

Tieliikenteen eri käyttövoimien ja polttoaineiden lähipäästöt

Vaihe 1. Kirjallisuuskatsaus

Mikko Hoppo, Jari Hosiokangas, Toni Keskitalo, Jukka Räsänen

Julkaisun nimi

Tieliikenteen eri käyttövoimien ja polttoaineiden lähipäästöt

Vaihe 1. Kirjallisuuskatsaus

Tekijät

Mikko Happo, Jari Hosiokangas, Toni Keskitalo, Jukka Räsänen

Toimeksiantaja ja asettamispäivämäärä

Liikenne- ja viestintävirasto Traficom, 27.5.2019

Julkaisusarjan nimi ja numero

**Traficomin tutkimuksia ja selvityksiä
12/2020**

ISSN(verkkojulkaisu) 2669-8781

ISBN(verkkojulkaisu) 978-952-311-503-3

Asiasanat

liikenne, ilmansaasteet, käyttövoimat, uusiutuvat polttoaineet, terveyshaitta, typen oksidit, pienhiukkaset, katupöly, melu, kulkutapasiirtymä, mikromuovit

Tiivistelmä

Tieliikenteen käyttövoimat ja polttoaineet ovat nopeasti muuttumassa, koska lisääntynyt tieto ilmastomuutokseen johtavista syistä ja päästöistä aiheutuvista terveyshaitoista lisää painetta säädösten tiukentamiseksi. Tämän myötä myös henkilöautojen päästöjä pyritään vähentämään, etenkin taajamissa, mutta myös muilla liikennöidyillä väylillä. Uusien käyttövoimien ja polttoaineiden päästöjä ja niiden haitallisuutta esimerkiksi ihmisten terveydelle ei toistaiseksi tunneta vielä kovin hyvin. Tässä työssä selvitetään saatavilla olevan tieteellisen tutkimustiedon avulla, miten päästöjen määrä ja koostumus tulevaisuudessa mahdollisesti muuttuisivat erilaisissa liikennettä koskevissa skenaarioissa.

Liikenne- ja viestintävirasto Traficom tilaamassa tutkimuksessa Ramboll selvitti liikenteen päästöjen määrän ja koostumuksen muuttumista erilaisissa tulevaisuuden skenaarioissa. Lähteinä käytettiin vertaisarvioitua tieteellistä kirjallisuutta niiden päästölähteiden osalta, joilta sitä oli riittävästi saatavilla. Tarkastelun kohteena olivat etenkin henkilöautoliikenteen aiheuttamat hiukkasten ja typen oksidien lähipäästöt sekä käyttövoimasiirtymien mahdollisesti aiheuttamat muutokset melulle altistumiseen. Tarkasteltaviksi skenaarioiksi valittiin VTT:n LIPASTO-laskentamallin tilanne vuonna 2030 sekä LVM:n asettaman liikenteen ilmastopolitiikan työryhmän toimenpideohjelman ehdotuksessa hiilettömään liikenteeseen 2045 esittämä välitavoite vuodelle 2030. Laskelmat rajoittuivat vain henkilöautoihin, ja tulokset laskettiin käyttäen keskimääräistä vuosisuoritetta eli 17 000 km vuodessa.

Selvityksessä kävi ilmi, että hiukkasten lähipäästöistä suurin osa muodostuu jarrujen, renkaiden ja tienpinnan kulumisesta. Pakokaasun hiukkasten (massan) osuus kokonaispäästöstä on noin kuudesosa, mikä on likimain yhtä paljon kuin jarrujen kulumisen osuus jäljelle jäävän osan muodostuessa renkaiden ja tienpinnan kulumisesta. Tulevaisuudessa autokannan uudistumisen ja uusien käyttövoimien yleistymisen vuoksi pakokaasun tuottaman hiukkaspäästön osuus kokonaispäästöstä pienenee, mutta muilla tavoilla syntyvät lähipäästöt eivät muutu suuresti.

VTT:n LIPASTO-mallin vuoden 2030 tilanteeseen perustuvassa skenaariossa hiukkasten laskennallinen kokonaisvuosipäästö kasvaa nykytilanteeseen (kokonaispäästö 1 980 t/a) verrattuna 61 t/a (3 %), pakokaasupäästö pienenee 51 t/a (19 %), jarrujen kulumisen päästö kasvaa 11 t/a (5 %), renkaiden kulumisen päästö kasvaa 50 t/a (7 %) ja tienpinnan kulumisen hiukkaspäästö 51 t/a (7 %). Nykytilanteesta liikenteen

ilmastopolitiikan työryhmän toimenpideohjelman maahdotuksen välitavoitteeseen 2030 verrattuna hiukkasten kokonaisvuosipäästö pienenee 130 t/a (6 %), pakokaasupäästö pienenee 110 t/a (51 %), jarrujen kulumisen päästö pienenee 31 t/a (13 %), renkaiden kulumisen päästö kasvaa 16 t/a (2 %) ja tienpinnan kulumisen aiheuttama hiukkaspäästö pysyy ennallaan. Typen oksidien laskettu päästö vähenee nykytilanteesta (kokonaispäästö 12 100 t/a) VTT:n LIPASTO-mallin vuoden 2030 tilanteeseen 6 580 t/a (54 %) ja liikenteen ilmastopolitiikan työryhmän toimenpideohjelman maahdotuksen välitavoitteeseen 2030 verrattuna 8 450 t/a (70 %).

Tulosten perusteella voidaan todeta, että tällä hetkellä dieselautot tuottavat selvästi enemmän typen oksidien päästöjä kuin bensiiniautot. Dieselautojen kohdalla päästöt vähenevät siirryttäessä uusien normien mukaisiin henkilöautoihin.

Uudet Euro 6 -dieselautot tuottavat hyvin vähän typen oksideja myös viileissä oloissa. Nyt liikennekäytössä olevien dieselautojen typen oksidien päästöt ovat todellisessa ajo-tilanteessa suurempia kuin niiden tyyppihyväksyntä edellyttää. Bensiiniautot tuottavat typen oksideja murto-osan dieselautojen tuottamasta määrästä, mutta uusien teknologioiden vaikutus päästöihin ei ole toistaiseksi tiedossa. Uusien käyttövoimien (kaasu, flexifuel) pakokaasupäästöjen arvioidaan uusissa autoissa olevan pienempiä verrattuna fossiilisilla polttoaineilla toimiviin henkilöautoihin.

Muiden kuin pakokaasuperäisten hiukkaspäästöjen vähentämiskeinot eivät kokonaisuutena tulleet ilmi selvityksessä. Kuitenkin jarrupölyä arvioidaan syntyvän vähemmän, jos regeneratiivista jarrutusta käyttävät sähköautot korvaavat perinteisiä autoja. Renkaiden ja tienpinnan kulumisesta muodostuvien hiukkasten käyttökelpoisia vähentämiskeinoja ei tunneta.

Sähköautojen (ja ladattavien hybridien) osuuden merkittävä kasvu voi alentaa melutasoa erityisesti taajamissa, joissa ajetaan pienillä, alle 50 km/h nopeuksilla. Tätä suuremmilla nopeuksilla rengasmelu muodostaa suuren osan henkilöautojen kokonaismelusta, jolloin sähköautojen melu on likipitään samansuuruista polttomoottoriautojen kanssa. Siirtyminen sähkökäyttöisiin henkilöautoihin alentaa melua erityisesti tie- ja katuosuuksilla, joilla raskaan liikenteen osuus on vähäinen.

Kulutusasiirtymien (henkilöautoista joukkoliikennevälineisiin, pyöräilyyn ja jalankulkuun) osalta melun väheneminen liittyy autoliikenteen määrän vähenemiseen, jos henkilöautojen määrää ja siten kokonaisliikennemäärää saadaan pienennettyä. Vaikutusta syntyy erityisesti siellä, missä bussiliikenteen osuus kokonaisliikenteestä on suuri, jos myös paikallisliikenteen bussit saadaan sähköistettyä.

Akkuteknologian, latausverkoston ja latausnopeuden kehittyessä sähköautojen sekä ladattavien hybridien osuus voi kasvaa nopeammin kuin ennusteissa on arvioitu. Tällöin pakokaasupäästöt ja melu sekä jarrujen hiukkaspäästöt pienenisivät taajamissa, joissa suurin määrä ihmisiä altistuu lähipäästöille.

Yhteyshenkilö Outi Ampuja	Raportin kieli Suomi	Luottamuksellisuus Julkinen	Kokonaissivumäärä 53
Jakaja	Kustantaja Liikenne- ja viestintävirasto Traficom		

Publikation

Lokala utsläpp från olika drivkrafter och bränslen i vägtrafik

Fas 1. Litteraturöversikt

Författare

Mikko Hoppo, Jari Hosiokangas, Toni Keskitalo, Jukka Räsänen

Tillsatt av och datum

Transport- och kommunikationsverket, 27.5.2019

Publikationsseriens namn och nummer

Traficoms forskningsrapporter och utredningar 12/2020

ISSN (webbpublikation) 2669-8781

ISBN (webbpublikation) 978-952-311-503-3

Ämnesord

trafik, luftföroreningar, drivmedel, förnybara bränslen, hälsorisk, kväveoxidutsläpp, småpartiklar, gatudamm, buller, förändring i färd sätt, mikroplaster

Sammandrag

Fordonstrafikens drivmedel och bränslen förändras snabbt eftersom ökad kunskap om orsakerna till klimatförändringen och om utsläppens hälsorisker ökar trycket på att skärpa reglerna. Syftet är också att reducera utsläpp från personbilar, speciellt inom tätorter, men också på andra trafikleder. Utsläppen från nya drivmedel och bränslen samt deras inverkan på t.ex. människors hälsa är fortfarande inte välkända. I denna utredning undersöktes på basen av tillgänglig vetenskaplig forskning hur utsläppens mängd och sammansättning kan komma att ändras i framtiden enligt olika scenarier för trafik och.

