työkalun ominaisuutta pidettiin hyvänä asian. eU:n tieliikenteen päästökauppa -esimerkistä todettiin, että tulos vaikuttaa melko kalliilta. Kuorma-autojen hankintatuki -esimerkistä todettiin lisäksi, että olisi kiinnostavaa tarkastella erikseen sähkö- ja kaasukuorma-autojen vaikutusta.

Kuten henkilöliikenteessä, €/t on tärkeä lopputulos, koska sillä voidaan laittaa toimenpiteet tärkeysjärjestykseen, mutta laskentaperiaatteiden tulee olla läpinäkyviä ja tulokset esittää kustannuskomponenteittain. On myös tehtävä ymmärrettäväksi, mitä kustannuskomponentit tarkoittavat.

Lähteet

Anable, J. 2008. The cost-effectiveness of carbon abatement in the transport sector. The Centre for Transport Policy, The Robert Gordon University and The UK energy Research Centre (UKERC). p. 63.

Andersson, A., Jääskeläinen, S., Saarinen, N., Mänttari, J., & Hokkanen, e. 2020. Fossiilitto-
man liikenteen tiekartta-työryhmän loppuraportti.

Autoalan tiedotuskeskus 2020. Autojen keskimääräinen vuosittainen arvonalenema.

Autoalan tiedotuskeskus 2022a. Valtion verotulot tieliikenteestä. https://www.aut.fi/tilastot/verotus_hintakehitys_ja_liikennemenot/valtion_verotulot_tieliikenteesta

Autoalan tiedotuskeskus 2022b. Autoalan käyttövoimaennusteet. https://www.aut.fi/files/2551/Kayttovoimaennusteet_17_02_2022.pdf

Autokalkulaattori. 2023. Suomen Ilmastopaneeli. Saatavissa: autokalkulaattori.fi

Axsen, J., Plötz, P. & Wolinetz, M. Crafting strong, integrated policy mixes for deep CO₂ mitigation in road transport. *Nat. Clim. Chang.* 10, 809–818. 2020. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0877-y>

BeIS (2021) Valuation of greenhouse gas emissions: for policy appraisal and evaluation, <https://www.gov.uk/government/publications/valuing-greenhouse-gas-emissions-in-policy-appraisal/valuation-of-greenhouse-gas-emissions-for-policy-appraisal-and-evaluation>

Bhardwaj, C., Axsen, J., Kern, F., & McCollum, D. 2020. Why have multiple climate policies for light-duty vehicles? Policy mix rationales, interactions and research gaps. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 135, 309–326. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.03.011>

Copenhagen economics. 2016. Modellanalys av svenska klimatmål. s. 54. Saatavilla: [copenhagen-economics-2016-modellanalyser-av-svenska-klimatmal.pdf](https://www.copenhagen-economics.com/copenhagen-economics-2016-modellanalyser-av-svenska-klimatmal.pdf) (copenhagen-economics.com)