På uppdrag av transport- och kommunikationsverket Traficom undersökte Ramboll hur mängden utsläpp från trafiken förändras i olika framtidsscenarion. Som utgångsdata användes kvalitetsgranskad vetenskaplig litteratur för de utsläppskällorna var tillräckligt med vetenskaplig litteratur fanns tillgänglig. Fokus var främst på partikel- och kväveoxidutsläpp från personbilstrafiken samt bullerkonsekvenser från förändringen av drivmedel bland personbilar. Trafikscenariot för år 2030 enligt VTT:s beräkningsmodell samt det delmål för år 2030 som redovisats av kommunikationsministeriet (åtgärdsprogram för kolfri trafik 2045) valdes som utgångspunkt. Beräkningarna begränsas till personbilar och resultaten räknades på basen av en genomsnittlig årsprestation på 17 000 km per år.

På basen av utredningen orsakas största delen av partikelemissionerna till näromgivningen av slitage av bromsar, däck och vägytor. Partiklarna i avgaserna utgör cirka en sjättedel av de totala partikelemissionernas massa, vilket är ungefär lika mycket som från slitage av bromsar. Den resterande delen av partikelemissionerna uppstår från slitage av däck och vägytor. I framtiden kommer partikelemissionernas andel av de totala utsläppen att minska då bilparken förnyas och nya drivmedel blir vanligare. Avgaserna från de nya drivmedlen orsakar mindre partikelemissioner men partikelemissioner som uppkommer från andra källor kommer inte påverkas särskilt mycket.

Jämfört med nuläget (totala årsemissioner 1 980 t/a) beräknas de totala partikelemissionerna enligt VTT:s scenario för år 2030 öka med 61 t/a (3 %), avgasutsläppen minska med 51 t/a (19 %), emissioner från bromsar öka med 11 t/a (5 %), emissioner från däck öka med 50 t/a (7 %) och emissioner från slitage vägytor öka med 51 t/a (7 %). I jämförelse med nuläget och kommunikationsministeriets delmål för år 2030, minskar de totala partikelemissionerna med 130 t/a (6 %), avgasutsläppen minskar 110 t/a (51 %), emissioner från slitage av bromsar minskar 31 t/a (13 %), emissioner

från slitage av däck ökar 16 t/a (2 %) och emissioner från slitage av vägytor förblir på samma nivå. De beräknade utsläppen av kväveoxider kommer att minska från den nuvarande situationen (totala utsläpp 12 100 t/a) med 6 580 t/a (54 %) enligt VTT:s LIPASTO-modell för år 2030 och med 8 450 t/a (70 %) enligt kommunikationsministeriets förslag till delmål 2030.

På basen av utredningens resultat kan konstateras, att dieselfordonen orsakar betydligt mer kvävedioxidutsläpp än bensindrivna fordon i nuläget. För dieselfordonen reduceras utsläppen till följd av övergången till personbilar som uppfyller de nya normerna. De nya Euro 6 – dieselmotorerna ger upphov till ytterst lite kväveoxidutsläpp, även i kalla väderförhållanden. Kväveoxidutsläpp från dieselfordonen som i nuläget används är i verkligheten större än vad som krävs i typgodkännandekrav. Bensinbilar producerar en bråkdel kväveoxider i jämförelse med dieselmotorer, men reningseffekten av ny teknik är för närvarande inte känd. Avgasutsläpp från nya drivmedel (gas, flexifuel) bedöms vara mindre i nya bilar jämfört med bilar som drivs med fossila bränslen.

Åtgärder för att minska partikelutsläpp från andra utsläppskällor än avgaser framkom inte i studien. Det bedöms dock att mindre partikelemissioner från bromsar uppstår ifall elbilar med regenerativ bromsning ersätter traditionella bilar. Användbara metoder för att reducera partikelutsläpp från däck och vägytor känns inte till.

En betydande ökning av andelen elbilar (och laddningsbara hybridbilar) kan sänka bullernivån, speciellt i tätorter var körhastigheterna är låga, under 50 km/h. Vid hastigheter som överskrider detta orsakar däckerna en stor del av personbilarnas bullernivå och elbilarnas bullernivå är nästintill den samma som för bilar drivna med fossila bränslen. Övergång till elbilar minskar buller främst på väg- och gatuavsnitt var andelen tunga fordon är låg.

En förändring i färdssätt (från personbilar till kollektivtrafik, cykel och gång) leder till minskad bullernivå ifall om antal personbilar och därmed den totala trafikmängden kan reduceras. Effekten är störst var busstrafikens andel av den totala trafiken är stor och även lokaltrafikens bussar kan elektrifieras.

Med utveckling av batteriteknik, laddningsnät och laddningshastighet kan andelen elbilar och laddningsbara hybridbilar växa snabbare än beräknat. Detta skulle minska avgasutsläpp och buller samt partikelemissioner från bromsar i tätorter var flest antal människor exponeras för närutsläpp.

Kontaktperson Outi Ampuja	Språk Finska	Sekretessgrad Offentlig	Sidoantal 53
Distribution	Förlag Transport- och kommunikationsverket Traficom		

Title of publication

Local emissions generated by various vehicular propulsion technologies
Phase 1. Literature review

Author(s)

Mikko Hoppo, Jari Hosiokangas, Toni Keskitalo, Jukka Räsänen

Commissioned by, date

Finnish Transport and Communications Agency, 27 May 2019

Publication series and number

Traficom Research Reports 12/2020

ISSN (online) 2669-8781

ISBN (online) 978-952-311-503-3

Keywords

traffic, air pollutants, vehicular propulsion technology, renewable fuels, adverse health effects, nitrogen oxide emissions, small particles, road dust, noise, shift in overall travel mode, microplastics

Abstract

Vehicular propulsion technology along with vehicle fuels are currently undergoing a rapid change. This is due to both increased knowledge on the causes of climate change along with knowledge on the causes of adverse health effects induced by emissions is accelerating decision making and legislative actions. Therefore, emissions arising from passenger cars are to be reduced, especially in city centres, but also on busy roads elsewhere. At present, emissions from new engine types and new fuels are not well characterized. This project estimates emissions from passenger cars in different future scenarios, based on available results from scientific research.

Within this project, Traficom requested Ramboll to determine how shifts in modes of travel affect both local emissions and noise from vehicular traffic in different future scenarios. The sources used in this study were peer-reviewed articles from scientific journals and reports from international and national working groups. In particular, how changes in the modes of transport affected particulate emissions and nitrogen oxide emissions from passenger cars, as well as noise reduction were considered. The selected scenarios were VTT's LIPASTO model for the year 2030 and the milestone 2030 from the Ministry of Transport and Communication's (MTC) "Action programme for carbon-free transport 2045". Calculations were restricted to only passenger cars and the results were calculated using an average annual driving distance of 17 000 km.

During the study it was found that the majority of particulate emissions arising from passenger cars originates from brakes, tyre wear, and the wear of road surfaces. The total mass concentrations of exhaust emissions arising from traffic is about one sixth of total emissions which equates to approximately as much as the share of emissions from brake wear, with the rest originating from tyre wear and road wear. In the future, with the increasing use of new cars which exploit new and refined engine technologies alongside increasing electromobility, the share of exhaust emissions is expected to decrease significantly, whereas other types of non-exhaust emissions are expected to remain at essentially the same level.

Compared to the current scenario annual particulate emissions (total 1980 t/a), the calculated total annual particulate emissions in VTT's LIPASTO model for the year 2030 are expected to increase by 61 t/a (3 %), exhaust emissions to decrease by 51 t/a (19 %), brake wear emissions to increase by 11 t/a (5 %), tyre wear emissions to increase by 50 t/a (7 %) and road wear emissions to increase by 51 % (7 %). From the

current scenario to the proposed milestone 2030 by the MTC, the estimated total annual particulate emissions are expected to decrease by 130 t/a (6 %), exhaust emissions to decrease by 110 t/a (51 %), brake wear emissions to decrease by 31 t/a (13 %), tyre wear emissions to increase by 16 t/a (2 %) and road wear emissions are expected to be unchanged. Nitrogen oxide emissions are estimated to decrease from the current scenario (total annual emissions 12,100 t/a) to VTT's LIPASTO model for the year 2030 by 6,580 t/a (54 %) and to the MTC's proposition milestone 2030 by 8,450 t/a (70 %)

Based on the results from our analysis, it is evident that current cars equipped with diesel engines have notably higher amounts of nitrogen oxide emissions than petrol cars. However, nitrogen oxide emissions from diesel engines will decrease significantly when vehicles conforming to new emission norms become more widespread.

New Euro 6 diesel cars produce only small amounts of nitrogen oxides even in cool conditions. Nitrogen oxide emissions from diesel cars currently in existence are higher whilst the cars are being driven than their type approval requirements. Petrol-powered engines produce only a small fraction of nitrogen oxides compared to diesel-powered engines although the effect of modern technologies on future emissions is not well known. Some modern fuel types (e.g. compressed gas and high-ethanol blends) are estimated to produce less emissions than traditional fossil fuels.

Methods designed to reduce non exhaust-based emissions as a whole were not found in the literature. However, particulate matter arising from brake wear is predicted to form in lower amounts if electric vehicles utilising regenerative braking become more common. Feasible methods to reduce the amount of particulate matter arising from tyre and road wear are not currently known.

In the future, a significant increase in the proportion of electric vehicles (and plug-in hybrids) may decrease noise levels, especially in densely populated areas where driving speeds are typically lower than 50 km/h. At greater speeds, the rolling noise from tyres forms a large part of the total noise, meaning that noise production from electric vehicles is approximately at the same level as from internal combustion engine vehicles. The shift to electric passenger cars decreases the noise generated, especially on roads and streets where the proportion of heavy traffic is low.

Considering the shifts in overall travel modes from passenger cars to public transport, bicycles and walking, the resulting decrease in noise levels is connected to a decrease in vehicular traffic. This can happen if the amount of passenger cars on the road decreases and thus the total traffic amount on roads decreases. These effects will be noticeable when local public transport buses form a sufficient proportion of total traffic and the diesel buses are replaced with electric buses.