- de Stasio, C., Fiorello, D., Fermi, F., Martino, A., Hitchcock, G., & Kollamthodi, S. (2016). On-line tool for the assessment of sustainable urban transport policies. *Transportation Research Procedia*, 14, 3189–3198. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.260>
- DeCC, UK. (2009). Carbon valuation in UK policy appraisal: a revised approach.
- Dechezleprêtre, A., D. Nachtigall and F. Venmans. 2018. The joint impact of the European Union emissions trading system on carbon emissions and economic performance, OECD economics Department Working Papers, No. 1515, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/4819b016-en>.
- Dewita, Y., Burke, M. & Yen B.T. 2020. The relationship between transport, housing and urban form: affordability of transport and housing in Indonesia Case Stud. Transport. Pol., 8 (1) (2020), pp. 252–262. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2019.01.004>
- Dixit, A. K., & Pindyck, R. S. 1994. Investment under uncertainty. Princeton university press.
- Dornoff, J., Tietge, U. & Mock, P. (2020). On the way to “real-world” CO2 values: The European passenger car market in its first year after introducing the WLTP, icct white paper, May 2020, The International Council on Clean Transport, 30 p.
- Dunkerley, F., Wardman, M., Rohr, C., & Fearnley, N. (2018). Bus fare and journey time elasticities and diversion factors for all modes: A rapid evidence assessment. RAND Corporation. <https://doi.org/10.7249/RR2367>
- eerola, e., Huhtala, A., Laukkanen, M., & Palanne, K. (2021). Ympäristöhaittojen hinnoittelu – katsaus ilmastotoimia koskevaan tutkimuskirjallisuuteen. VATT muistiot 64. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-274-279-7>
- erkkola, M., Fogelholm, M., Konttinen, H., Laamanen, J. P., Mäenpää, e., Nevalainen, J., Nikula H., Pirttilä J., Uusitalo L. & Saarijärvi, H. (2019). Ruokaympäristön osatekijät ja ohjauskeinot. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2019:51 <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-287-777-2>
- Fiorello, D., Fermi, F., Hitchcock, G., Clarke, D. 2016. Study on European Urban Transport Roadmaps 2030. Tool description and user guide. MOVE/C1/2013-188-2. s. 74. Saatavilla: http://urban-transport-roadmaps.eu/documents/Urban_roadmaps_user_guide_v2.1.pdf
- Fridstrøm, L., Østli, V. Direct and cross price elasticities of demand for gasoline, diesel, hybrid and battery electric cars: the case of Norway. *eur. Transp. Res. Rev.* 13, 3 (2021). <https://doi.org/10.1186/s12544-020-00454-2>

- eUR-Lex (2022). (Proposal for a directive of the European Parliament and of the Council, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/eN/TXT/?uri=CeLeX:52021PC0551>).
- Gao, J., Kovats, S., Vardoulakis, S., Wilkinson, P., Woodward, A., Li, J., Gu, S., Liu, X., Wu, H., Wang, J., Song, X., Zhai, Y., Zhao, J., Liu, Q. 2018. Public health co-benefits of greenhouse gas emissions reduction: A systematic review. *Science of The Total Environment*. 627, 388–402. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.193>.
- Givoni, M. 2014. Addressing transport policy challenges through policy-packaging. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 60, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2013.10.012>
- Granskog, A., Gulli, C., Melgin, T., Naucler, T., Speelman, e., Toivola, L., & Walter, D. (2018). Cost-efficient emission Reduction Pathway to 2030 for Finland – Opportunities in electrification and Beyond. *Sitra studies*, 140. <https://www.sitra.fi/en/publications/cost-efficient-emission-reduction-pathway-2030-finland/>
- Green Office (2022). Calculation basis for carbon footprint, Green Office, WWF Finland, Saatavissa: <https://www.ilmastolaskuri.fi/>
- Gynther, L. ym. 2012. Liikenteen päästökustannukset. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 23/2012. <https://www.doria.fi/handle/10024/121226>
- Hast, A., Ekholm, T., & Savolainen, I. 2011. Suomen kansallisten päästövähennystoimien epävarmuuksien ja riskien arviointi.
- Hokkanen, T. (2015). Ilmastopolitiikan vaikutukset Suomen kansantalouteen ja kilpailukykyyn – mitä arvioista voidaan oppia? Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 11/2015.
- Huang, S. K., Kuo, L., & Chou, K. L. 2016. The applicability of marginal abatement cost approach: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 127, 59–71. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.013>
- Justen, A., Fearnley, N., Givoni, M., & Macmillen, J. 2014i. A process for designing policy packaging: Ideals and realities. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 60, 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2013.10.016>

Justen, A., Schippl, J., Lenz, B., & Fleischer, T. 2014ii. Assessment of policies and detection of unintended effects: Guiding principles for the consideration of methods and tools in policy-packaging. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 60, 19–30. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2013.10.015>

Jääskeläinen, S. 2021. Fossiilittoman liikenteen tiekartta: Valtioneuvoston periaatepäätös kotimaan liikenteen kasvihuonepäästöjen vähentämisestä.

Kesicki, F. 2010. Marginal abatement cost curves for policy making – expert-based vs. model-derived curves. *energy Institute, University College London*, 1–8.

Kesicki, F., & Ekins, P. (2012). Marginal abatement cost curves: a call for caution. *Climate Policy*, 12(2), 219–236. <https://doi.org/10.1080/14693062.2011.582347>

Kok, R., Annema, J.A., van Wee, B. 2011. Cost-effectiveness of greenhouse gas mitigation in transport: A review of methodological approaches and their impact, *energy Policy*, Volume 39, Issue 12, 2011, Pages 7776–7793, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.09.023>.

Koljonen, T., Soimakallio, S., Asikainen, A., Lanki, T., Anttila, P., Hildén, M., ... & Tiittanen, P. (2017i). *energia- ja ilmastostrategian vaikutusarviot: Yhteenvetoraportti*. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-287-355-2>

Koljonen, T., Soimakallio, S., Ollikainen, M., Lanki, T., Asikainen, A., Ekholm, T., ... & Tiittanen, P. (2017ii). *Keskipitkän aikavälin ilmastopolitiikan suunnitelman vaikutusarviot*. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-287-439-9>

Liikenne- ja viestintäministeriö (2020) *Liikennejärjestelmän kehittämisen laajempien taloudellisten vaikutusten tarkastelukehikko. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 2020:5* <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-243-585-9>

Liimatainen, H., Nykänen, L., Rantala, T., Rehunen, A., Ristimäki, M., Strandell, A., ... & Ollikainen, M. (2015). *Tarve, tottumukset, tekniikka ja talous – ilmastonmuutoksen hillinnän toimenpiteet liikenteessä*.

Liimatainen, H., Viri, R., Haapamäki, R., & Tainio, M. (2016). *Liikennejärjestelmän ja -hankkeiden kokonaisvaltainen arviointi*. (Tampereen teknillinen yliopisto. Liikenteen tutkimuskeskus Verne. Tutkimusraportti; Vuosikerta 93). Tampereen teknillinen yliopisto. Liikenteen tutkimuskeskus Verne. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-15-4000-4>

Lindroos, T. J., Soimakallio, S., Savolainen, I., Monni, S., & Honkatukia, J. (2012). Arvioita uusiutuvan energian lisäämisen vaikutuksista Suomen kasviuonekaasupäästöihin ja kansantalouteen. <https://publications.vtt.fi/pdf/technology/2012/T11.pdf>

Liski, Matti – Nokso-Koivisto, Oskari – Nurmi, eero – Vehviläinen, Iivo 2019. Ael-raportti: Kohti hiiletöntä liikennettä – ehdotus mekanismiksi – Taloustieteellinen tarkastelu liikenteen päästövähennyskeinoista. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-60-8793-1>

Litman, T., 2013. Transportation Affordability: evaluation and Improvement Strategies. <http://www.vtpi.org/affordability.pdf>

Logistiikkaselvitys 2020. Turun yliopisto. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-249-601-0>

Lucas, K., Mattioli, G. Verlinghieri, e. & Guzman, A. 2016. Transport Poverty and Its Adverse Social Consequences. Transport. <https://doi.org/10.1680/jtran.15.00073>

LVM 2021. ALIISA 2019 WAM. Liikenne- ja viestintäministeriö, 28.4.2021, <https://valtioneuvosto.fi/hanke?tunnus=LVM050:00/2019>

LVM 2022. Tieliikenteen ja rakennusten, meriliikenteen sekä lentoliikenteen päästökaupasta alustava sopu EU:ssa. Tiedote 21.12.2022. <https://www.lvm.fi/-/tieliikenteen-ja-rakennusten-meriliikenteen-seka-lentoliikenteen-paastokaupasta-alustava-sopu-eu-ssa-1896289>

Metsäranta Heikki, Pekka Ilikkanen, Jukka Ristikartano, Petra Reimi (2020) Tie- ja rautatieliikenteen hankearvioinnin yksikköarvojen määrittäminen vuodelle 2018 Väyläviraston julkaisu 48/2020.

Moilanen, P. ym. 2021. Polttoaineen hintaskenaariot. Mallituloksia. Ramboll Finland Oy.

Naegele, H., & Zaklan, A. (2019). Does the eU eTS cause carbon leakage in european manufacturing?. Journal of environmental economics and Management, 93, 125–147. <https://doi.org/10.1016/j.jjeem.2018.11.004>

Nocera, S., Cavallaro, F. 2012. economic evaluation of Future Carbon Dioxide Impacts from Italian Highways. Procedia – Social and Behavioural Sciences. 54, 1360–1369. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.850>

Nocera, S., Cavallaro, F. 2014. A methodological framework for the economic evaluation of CO2 emissions from transport. Journal of Advanced Transportation. 48, 138–164. <https://doi.org/10.1002/atr.1249>.