The development of battery technology, a battery charging network and charging speed may accelerate the adoption of electric vehicles and so the proportion of full-electric and plug-in hybrid cars on the road may increase faster than is forecast. This would mean that exhaust emissions, noise and particle emissions arising from brakes would be decreased in dense areas where the largest amount of people are exposed to local emissions.

Contact person Outi Ampuja	Language Finnish	Confidence status Public	Pages, total 53
Distributed by	Published by Finnish Transport and Communications Agency Traficom		

ALKUSANAT

Liikenteessä on käynnissä merkittävin energiamurros sataan vuoteen. Ilmastonmuutoksen hidastamiseksi yhteiskunnan eri aloilla tulee luopua haitallisia kasvihuonekaasupäästöjä tuottavista fossiilisista energialähteistä ja siirtyä käyttämään kestävästi tuotettuja uusiutuvia energialähteitä.

Henkilöautojen osalta siirtymä ei-fossiilisiin käyttövoimiin tarkoittaa bensiini- ja dieselkäyttöisten autojen asteittaista korvaamista vaihtoehtoisia käyttövoimia eli sähköä, kaasua, korkeaseosetanolia ja vetyä käyttövoiminaan käyttävillä autoilla. Lisäksi vaihtoehtoisiksi käyttövoimiksi lasketaan kestävästi tuotetut, uuden sukupolven biopolttaineet, kuten uusiutuva diesel.

Vaihtoehtoisten käyttövoimien tuottamista kasvihuonekaasupäästöistä on olemassa tietoa melko kattavasti mutta tieto näiden käyttövoimien aiheuttamista muista päästöistä ja terveysvaikutuksista on hajallaan.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on esittää uusimpaan tieteelliseen tutkimukseen perustuva ajantasainen tilannekatsaus tieliikenteen henkilöautojen eri käyttövoimien ja polttoaineiden lähipäästöistä sekä niiden terveysvaikutuksista. Tämä tutkimusraportti on kaksivaiheisen hankkeen ensimmäisen vaiheen loppuraportti. Selvitys käsittelee eri käyttövoimilla ja polttoaineilla toimivien henkilöautojen käytöstä syntyvien lähipäästöjen laatua ja päästöeroja eri käyttövoimien välillä sekä suoritevaihtelujen ja kulkutapasiirtymien vaikutusta näihin päästöihin. Selvitettävät lähipäästöt ovat terveyden kannalta merkittävät pakokaasut (sisältäen hiukkaspäästöt), melu, mikromuovi sekä jarrujen, renkaiden ja teiden kulumisesta aiheutuvat hiukkaspäästöt. Hankkeen toinen vaihe keskittyy näiden päästöjen vaikutuksiin ihmisten terveyteen.

Selvityksen toteuttivat Liikenne- ja viestintävirasto Traficomin toimeksiannosta Mikko Hoppo, Jari Hosiokangas, Toni Keskitalo ja Jukka Räsänen Ramboll Oy:stä. Hankkeen ensimmäisen vaiheen ohjausryhmään kuuluivat Pasi Jalava Itä-Suomen yliopistosta ja Traficomista Helena Waltari, Outi Ampuja, Aki Tilli ja Laura Riipinen.

Helsingissä 28. päivänä toukokuuta 2020

Outi Ampuja

johtava asiantuntija

Liikenne- ja viestintävirasto Traficom

FÖRORD

Energianvändningen i trafiken befinner sig i den största brytningstiden på hundra år. För att bromsa klimatförändringen i olika delar av samhället ska man avstå från fossila energikällor som ger upphov till skadliga växthusgasutsläpp och övergå till att använda hållbart producerade förnybara energikällor.

För personbilar innebär övergången till icke-fossila drivkrafter att bensin- och diesel-drivna bilar gradvis ersätts med bilar som drivs med alternativa drivkrafter dvs. el, gas, höginblandad etanol och väte. Som alternativa drivkrafter räknas dessutom den nya generationens hållbart producerade biodrivmedel, som till exempel förnybar diesel.

Det finns rätt omfattande information om växthusgasutsläppen från alternativa drivkrafter, men endast spridd information om övriga utsläpp och hälsoeffekter dessa drivkrafter ger upp hov till.

Målet med denna undersökning är att presentera en aktuell lägesrapport baserad på den senaste vetenskapliga forskningen om lokala utsläpp från olika drivkrafter och bränslen för personbilar i vägtrafik samt deras hälsoeffekter. Projektet är indelat i två faser och denna forskningsrapport är slutrapporten för projektets första skede. Utredningen granskar kvaliteten på lokala utsläpp från användningen av personbilar som drivs med olika drivkrafter och bränslen och utsläppsskillnader mellan olika drivkrafter samt hur prestationsvariationer och förändringar i färd sätt påverkar dessa utsläpp. De lokala utsläpp som granskas i undersökningen är avgaser med stor inverkan på hälsan (inklusive partikelutsläpp), buller, mikroplaster samt partikelutsläpp till följd av slitage av bromsar, däck och vägar. Projektets andra skede fokuserar på hur dessa avgaser påverkar människors hälsa.

Undersökningen genomfördes på uppdrag av Transport- och kommunikationsverket Traficom av Mikko Happonen, Jari Hosiokangas, Toni Keskitalo och Jukka Räsänen från Ramboll Oy. Styrgruppen för projektets första skede bestod av Pasi Jalava från Östra Finlands universitet och Helena Waltari, Outi Ampuja, Aki Tilli och Laura Riipinen från Traficom.

Helsingfors, den 28 maj 2020

Outi Ampuja

ledande sakkunnig

Transport- och kommunikationsverket Traficom

FOREWORD

The transport sector is undergoing its most significant energy transition for one hundred years. In order to slow down climate change, different sectors of society must replace fossil energy sources generating harmful greenhouse gases with sustainably produced renewable energy.

In passenger cars, the transition to non-fossil propulsion technologies means the gradual replacement of cars powered by petrol and diesel engines with vehicles powered by alternative energy sources, such as electricity, gas, high-ethanol blends and hydrogen. Sustainably produced new-generation biofuels, such as renewable diesel, are also considered as alternative propulsion technologies.

There is a great deal of information available on greenhouse gas emissions generated by alternative propulsion technologies, but information about their other emissions and health impacts is fragmented.

The purpose of this study is to produce an up-to-date review based on the latest scientific research examining the local emissions generated by different passenger car fuels and propulsion technologies and their health impacts. This research report is the final report of the first stage of a two-stage project. The report examines the quality of the local emissions generated by passenger cars using different fuels and propulsion technologies, differences in emissions between different propulsion technologies, and the impact of performance variations and shifts in overall travel modes on the emissions. The following local emissions are examined in the study: exhaust gases with significant health impacts (including particle emissions), noise, microplastics, and particle emissions generated by the wear of brakes, tyres and roads. In the second project stage, the focus will be on the impact of these emissions on human health.

The report was commissioned by the Finnish Transport and Communications Agency Traficom and it was written by Mikko Happonen, Jari Hosiokangas, Toni Keskitalo and Jukka Räsänen from Ramboll Oy. The steering group of the first project stage included the following members: Pasi Jalava from the University of Eastern Finland, and Helena Waltari, Outi Ampuja, Aki Tilli and Laura Riipinen from Traficom.

Helsinki 28 May 2020

Outi Ampuja

Chief Adviser

Finnish Transport and Communications Agency Traficom

Sisällysluettelo

Termejä ja lyhenteitä

1	Tutkimuksen tavoite	1
2	Tutkimuksen rajausta ja menetelmät	3
2.1	Rajaus	3
2.2	Käytetyt lähteet	3
2.3	Liikenteen kehittymisen skenaariot	3
2.4	Päästölaskennan oletukset ja rajoitukset	5
3	Henkilöautojen polttoaineet ja käyttövoimat	7
3.1	Bensiini	7
3.2	Diesel	7
3.3	Biodiesel ja uuden sukupolven biopolttoaineet	7
3.4	Maakaasu	8
3.5	Biokaasu	8
3.6	Etanoli ja korkeaseosetanoli	8
3.7	Polttoainekonversiot	9
3.8	Vety	9
3.8.1	Vetypolttomoottori	9
3.8.2	Vetypolttokenno	9
3.9	Sähkö	9
4	Henkilöautojen päästöt	11
4.1	Päästöjen mittaaminen	11
4.2	Pakokaasupäästöt	11
4.2.1	Yleistä	11
4.2.2	Päästönormit	13
4.2.3	Hiukkaset	14
4.2.4	Typen oksidit (NO _x)	16
4.2.5	Rikkidioksidi (SO ₂)	18
4.3	Muut kuin pakokaasuperäiset päästöt	18
4.3.1	Jarrujen kulumisen	18
4.3.2	Renkaiden ja tienpinnan kulumisen	20
4.3.3	Mikromuovit	22
4.3.4	Resuspensio	23
5	Henkilöautojen melu	24
5.1	Ajoneuvojen melupäästö yleisesti	24
5.2	Ajoneuvojen melupäästön lainsäädäntö	24
5.2.1	Melupäästörajat EU:ssa	24
5.3	Rengasmelulainsäädäntö	25
5.4	Eri käyttövoimien merkitys melupäästöön	27
5.4.1	Sähköautot	27
5.4.2	Muut käyttövoimat	30
5.5	Laajamittaisen autokannan sähköistymisen merkitys melun kannalta	30
5.6	Kulutapasiirtymien vaikutus meluhaittoihin	30
6	Päästötietojen arviointi	32
7	Tutkimuksen tulokset	33
7.1	Yksikköpäästöt	33
7.2	Arvio suoritevaihtelun vaikutuksesta päästöihin	34
7.3	Päätelmät	38
8	Lähdeluettelo	41
8.1	Tieteelliset julkaisut	41
8.2	Muut lähteet	44
	Liite 1. Yksikköpäästötaulukot	47
	Liite 2. Kokonaispäästötaulukot	53

Termejä ja lyhenteitä

Termi	Merkitys	Selitys
ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V.	saksalainen autoalan järjestö; ADAC tekee mm. autojen päästöttestausta
AVAS	Acoustic Vehicle Alerting System	sähköautojen äänivaroitusjärjestelmä, jolla tuotetaan sähköautoihin ulkoista ääntä alle 20 km/h nopeuksissa
B	biodiesel	biodiesel; numero B:n jälkeen tarkoittaa, kuinka monta prosenttia polttoaineesta on biodieseliä; viittaa yleensä FAME-biodieseliin
BAB 130	Bundesautobahn 130	saksalainen testisykli (maksiminopeus 130 km/h), jota ADAC käyttää autojen eko-testaukseen
CADC	common Artemis driving cycle	testisykli, joka koostuu tyypillisistä kaupunki-, maantie ja moottoriosuuksista
CNG	compressed natural gas	paineistettu maakaasu
DPF	diesel particulate filter	dieselmoottorin hiukkassuodatin
EEA	European Environment Agency	Euroopan ympäristövirasto; Euroopan unionin erillisvirasto, johon kuuluvat EU-maat ja viisi muuta valtiota (Islanti, Liechtenstein, Norja, Sveitsi ja Turkki), joiden lisäksi on kuusi yhteistyömaata (Albania, Bosnia ja Hertsegovina, Kosovo, Montenegro, Pohjois-Makedonia sekä Serbia)
EGR	exhaust gas recirculation	pakokaasun takaisinkierätyks; NO _x -päästön vähennysmenetelmä
EMEP	European Monitoring and Evaluation Programme	ilman epäpuhtauksien päästökerrointietokanta
EUDC	extra-urban driving cycle	maantieajosykli, NEDC:n osa
FAME	fatty acid methyl ester	rasvahapon metyyliesteri; biodieseliä jalostettua öljyä tai rasvaa
FFV	flexible-fuel vehicle	flexifuel-ajoneuvo, jossa voidaan käyttää polttoaineina sekä bensiiniä että korkeaseosetanolia
GDI	gasoline direct injection	bensiinin suoraruiskutus
GPF	gasoline particulate filter	bensiinauton hiukkassuodatin
HA	high aromatic	suuri aromaattisten yhdisteiden pitoisuus (erotuksena tavanomaisesta pitoisuudesta)
HAO	high-aromatic oil	öljy, jossa on runsaasti aromaattisia yhdisteitä; käytettiin aikaisemmin yleisesti autonrenkaiden jatkeaineena
HBEFA	H and b ook E mission F actors for Road Transport	kaupallinen tieliikenteen päästökertoimien koelma
HC	hydrocarbon	hiilivety; pelkästään hiilestä ja vedystä koostuva orgaaninen yhdiste
LTC	low-temperature combustion	palaminen matalassa lämpötilassa; teknologia, jolla voidaan vähentää dieselmoottorin NO _x -päästöjä
LNT	lean NO _x trap	NO _x -adsorboija; poistaa typen oksideja pakokaasusta adsorboimalla ne esim. zeoliittiin

NAO	non-asbestos organic (brake lining)	asbestiton orgaaninen / asbestia sisältämätön orgaaninen (jarrupala tai jarrupalan kuluva osa)
NEDC	new European driving cycle	vuodesta 2000 käytössä ollut EU:n laajuinen päästöjen testaussykli
NO	nitrogen monoxide	typpioksidi
NO₂	nitrogen dioxide	typpidioksidi
NO_x	nitrogen oxides	typen oksidit; NO:n ja NO ₂ :n pitoisuus ilmoitetaan yhtenä lukuarvona, laskettuna NO ₂ :ksi
O₃	ozone	otsoni
PAH	polyaromatic hydrocarbon	polyaromaattinen hiilivety; koostuu useasta toisiinsa liittyneestä aromaattisesta renkaasta, esim. bentso[a]pyreeni
PEMS	portable emissions measurement system	siirrettävä päästömittausjärjestelmä; kiinnitetään pakoputkeen
PFI	port fuel injection	polttoaineen epäsuora ruiskutus bensiinimootorissa
PM	particulate matter (mass concentration)	hiukkaset, massapitoisuus; yksikkö esim. mg/m ³
PM_{0.1}	particulate matter, 0.1 µm	ultrapienet hiukkaset: hiukkaset, joiden aerodynaaminen läpimitta on enintään 0,1 µm (100 nm)
PM_{2.5}	particulate matter, 2.5 µm	pienhiukkaset: hiukkaset, joiden aerodynaaminen läpimitta on enintään 2,5 µm
PM₁₀	particulate matter, 10 µm	hengitettävät hiukkaset: hiukkaset, joiden aerodynaaminen läpimitta on enintään 10 µm
PN	particulate number	hiukkaset, lukumääräpitoisuus; yksikkönä käytetään esitystapaa #/cm ³ tai #/m ³
RDE	real driving emissions	ajoneuvon päästömittausmenetelmä, joka tehdään PEMS-laitteistolla todellisen ajon aikana
SGDI	spray-guided direct injection	bensiinin suihkuohjattu suoraruiskutus
SO₂	sulphur dioxide	rikkidioksidi
SOA	secondary organic aerosol	sekundaarinen orgaaninen aerosoli; muodostuu orgaanisen yhdisteen hapettuaessa ilmassa
TRWP	tyre and road wear particles	renkaiden ja tienpinnan kulumisesta syntyneet hiukkaset
TSP	total suspended particulate	hiukkasten kokonaisleijuma tai kokonaispitoisuus ilmassa
UDC	urban driving cycle	kaupunkiajosykli, NEDC:n osa
WGDI	wall-guided direct injection	bensiinin seinäohjattu suoraruiskutus
WLTC	world-harmonised light-duty test cycle	maailmanlaajuinen harmonisoitu kevyen ajoneuvon testistykli; sisältyy WLTP:hen
WLTP	world-harmonised light-duty test procedure	maailmanlaajuinen harmonisoitu kevyen ajoneuvon testimenetelmä; otettu käyttöön EU:ssa v. 2017

1 Tutkimuksen tavoite

Ilmansaasteiden aiheuttamat terveyshaitat sekä vaikutus ilmastonmuutokseen ovat tällä hetkellä yksi merkittävimmistä uhkakuvista ihmisten ja ympäristön kannalta. Ympäristöministeriön mukaan Suomessa ilmansaasteiden on arvioitu aiheuttavan jopa yli 1600 ennen aikaista kuolemantapausta vuosittain (YM 2016), mutta kansainvälisesti ongelma on paljon suurempi. Suomessa ilmanlaatu on pääasiassa hyvä, mutta suurissa taajamissa ilmanlaatu on ajoittain huonoa. Tyypillisiä ilmanlaatua heikentäviä päästölähteitä pienhiukkasten osalta Suomessa on pienpoltto (46 %), ja muu energiantuotanto (16 %), liikenteen pakokaasut (12 %), katupöly (10 %), turvetuotanto (9 %) ja teollisuus (7 %) (YM 2016). Liikenteen merkitys paikallisesti taajamissa ja vilkkaiden teiden varsilla on merkittävästi korkeampi, samoin kuin katupölyn osuus suuremmissa hengitettävien hiukkasten kokoluokassa. Terveystaittojen ehkäisemiseksi, samoin kuin ilmastonmuutosta kiihdyttävien päästölähteiden vähentämiseksi tarvitaan muutosta nykyiseen tilanteeseen. Liikenteen osalta tämä tarkoittaa uusia käyttövoimia ja polttoaineita. Niiden kokonaisvaikutusta ja merkitystä esimerkiksi ihmisten terveyteen ei toistaiseksi tunneta riittävän hyvin.

Muutos tieliikenteen käyttövoimissa ja liikkumistavoissa kohti ympäristöystävällisempiä liikennemuotoja on jo alkanut. Muutoksille on määritetty tavoitteita ja aikatauluja, mutta vielä ei tiedetä, miten ja millaisella aikataululla muutokset käyttövoimissa ja kulkutapasiirtymissä tullaan saavuttamaan. Aikataulu, muutoksen suuruus, käytettyjen tekniikoiden ja polttoaineiden määrät ja syntyvät päästöt ovat kysymyksiä, joista ei ole vielä riittävästi tietoa saatavilla.

Tällä hetkellä tiedämme, millaisia päästöjä nyt käytössä olevista eri käyttövoimista aiheutuu. Se, miten suuri muutos ilmanlaadussa tulee tapahtumaan eri skenaarioiden toteutuessa, on erilaisten laskennallisten lähestymistapojen varassa. Kun laskennalliset arviot tulevaisuuden päästöjen muutoksesta on tehty, voidaan sen pohjalta arvioida myös muutoksen mahdollista vaikutusta terveyteen. Uusien käyttövoimien ja polttoaineiden päästöjen haitallisuutta käsitellään tämän projektin vaiheessa II.

Käyttövoimista toiseen siirtyminen voi vaikuttaa myös melun määrään ympäristössä. Etenkin sähköautojen yleistymisen voi vaikuttaa jonkin verran melutasoihin, joten on tarve selvittää muutoksesta aiheutuva vaikutus. Myös mahdolliset muutokset kulkutavoissa, kuten merkittävä siirtyminen yksityisautoilusta joukkoliikenteeseen ja pyöräilyyn, vaikuttavat melutasoihin etenkin taajamissa.

Tässä Traficommin tilaamassa selvityksessä haettiin vastauksia seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- Paljonko eri käyttövoimilla ja polttoaineilla toimivat henkilöautot aiheuttavat vuodessa keskimääräisellä vuosisuoritteella (17 000 km) lähipäästöjä? Lisäksi tulisi tarkastella käyttövoimakohtaisia keskimääräisiä lähipäästöjä ottaen huomioon käyttövoimakohtaisen suoritevaihtelun (VTT:n LIPASTO-mallin mukaiset oletukset).
- Miten kaupunkiliikenteen kulkutapasiirtymät vaikuttavat meluhaittoihin (siirtymät yksityisautoilusta kävelyyn, pyöräilyyn ja joukkoliikenteeseen, myös arvio täyssähköautojen mittavan lisääntymisen vaikutuksista melutilanteeseen lähiinnä keskustissa, joissa ajetaan alhaisilla nopeuksilla)?