Nocera S., Stefania Tonin, Federico Cavallaro, The economic impact of greenhouse gas abatement through a meta-analysis: Valuation, consequences and implications in terms of transport policy, *Transport Policy*, Volume 37, 2015, Pages 31–43, <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2014.10.004>

OeCD (2006) Cost-Benefit Analysis and the environment <https://doi.org/10.1787/9789264010055-en>

Ollikainen M., Järvelä M., Seppälä J., Syri S. & Lötjönen S. 2016. Keskipitkän aikavälin ilmastoto-ohjelma: menetelmäkehikko ja tietotarpeen arviointi

Palanne, K., ja A. Sahari. 2021. "Henkilöautoliikenteen CO₂-päästöt ja päästöjen vero-ohjaus". VATT Muistiot 63. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-274-277-3>

Palomäki, J.-M. 2013. Kuljetuskustannusten laskentasovellus. Opinnäytetyö, logistiikan koulutusohjelma, Jyväskylän Ammattikorkeakoulu.

Parry, I., & Small, K. A. 2015. IMPLICATIONS OF CARBON TAXES FOR TRANSPORTATION POLICIES. Implementing a US Carbon Tax: Challenges and Debates, 211.

Peltola Aki, Taavi Dettenborn, Heidi Kotiranta, Justus Viita-aho, Noora eklöf (2022b) Päästölaskennan mahdollisuudet Ihku-laskentapalvelussa. Väyläviraston julkaisuja 60/2022. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-317-999-8>

Pihlatie, M., Paakkinen, M., Laurikko, J., Laurikkala, M., Ylén, P., Peltola, V., & Pylsy, P. (2019). Sähkö- ja kaasuautojen kustannustehokkaat edistämiskeinot-GASeLLI loppuraportti. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-287-631-7>

Ramjerdi, F., & Fearnley, N. 2014. Risk and irreversibility of transport interventions. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 60, 31–39. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2013.10.014>

Rodrigue, J.-P. 2022. The geography of transport systems. <https://transportgeography.org/>

Rogge, K. S., & Reichardt, K. 2016. Policy mixes for sustainability transitions: An extended concept and framework for analysis. *Research Policy*, 45(8), 1620–1635.

Savikko, H. ym. 2021. Polttoaineen hinnannousun yritysvaikutukset. Valtioneuvoston selvityksiä 2021:5.

- Schroten, A. et al., 2022, Research for TRAN Committee – Pricing instruments on transport emissions, European Parliament, Policy Department for Structural and Cohesion Policies, Brussels. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2022/699641/IPOL_STU\(2022\)699641_eN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2022/699641/IPOL_STU(2022)699641_eN.pdf)
- Seppänen Anni, Ahlvik Lasse, Weaver Sally, Ollikainen Markku (2022). Tieliikenteen kansallisen päästökaupan toteuttaminen ja vaikutukset. Suomen ilmastopaneeli Raportti 4/2022
- Semkin, N., Lyyra, S., Kauko, M., Tontti, M., Rantanen, N., Nousiainen, A., ... & Patronen, J. 2019. Päästövähennystoimenpiteiden kustannustehokkuuden arviointi. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-287-802-1>
- Sipilä, e., Kiuru, H., Jokinen, J., Saarela, J., Tamminen, S., Laukkanen, M., & Palonen, P. (2018). Biopolttoaineiden kustannustehokkaat toteutuspolut vuoteen 2030. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-287-614-0>
- Sipilä, e., Poikolainen, H., Lilja, A., Rautio, T., & Nylund, N.-O. (2021). Liikenteen jakeluvolvetason nosto – uusiutuvien polttoaineiden riittävyys ja vaikutusarvioinnit.
- SKAL 2023. Millä energialla kuljetamme? Raskaan liikenteen käyttövoimasiirtymän tilannekuva. Suomen kuljetus ja logistiikka SKAL ry. https://skal.fi/wp-content/uploads/2023/01/skal_kayttovoimasiirtyma_raportti_20230110.pdf
- Steinsland, C., Fridstrøm, L., Madslie, A., Minken, H. 2018. The climate, economic and equity effects of fuel tax, road toll and commuter tax credit. *Transport Policy*, 72, 225–241. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.04.019>.
- Stern, N., & Stern, N. H. 2007. *The economics of climate change: the Stern review*. Cambridge University Press.
- Särkijärvi, J., Jääskeläinen, S., & Lohko-Soner, K. (2018). Toimenpideohjelma hiilettömään liikenteeseen 2045: Liikenteen ilmastopolitiikan työryhmän loppuraportti. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-243-559-0>
- Sørensen, C. H., Isaksson, K., Macmillan, J., Åkerman, J., & Kressler, F. 2014. Strategies to manage barriers in policy formation and implementation of road pricing packages. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 60, 40–52. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2013.10.013>