Tässä työssä vastauksia haettiin ensisijaisesti vertaisarvioitun kirjallisuuden pohjalta, kuinka paljon eri käyttövoimilla ja polttoaineilla toimivat henkilöautot tuottavat

keskimäärin vuodessa lähipäästöjä. Lähipäästöt tarkoittavat liikenneväylällä syntyviä päästöjä, eikä mukana ole esimerkiksi auton valmistuksen eikä polttoaineen tai käyttövoiman tuottamisen päästöjen tarkastelua. Myös melun osalta tarkastelussa rajoituttiin henkilöautojen meluun ja vaikutuksiin liikenneväylien läheisyydessä.

2 Tutkimuksen rajausta ja menetelmät

2.1 Rajausta

Tarkasteltavina päästöinä olivat erityisesti typen oksidien sekä hiukkasten päästöt, koska niiden terveysvaikutukset väestöön arvioitiin merkittävimmiksi. Rikkidioksidin päästöt ovat nykytasolla pienet, koska polttoaineiden rikkipitoisuus on alhainen. Häkäpäästöjen vaikutusten arvioitiin olevan Suomessa olevan vähämerkityksisiä väestötasolla. Lähipäästö- ja terveysvaikutusrajausten takia hiilidioksidin ja metaanin päästöjen tarkastelu ei sisälly selvitykseen.

Päästöjen arvioinnissa oletuksena oli, että henkilöauton keskimääräinen vuotuinen ajosuorite on 17 000 km.

Selvitys rajattiin vain henkilöautojen päästöihin. Tämä tarkoittaa, että raskaan liikenteen päästöt jätettiin huomiotta. Raskas liikenne kuitenkin tuottaa huomattavan osan kaikesta liikenteen päästöstä Suomessa. Esimerkiksi VTT:n LIPASTO-liikennemallin mukaan vuonna 2018 raskas liikenne tuotti vajaat 60 % tieliikenteen NO_x-päästöistä sekä noin 60 % tieliikenteen pakokaasujen hiukkaspäästöstä. (VTT 2018)

Myös melun osalta rajausta on henkilöautoissa. Raskaan liikenteen meluvaikutus on henkilöautoja suurempi, ja nyrkkisääntönä on, että yksi raskas ajoneuvo vastaa melultaan noin 10 henkilöautoa.

2.2 Käytetyt lähteet

Selvityksessä käytettiin lähteinä tieteellistä, vertaisarvioitua kirjallisuutta sekä soveltuvin osin muita lähteitä, kuten tutkimuslaitosten julkaisuja sekä kansallisia ohjeita. Kirjallisuushaut tehtiin touko–syyskuussa 2019. Tutkimuslaitosten raporteista hyödynnettiin julkaisuja Suomesta, Ruotsista, Norjasta, Alankomaista, Ranskasta, Saksasta, Isosta-Britanniasta sekä Yhdysvalloista. Muita käytettyjä lähteitä olivat Euroopan ympäristövirasto EEA:n ja Yhdysvaltain ympäristönsuojeluvirasto EPA:n julkaisut sekä Euroopan unionin asiakirjat ja tiedonannot. Lisäksi käytössä on ollut VTT:n LIPASTO-laskentamallin ajoneuvomääriä ja päästökertoimia sekä liikenne- ja viestintäministeriön asettaman liikenteen ilmastopolitiikan työryhmän hiilettömän liikenteen skenaariossa 2045 esitettyjä ajoneuvomääriä.

2.3 Liikenteen kehittämisen skenaariot

Maassamme on tehty useita erilaisia skenaariota ja ennusteita autokannan ja käyttövoimien kehityksestä. Yleisimmin on käytössä VTT:n kehittämä ALIISA-autokantamalli (LIPASTO-järjestelmän osa), jonka uusin versio on tämän kirjoitushetkellä vuodelta 2018. Tässä skenaariossa muutokset ovat vähittäisiä, ja henkilöautojen kokonaismäärä kasvaa hieman. Vuonna 2050 ennusteessa sähköautojen osuus henkilöautoista on 17,8 %, bensiinikäyttöisten 55,1 % ja dieselkäyttöisten 25,6 % sekä muiden (korkeaseosetanoli, kaasu ja vety) 1,5 %. (VTT 2018)

Liikenne- ja viestintäministeriön asettaman liikenteen ilmastopolitiikan työryhmän loppuraportissa ”Toimenpideohjelma hiilettömään liikenteeseen 2045” esitettiin, että hiilettömän liikenteen tavoitteeseen pääsemiseksi käyttövoimien pitäisi muuttua radikaalisti. Esitetty skenaario oli, että vuonna 2045 sähköautojen osuuden pitäisi olla

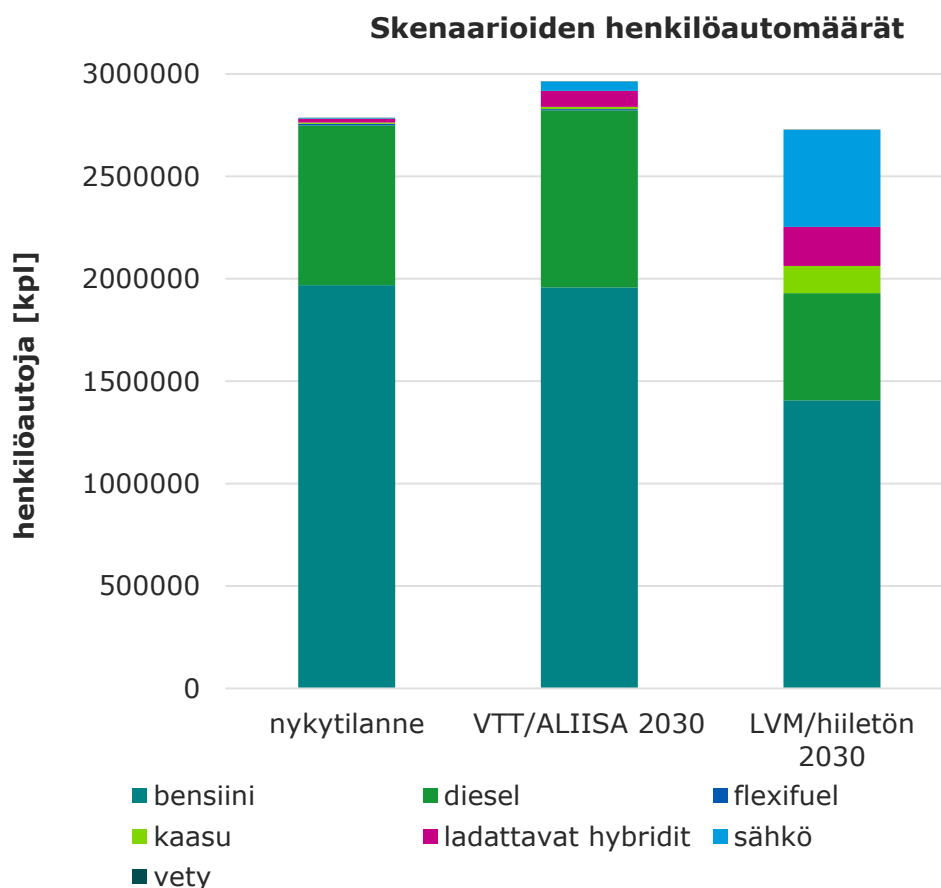
76 %, bensiinikäyttöisten 7 %, dieselkäyttöisten 1 % ja muiden (kaasu sekä ladattava hybridi) yhteensä 16 %. Henkilöautojen kokonaislukumäärän pitäisi laskea vajalla 100 000 kappaleella (LVM 2018).

Tässä selvityksessä tarkastellaan kokonaispäästöjä nykytilanteessa (tilanne 30.6.2019) sekä kahdessa ennustetilanteessa. Vuoden 2030 perusennuste on LIPASTO-järjestelmän perusennuste. Lisäksi esitetään liikenteen ilmastopolitiikan työryhmän toimenpideohjelmahdotuksen mukaiset tulokset vuoden 2030 välitavoitteelle. Tästä skenaariosta käytetään nimeä "LVM/Hiiletön". Nykytilanteessa on otettu huomioon vain ympärivuotisessa käytössä olevat autot.

Taulukko 1. Liikennekäytössä olevien henkilöautojen määrät vuonna 2019 sekä kahdessa ennuste- tai tavoitetilanteessa vuonna 2030 (Data Traficom 30.6.2019, VTT 2018, LVM 2018). Kaasuautot sisältävät maakaasua käyttävät autot sekä puhdistettua biokaasua eli biometaania käyttävät autot.

Käyttövoima	Traficom 30.6.2019	VTT/LIPASTO ALIISA- autokantamalli 2030	LVM/Hiiletön lii- kenne, välitavoite 2030
Bensiini	1 970 000	1 960 000	1 410 000
Diesel	780 000	860 000	520 000
FFV (korkeaseoseta- noli)	7 000	5 800	0
Kaasu	6 900	11 000	130 000
Ladattavat hybridit	18 000	78 000	190 000
Sähkö	3 500	45 000	470 000
Vety	16 ¹	490	1
Yhteensä	2 780 000	2 960 000	2 730 000

¹ Vetyautojen määrä nykytilanteessa on VTT:n ALIISA-autokantamallista.



Kuva 1. Nykytilanteen ja skenaarioiden henkilöautojen määrät ja käyttövoimien jakautuminen.

Vaikka tässä työssä keskitytään henkilöautojen tuottamiin päästöihin, tulee muistaa, että myös muu liikenne ja muut ajoneuvoluokat kehittyvät. Varsinkin tavoitteellisessa skenaariossa osa henkilöautoliikenteen vähentymisestä oletetaan toteutuvan esim. joukkoliikennettä kehittämällä, joten liikenteen kokonaispäästömäärien muutoksen arviointi vaatisi kaikkien ajoneuvoluokkien huomioon ottamisen. Todennäköisesti muutos uusiin vähäpäästöisiin käyttövoimiin ja polttoaineisiin tapahtuu ensiksi linja-autoliikenteessä, josta saatujen kokemusten perusteella muutos ohjautuu yksityisautoiluun.