Tamminen, S., Nylund, N. O., Sipilä, K., Laurikko, J., Sipilä, e., Mäkelä, K., ... & Honkatukia, J. (2015). Tieliikenteen 40 %: n hiilidioksidipäästöjen vähentäminen vuoteen 2030: Käyttövoimavaihtoehdot ja niiden kansantaloudelliset vaikutukset (VTT).

Tervonen, J., & Metsäranta, H. (2003). Verojen käsittely vaikutusarvioinnissa ja yksikköarvoissa: S13 Vaikutusten hallinnan tutkimus (VAHA). Tiehallinto.

Tilastokeskus 2016. Kotitalouksien kulutus [verkojulkaisu]. ISSN=1798-3533. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 25.5.2022]. <http://www.stat.fi/til/ktutk/>

Tilastokeskus 2022a. Julkisen liikenteen suoritetilasto 2019. https://trafi2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/TraFi/TraFi__Julkisen_liikenteen_suoritetilasto/?tablelist=true

Tilastokeskus 2022b. Liikenne ja matkailu -tilastot. <https://stat.fi/aihe/liikenne-ja-matkailu>

Tilastokeskus 2022c10. Kuorma-autoliikenteen kustannusindeksi 2020=100. Menetelmäseloste, helmikuu 2022. https://www.stat.fi/static/media/uploads/tup/kustannusindeksit/kuormuri_menetelmaseloste_2020_100.pdf

Tiznado-Aitken, I., Lucas, K., Munoz, J.C. & Hurtubia, R. 2022. Freedom of choice? Social and spatial disparities on combined housing and transport affordability. *Transport Policy* 122 (2022) 39–53. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2022.04.005>

Traficom 2021a. Hankintatukimalli – sähkökäyttöiset kuorma-autot. Muistio 28.9.2021. https://api.hankeikkuna.fi/asiakirjat/10ef5a33-0694-4c3e-8e07-eb8f1d29136e/98a1f6ac-9301-4dc9-a7ba-6b47be8b29fc/LIITe_20211007140945.pdf

Traficom 2021b. Hankintatukimalli – kaasukäyttöiset kuorma-autot. Muistio 28.9.2021. https://api.hankeikkuna.fi/asiakirjat/10ef5a33-0694-4c3e-8e07-eb8f1d29136e/f0714b10-37a5-421c-8df5-ce87f84eb534/LIITe_20211007140835.pdf

Traficom 2022a. Katuverkko ja kaupunkiraideliikenne. <https://tieto.traficom.fi/fi/tilastot/katuverkko-ja-kaupunkiraideliikenne>

Traficom 2022b. Tieliikenteen onnettomuuskustannukset. <https://tieto.traficom.fi/fi/tilastot/tieliikenteen-onnettomuuskustannukset>

Tuominen, A., Tervonen, J., Järvi, T., Mäkelä, K., Liimatainen, H., Nykänen, L., & Rehunen, A. (2015). Liikenteen energiatehokkuustoimenpiteet osana eU: n 2030 ilmasto- ja energiatavoitteiden saavuttamista: vaikutukset, kustannukset ja työnjako. http://vnk.fi/documents/10616/1456483/VNK+TeAS+14_2015.pdf

Valtioneuvosto 2022. Hankeikkuna: Fossiilittoman liikenteen tiekartta. <https://valtioneuvosto.fi/hanke?tunnus=LVM050:00/2019>

Valtioneuvosto (2022) Tieliikenteen ja rakennusten, meriliikenteen sekä lentoliikenteen päästökaupasta alustava sopu eU:ssa. Valtioneuvoston tiedote 21.12.2022. <https://valtioneuvosto.fi/-/tieliikenteen-ja-rakennusten-meriliikenteen-seka-lentoliikenteen-paastokaupasta-alustava-sopu-eu-ssa>.