Automäärien, käyttövoiman ja ajosuoritteiden lisäksi päästöihin vaikuttaa teknologian kehittyminen. Viimeisin määritetty päästöluokka henkilöautoille on Euro 6. Autokannan uudistuessa vähintään tämän vaatimuksen täyttävien autojen osuus autokannasta ja ajosuoritteista kasvaa. ALIISA-mallin mukaan vuonna 2030 jo 84 % henkilöautojen ajosuoritteesta toteutuisi vähintään Euro 6 -vaatimukset täyttävillä autoilla. Vuonna 2050 käytännössä lähes kaikki liikenteessä olevat autot täyttäisivät nämä päästörajat.

2.4 Päästölaskennan oletukset ja rajoitukset

Tavoitteena oli saada käyttökelpoinen arvio uusien ja uudehkojen henkilöautojen päästöistä varsinaisessa ajotilanteessa.

Tulosten vertailukelpoisuuden parantamiseksi käytettiin päästölaskennassa geometrista keskiarvoa. Tavanomainen aritmeettinen keskiarvo on liian herkkä lukuarvoille,

jotka poikkeavat suuresti muista lukuarvoista. Näin saatu tulos parantaa vertailukelpoisuutta keskimääräiseen tulokseen, esimerkiksi vanhan teknologian autojen kohdalla. Kaikki laskuissa käytetyt päästöarvot on lueteltu liitteessä 1.

Muiden kuin pakokaasuperäisten päästöjen laskennassa oletettiin, että sähköautoille tienpinnan ja renkaiden kulumisen ovat keskimäärin noin 20 % suurempia kuin polttomoottoriautoille, koska akustot lisäävät auton massaa. (Timmers ja Achten 2016) Koska sähköautoissa on käytössä tavanomaisten jarrujen lisäksi regeneratiivinen jarrutus, joka ei tuota hiukkasia, sähköautojen jarrujen kulumisesta syntyvien hiukkaspäästöjen oletettiin olevan puolet polttomoottoriautojen vastaavasta arvosta. Ladattavien hybridien ja vetypolttokennoautojen jarrutuksen hiukkaspäästöjen oletettiin käyttäytyvän samalla tavalla kuin täyssähköautojen.

Flexifuel-autojen oletettiin kulkevan bensiinillä 10 % suoritteesta ja 90 % suoritteesta käyttäen korkeaseosetanolia. Ladattavien hybridien pakokaasupäästöjen oletettiin olevan puolet bensiiniautojen päästöistä.

Tulevaisuuden skenaarioiden päästöt on laskettu käyttäen nykytilanteessa mitattuja ja laskettuja arvoja, eikä moottoritekniikan kehittymistä ja sitä kautta tapahtuvia päästöjen muutoksia ole otettu huomioon. Vaikka laskenta ei otakaan huomioon kaikkia vaikuttavia tekijöitä, tällä menetelmällä saadaan silti selville olennaista tietoa tärkeimmistä päästölähteistä, riskien aiheuttajista ja mahdollisista kehityskohteista.

3 Henkilöautojen polttoaineet ja käyttövoimat

3.1 Bensiini

Suomessa myytävä 98-oktaaninen bensiini sisältää etanolia 5 %, mikä merkitään E5. Vastaavasti 95-oktaanisessa bensiinissä on 10 % etanolia, mikä merkitään E10.

Bensiinin suoraruiskutusta (GDI) käyttävä polttomoottori tuottaa enemmän nano- ja pienhiukkaspäästöjä kuin perinteistä tekniikkaa (PFI, epäsuora ruiskutus) käytettäessä. Tämä johtuu siitä, että polttoainesuihku osuu sylinterin seinämiin sekä määntään, minkä vuoksi palaminen ei tapahdu puhtaasti. GDI-moottorin eri variaatiot tuottavat eri määriä hiukkaspäästöjä. Seinäohjattu ruiskutus (WGDI) tuottaa enemmän hiukkaspäästöjä kuin suihkuohjattu (SGDI), koska edellisessä bensiinipisaroi- ta osuu enemmän sylinterin seinämiin (Qian ja muut 2019, Aakko-Saksa ja muut 2017).

Polttoaineen sytytys bensiinimoottoreissa tapahtuu kipinän avulla. Viime vuosina on esitelty prototyyppisiä myös moottoreista, joissa sytytykseen käytetään puristus- painetta eli suorasytytystä dieselmoottoreiden tapaan. Sytytysmenetelmän vaikutus bensiiniauton päästöihin on epävarma, mutta on mahdollista, että NO_x-päästöt lisääntyvät suorasytytyksen takia.

3.2 Diesel

Dieselöljy on koostumukseltaan bensiiniä raskaampi ja korkeamman kiehumapisteen omaava öljyjaloste. Dieselkäyttöiset henkilöautot ovat yleistyneet, koska polttoneste on bensiiniä edullisempaa. Dieselmoottoreissa polttoaineen sytytys tapahtuu aina käyttäen puristuspainetta eli suorasytytystä eikä kipinää.

Suomessa käytetään sääoloista johtuen kesällä ja talvella eri tyyppistä dieselöljyä. Talvilaatu eroaa kesälaadusta siten, että se on juoksevampaa (viskositeetti on pienempi), sameutuu alemmassa lämpötilassa eikä tuki standardoitua suodatinta kylmissä oloissa. Kemiallisesti talvilaadulla on korkeampi setaaniluku kuin kesälaadulla. Korkeampi setaaniluku tarkoittaa, että dieselöljy syttyy nopeammin ja moottorissa tarvitaan pienempää puristusta.

3.3 Biodiesel ja uuden sukupolven biopolttoaineet

Biodiesel määritellään Euroopan unionin lainsäädännössä laadultaan dieselöljyä vastaavaksi metyyliesteriksi, joka tuotetaan kasvi- tai eläinöljystä (EU 2003). Yhdysvalloissa biodieselin määritelmä on samankaltainen standardin ASTM D6751 mukaan. Tämän määritelmän mukaista biodieseliä kutsutaan koostumuksensa mukaisella nimellä FAME (fatty acid methyl ester, rasvahapon metyyliesteri).

Polttomoottorissa on mahdollista käyttää polttoaineena myös kemiallisesti toisenlaisia kasvi- tai eläinrasvasta jalostettuja polttoaineita, joita kutsutaan toisinaan biodieseliiksi, kun niitä käytetään dieselmoottorissa, vaikka ne eivät täytäkään sen säädöksiin perustuvaa määritelmää. Näiden polttoaineiden kemialliset ominaisuudet vaihtelevat suuresti, minkä takia päästötkin voivat vaihdella. Täsmällisempi nimitys tällaisille polttonesteille on ”uusiutuva diesel” tai ”uuden sukupolven biopolttoaineet”.

Biodieseliä voidaan käyttää sekoitettuna tavanomaiseen dieselöljyyn, mikä voidaan ilmaista lyhenteellä B. Esimerkiksi B20 tarkoittaa seosta, jossa on 20 % biodieseliä.

Lämpötila vaikuttaa siihen, millainen seos on käyttökelpoinen. Kylmissä oloissa bio-diesel syttyy huonommin kuin dieselöljy, joten talvella käytettävissä seoksissa on suhteessa vähemmän biodieseliä, kuitenkin vähintään 10 %.

3.4 Maakaasu

Maakaasu on lähes kokonaan metaania. Metaani on hiilivety, ja tuottaa siten puhtaasti palaessaan vettä ja hiilidioksidia. Lähipäästöjä syntyy lähinnä typen oksideista palamisen yhteydessä. Rikki poistetaan maakaasusta, joten rikkidioksidia ei synny maakaasua käyttävässä polttomoottorissa.

3.5 Biokaasu

Biokaasu koostuu pääasiassa metaanista ja hiilidioksidista. Näiden pääkomponenttien suhde vaihtelee; tyypillisesti metaania on vähintään puolet ja hiilidioksidia 25–40 %. (Herout ja muut 2011, Rasi 2009) Biokaasua voidaan puhdistaa, jolloin metaanin määrä on noin 97 %; tällöin voidaan puhua biometaanista. Biometaania voidaan käyttää polttoaineena samaan tapaan kuin maakaasua. (Rasi 2009) Voidaan olettaa, että puhdistetun biometaanin ominaisuudet ovat samankaltaiset kuin maakaasulla.

3.6 Etanoli ja korkeaseosetanoli

Etanolia voidaan käyttää useimmissa moottoreissa sekoitettuna bensiiniin. Suomessa myytävä 98-oktaaninen bensiini sisältää etanolia 5 %, mikä merkitään E5. Korkeaseosetanolia, joka sisältää 85 % etanolia ja 15 % bensiiniä, voidaan käyttää soveltuvissa ns. flexifuel-autoissa. Flexifuel-autoihin voidaan tankata myös tavanomaista bensiiniä.

Etanolin ominaisuuksiin polttoaineena vaikuttaa se, että se sisältää happea. Etanolin käyttö bensiinin seassa voi vähentää päästöjä verrattuna pelkän bensiinin käyttöön. Täsmällinen vaikutus riippuu ajoneuvosta, ympäristöoloista ja ajotyylistä. Lämpimissä oloissa (testi suoritettu +22 °C:ssa) NO_x-päästöjen on havaittu pienenevän korkeaseoksista E85:tä käytettäessä bensiiniin verrattuna enimmillään 40 % (Dardiotis ja muut 2015). E80 voi pienentää NO_x-päästöä E10:n käyttöön verrattuna noin 30–40 %. Vastaavasti hiukkaspäästöt pienenevät tällä muutoksella 75 %. Kuitenkin jos E10:ssä on runsaasti aromaattisia yhdisteitä (noin 35 %, kun tavallisessa E10:ssä on 25 %), voi hiukkaspäästö kasvaa yli kaksinkertaiseksi (Yang ja muut 2019).

Jo E10-laadun käyttö vähentää lämpimässä ympäristössä testattaessa selvästi hiukkasten lukumääräpäästöä, noin 95 % verrattuna pelkkään bensiiniin. E85-laadun käyttö vähensi lukumääräpäästöä samoin noin 95 %. E10-laadun käyttö pienentää myös PAH-päästöä 30–70 % verrattuna pelkän bensiinin käyttöön. E85:n käyttäminen voi pienentää PAH-päästöjä 60–97 % (Muñoz ja muut 2016).

Testattaessa lämpötilassa –7 °C flexifuel-auton (PFI-tyyppinen moottori) NO_x-päästöt pienenevät noin puoleen käytettäessä E85:tä E10:n asemesta. Häkää muodostui yli kaksinkertainen määrä. Lisäksi hiilivety-päästöt olivat moninkertaiset E85:llä. Flexifuel-auton hiukkaspäästöt olivat alhaiset verrattuna GDI-moottoriin ja E10:een, mutta E85:n käyttö lisäsi päästöä noin 30 % (Aakko-Saksa ja muut 2017).

3.7 Polttoainekonversiot

Polttomoottori on mahdollista konvertoida eli muuntaa käyttämään toista polttoainetta. Tällaisia konversioita tehdään, jotta polttoaineena voitaisiin käyttää maakaasua, biokaasua tai etanolia.

Valtio tukee vuosina 2018–2021 muutosta flexifuel-autoksi, jossa voi käyttää E85:tä, 200 eurolla. Bensiiniauton muuntamista kaasukäyttöiseksi bifuel-autoksi tuetaan samalla ajanjaksolla 1000 eurolla.

3.8 Vety

Vety on kevein alkuaine, ja se tuottaa polttoaineista painoyksikköä kohti eniten energiaa. Kaasuna se vaatii paljon tilaa, mutta paineistus vähentää tilantarvetta. Vedyn tuottaminen vaatii perinteisillä menetelmillä paljon energiaa. Vedyn raaka-aineena käytettävä metaani on käytännössä peräisin maakaasusta, joka on fossiilinen polttoaine. Vedyn ominaisuuksiin kuuluu räjähtävän seoksen muodostaminen ilmassa. Sitä voidaan varastoida turvallisesti adsorboimalla huokoiseen metalliin, mutta tämä lisää vetysäiliön massaa ja hintaa, ja myös paineistettua vetyä sisältävät säiliöt ovat raskaita. Tuotannon, jakelun ja varastoinnin ongelmat on ratkaistava ennen vedyn laajamittaista käyttöönottoa.

Vedyn osuus henkilöliikenteen käyttövoimista Suomessa on ennusteissa pieni. VTT:n ALIISA-mallin ennusteissa vetyautojen osuus on vuonna 2030 vain 0,02 % ja 0,4 % vuonna 2050. LVM:n hiilettömän liikenteen tavoitteessa ennustetaan vetyautojen määräksi 1 kappale vuonna 2030 (VTT 2018, LVM 2018). Tämän takia vedyn käytön vaikutusten arvioidaan olevan käytännössä merkityksettömiä tarkastellulla aikavälillä.

3.8.1 Vetypolttomoottori

Modifioidussa polttomoottorissa voidaan käyttää polttoaineena vetyä. Moottorin täytyy olla varta vasten vedylle suunniteltu. Suomessa vetypolttomoottorin käytön yleistyminen henkilöautoissa on epätodennäköistä.

Vetykäyttöisen polttomoottorin pakokaasun hiukkaspitoisuus on ollut yleisesti testien pienin sekä lukumääräpitoisuudelle että massapitoisuudelle ainakin lämpimissä olosuhteissa. Suurella kuormalla hiukkaspitoisuuden todettiin olevan samalla tasolla kuin käytettäessä bensiiniä (Singh ja muut 2016).

3.8.2 Vetypolttokenno

Polttokennotekniikka on yksi uusista, tulevista teknologioista. Polttokennossa vety yhtyy sähkökemiallisen reaktion välityksellä ilman happeen. Ajoneuvo on täten sähköauto, jonka sähköenergia tuotetaan ajoneuvossa itsessään. Koska polttokennossa tapahtuva reaktio ei nimestään huolimatta ole palamisreaktio, sivutuotteina ei synny typen oksideja vaan pelkästään vettä. Tämän vuoksi polttokennoauton tämän selvityksen kannalta olennaiset lähipäästöt eivät ole pakokaasupäästöjä.

3.9 Sähkö

Täyssähköautot eivät tuota lähipäästöjä pakokaasujen muodossa. Käytettävä energia tuotetaan muualla, mikä vaikuttaa alueellisesti ja globaalisti, mutta liikenneväylien

läheisyydessä vaikuttavat, pakokaasuista syntyvät kaasumaiset ja aerosolipäästöt jäävät pois.

Vaikka sähköautot eivät tuota pakokaasuperäisiä päästöjä, ne eivät ole silti päästötömiä, koska jarrujen, renkaiden ja tienpinnan kulumisesta muodostuu edelleen hiukkasia. Sähköautot ovat akkujen takia painavampia kuin vastaavan kokoluokan polttomoottoriautot. Tällä perusteella renkaiden ja tienpinnan kuluminen on voimakkaampaa kuin polttomoottoriautojen kohdalla. Yksi arvio on, että vastaava sähköauto tuottaisi noin 20 % enemmän renkaiden ja tienpinnan kulumisesta sekä resuspensiosta aiheutuvaa PM₁₀-päästöä kuin polttomoottoriauto. (Timmers ja Achten 2016)

Nykyaikaisissa sähköautoissa on käytössä regeneroiva jarrutus perinteisten jarrujen lisäksi. Tyypillisesti regeneroiva jarrutus toimii muulloin kuin voimakkaissa jarrutuksissa. Täten jarrupalat eivät kulu, eikä normaalitilanteessa synny hiukkaspäästöä jarrujen kulumisesta. Regeneroiva jarrutus ei silti poista kokonaan jarrupölyn syntymistä. Etenkin taajamaliikenteessä on runsaasti jarruttelua, jolloin lisänä tarvittavan tavanomaisen jarrujärjestelmän käytöstä syntyy hiukkaspäästöjä.

Ladattavissa hybridautoissa on sekä polttomoottori että sähkömoottori. Nimityksensä mukaisesti niiden akustoa voidaan ladata verkkovirralla. Ladattavat hybridit on erotettava muista hybridautoista, joiden akkuja ladataan ainoastaan auton polttomoottorin tuottamalla sähköllä. Uudet ladattavat hybridit käyttävät täyssähköautojen tavoin regeneratiivista jarrutusta.

Ladattavien hybridien toimintamatka pelkällä sähköenergialla on yleensä alle 100 km. Tämän jälkeen käytetään polttomoottoria, joka tuottaa pakokaasupäästöjä tavalliseen tapaan. Taajamissa 100 kilometrin toimintasäde on riittävä useisiin käytötarkoituksiin.

Suomessa on käytössä hankintatuki täyssähköautoille. Tuki on voimassa 2018–2021, ja sen suuruus on 2000 €.

4 Henkilöautojen päästöt

4.1 Päästöjen mittaaminen

Ajoneuvojen pakokaasujen päästöttestauksessa on periaatteessa kaksi eri tapaa: testaus laboratoriossa ja ajonaikainen testaus. Laboratoriotestaus tapahtuu auton ollessa dynamometrillä, joka jäljittelee ajamista. Laboratoriotestaus voidaan tehdä olosuhteiltaan kontrolloidussa laboratoriossa, jolloin voidaan saada tietoa päästöistä esimerkiksi eri lämpötiloissa. Ajonaikainen testaus tapahtuu siten, että pakoputkeen kiinnitetään mittalaite (PEMS). Tällaista testausta kutsutaan lyhenteellä RDE eli ”todelliset ajonaikaiset päästöt”.

Laboratoriotestauksessa käytetään erilaisia testisyklejä, joiden on tarkoitus kuvata tyypillistä ajotilannetta. Euroopan unionissa on siirrytty käyttämään WLTC-sykliä aikaisemman NEDC-syklin sijaan Euro 6 -rekisteröidyille henkilöautoille vuodesta 2017 alkaen (EU 2017/1151) eli luokasta Euro 6c alkaen. Muita kirjallisuudessa esiintyviä käytettyjä testisyklejä ovat lyhennimenimiltään CADC ja BAB 130.

On mahdollista, että mitatut päästöt muuttuvat, kun testauskäytäntöä muutetaan. Testattaessa Euro 5- ja Euro 6 -luokiteltuja bensiinihenkilöautoja typen oksidien päästöt kasvoivat yleensä vain vähän siirryttäessä NEDC:stä WLTC:hen ja pysyivät melkein aina normin päästörajan alapuolella. Häkäpäästöt kasvoivat keskimäärin 45 %, ja joidenkin autojen kohdalla normin päästöraja ylittyi. Joidenkin autojen häkäpäästöt myös pienenevät. Dieselautojen päästövertailussa typen oksidien päästöt autosta riippuen jopa kaksinkertaistuivat mutta joskus päästö pysyi samana. Dieselautojen häkäpäästöt pienenevät useimmissa tapauksissa siirryttäessä NEDC:stä WLTP:hen (Marotta ja muut 2015).

Yhden Euro 5 -dieselhenkilöauton testauksessa hiukkasten lukumääräpitoisuus kasvoi enimmillään noin kaksinkertaiseksi, kun polttoaineena käytettiin pelkästään dieselöljyä. Kun polttoaine oli biodieselsekoitusta B30, niin hiukkasten lukumääräpitoisuus pakokaasussa pieneni alle puoleen (Kaya ja muut 2018). Yhden Euro 4 -dieselauton testeissä on havaittu hiukkasten lukumäärän kasvavan WLTC:ssä verrattuna NEDC:hen. Lisäys on ollut 2–3-kertainen (Pirjola ja muut 2019). Myös dieselauton pakokaasussa hiukkasten massapitoisuus vaikuttaa kasvavan syklimuutoksen myötä. Lisäys voi olla 20 prosentista yli kaksinkertaiseksi (Bielaczyc ja muut 2017).