Valtiovarainministeriö 2021. Liikenteen verotuksen uudistamista selvittävän työryhmän loppuraportti. Valtiovarainministeriön julkaisuja 2021:26. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-367-521-6>

Venmans, F., Ellis, J., & Nachtigall, D. (2020). Carbon pricing and competitiveness: are they at odds?. *Climate Policy*, 20(9), 1070–1091. <https://doi.org/10.1080/14693062.2020.1805291>

Vero. 2023a. Nestemäisten polttoaineiden verotaulukot. Saatavissa: <https://www.vero.fi/yritykset-ja-yhteisot/verot-ja-maksut/valmisteverotus/nestemaiset-polttoaineet/verotaulukot/>

Vero. 2023b. Sähkön, maakaasun, biokaasun, polttoturpeen, kivihiilen ja mäntyöljyn verotaulukot. Saatavissa: <https://www.vero.fi/yritykset-ja-yhteisot/verot-ja-maksut/valmisteverotus/sahkovero/verotaulukot/>

VM 2021b. Verotuet 2020–2022. <https://vm.fi/documents/10623/15806635/Verotuet+2020-2022.pdf/96a111dd-420e-bc8a-66fc-a8aa7991a31e/Verotuet+2020-2022.pdf?t=1632736878708>

VLJS 2021. Valtakunnallinen liikennejärjestelmäsuunnitelma 2021–2032.

VTT 2021. Kaupallisten ajoneuvojen rooli liikenteen ilmastopolitiikassa. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2021:34.

Väylävirasto 2020a. Liikenneväylien hankearvioinnin yleisohje. Väyläviraston ohjeita 36/2020.

Väylävirasto 2020a. Tie- ja rautatieliikenteen hankearviointien yksikköarvojen määrittäminen vuodelle 2018. Väyläviraston julkaisuja 48/2020.

Väylävirasto 2020b. Liikenneväylien hankearvioinnin yleisohje. Väyläviraston ohjeita 36/2020.

Väylävirasto 2022a. Vaikutusten arviointi valtion väyläverkon investointi- ja suunnitteluohjelman laadinnassa. Väyläviraston julkaisuja 59/2022. <https://www.doria.fi/handle/10024/185914>

Väylävirasto 2022b) Tie- ja rautatieliikenteen hankearvioinnin yksikköarvot 2018. Väyläviraston ohjeita 40/2020.

Wardman, M. (2022). Meta-analysis of price elasticities of travel demand in great britain: Update and extension. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 158(January 2022), 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2022.01.020>

Yue, X., Pye, S., DeCarolus, J., Li, F. G., Rogan, F., & Gallachóir, B. Ó. 2018. A review of approaches to uncertainty assessment in energy system optimization models. *energy strategy reviews*, 21, 204–217. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.06.003>

Yue, X., Deane, J. P., O’Gallachoir, B., & Rogan, F. 2020. Identifying decarbonisation opportunities using marginal abatement cost curves and energy system scenario ensembles. *Applied energy*, 276, 115456. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115456>.

Ympäristöministeriö 2017. Valtioneuvoston selonteko keskipitkän aikavälin ilmastopolitiikan suunnitelmasta vuoteen 2030 – Kohti ilmastoviisasta arkea <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-11-4748-7>

Ympäristöministeriö 2022. Keskipitkän aikavälin ilmastopolitiikan suunnitelma <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-361-262-4>

Zhang, Runsen, and Shinichiro Fujimori. “The role of transport electrification in global climate change mitigation scenarios.” *Environmental Research Letters* 15.3 (2020): 034019. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6658>.

tietokayttoon.fi

ISBN PDF 978-952-383-200-8

ISSN PDF 2342-6799