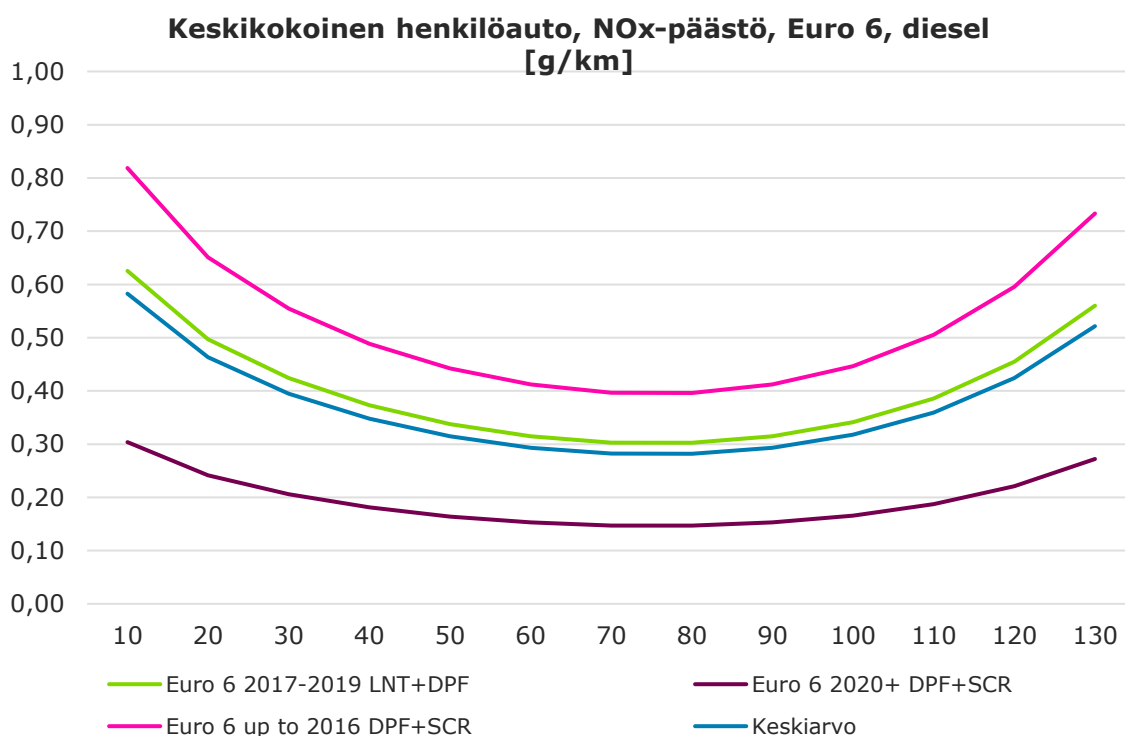
Jarrujen kulumisen päästöjä voidaan mitata sijoittamalla näytteenotin mahdollisimman lähelle jarrupalaa. Renkaan kulumisesta syntyvät hiukkaset voivat haitata mitausta, joten sondin sijoittelu on tärkeää. Laboratoriossa voidaan mitata syntyviä hiukkasia myös antamalla metallisen tapin hangata jarrulevyä. Tämä koejärjestely ei vastaa todellista ajotilannetta (Chasapidis ja muut 2018). Renkaiden ja tienpinnan kulumisen aiheuttaman hiukkaspäästöjen mittaaminen voi tapahtua sijoittamalla mitalaitteen näytteenotin renkaan taakse lähelle tienpintaa (Kupiainen ja muut 2011).

4.2 Pakokaasupäästöt

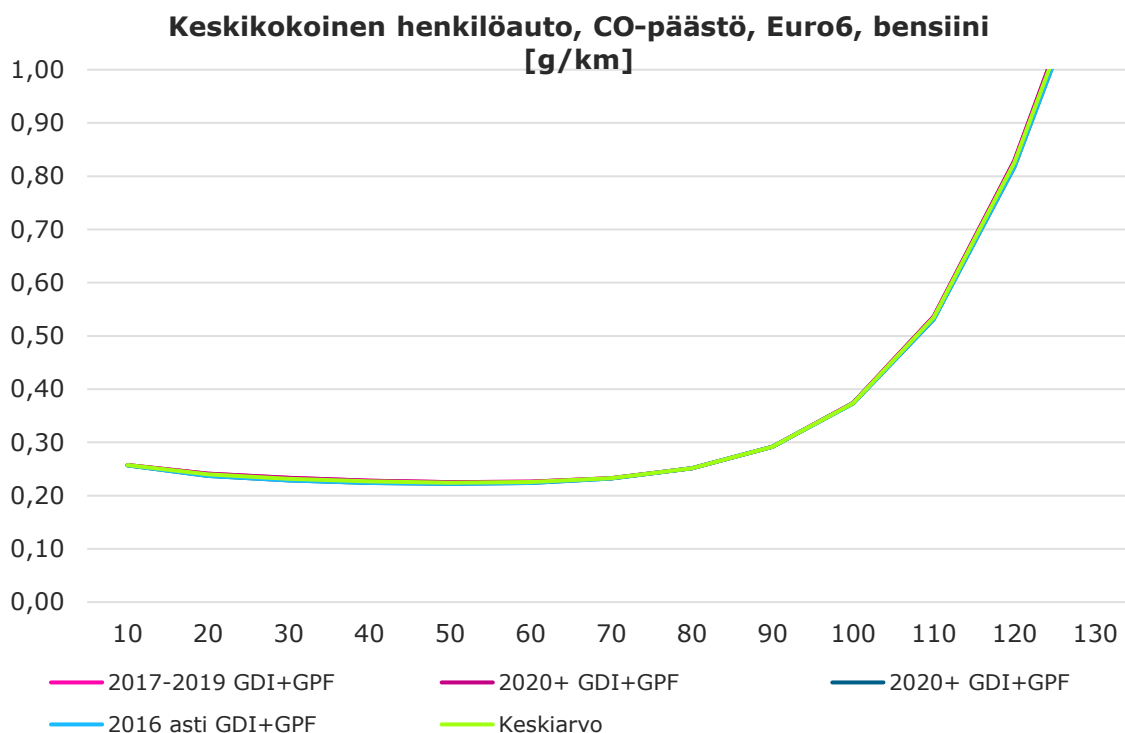
4.2.1 Yleistä

Autojen aiheuttamat pakokaasupäästöt vaihtelevat ajonopeuden mukaan. Osalla päästökomponenteista on selvä päästön minimitaso, joka esiintyy kohtuullisilla no-

peuksilla liikenteen ollessa ruuhkatonta. Esimerkkinä voidaan esittää suurten diesel-autojen typen oksidien päästöt, jotka ovat pienimmillään nopeuksilla 70–80 km/h (Kuva 2). Päästö voi myös kasvaa voimakkaasti ajonopeuden kasvaessa. Näin käy esimerkiksi häkäpäästölle keskikokoisilla bensiiniautoilla, kun nopeus kasvaa suuremmaksi kuin 90 km/h (Kuva 3). Nämä esimerkit pohjautuvat laskennalliseen HBEFA-aineistoon. HBEFAn päästökertoimet perustuvat mittauksiin, mutta kaikkia variaatioita se ei ota huomioon. Vastaava päästön riippuvuus ajonopeudesta on havaittu myös mittauksissa (Lozhkina ja Lozhkin 2016). On muistettava myös, että kiihdytyksien yhteydessä päästö voi lyhytaikaisesti kasvaa.



Kuva 2. Keskikokoisten dieselhenkilöautojen NO_x-päästöjä [g/km] eri nopeuksilla HBEFA-aineiston mukaan. Pienimmät päästöt havaitaan nopeuksilla 70–80 km/h. DPF = dieselauton hiukkassuodatin; SCR = katalysaattori; LNT = NO_x-adsorboija.



Kuva 3. Keskikokoisen, bensiinikäyttöisen henkilöauton häkäpäästöt (g/km) eri nopeuksilla HBEFA-aineiston mukaan. Päästö kasvaa voimakkaasti yli 90 km/h nopeudella. Tässä tapauksessa päästöjen oletetaan olevan samat eri puhdistustekniikoilla. GDI = bensiinin suoraruiskutus; GPF = bensiiniauton hiukkassuodatin.

4.2.2 Päästönormit

Seuraavassa on esitetty Euro-päästöluokkien vaatimukset bensiini- ja dieselikäyttöisille autoille keskimääräisellä vuosisuoritteella laskettuna. Niiden tarkastelu on mielekästä suhteessa mitattuihin päästöarvoihin. Lisäksi uusissa normeissa on asetettu raja-arvo hiukkasten lukumääräpäästölle, joka on 6×10^{11} hiukkasta/km eli 600 000 000 000 (kuusisataa miljardia) hiukkasta/km. Tämä on voimassa bensiini-autoille alkaen Euro 6b:stä ja dieselautoille Euro 5b:stä.

Taulukko 2. Henkilöautojen pakokaasuvuosipäästöjä Euro-päästöluokkien mukaisesti. Vuosipäästö on laskettu keskimääräisellä vuosisuoritteella (17 000 km).

Euro-luokka	Ensirekisteröinnin päivämäärä	Bensiini			Diesel		
		CO [kg/a]	NO _x [kg/a]	PM [kg/a]	CO [kg/a]	NO _x [kg/a]	PM [kg/a]
Euro 1	tammikuu 1993	46			46		2,4
Euro 2	tammikuu 1997	37			17		1,4
Euro 3	tammikuu 2001	39	2,6		11	8,5	0,85
Euro 4	tammikuu 2006	17	1,4		8,5	4,3	0,43
Euro 5a	tammikuu 2011	17	1,0	0,085	8,5	3,1	0,085
Euro 5b	tammikuu 2013	17	1,0	0,077	8,5	3,1	0,077
Euro 6b	syyskuu 2015	17	1,0	0,077	8,5	1,4	0,077
Euro 6c	syyskuu 2018	17	1,0	0,077	8,5	1,4	0,077
Euro 6d-Temp	syyskuu 2019	17	1,0	0,077	8,5	1,4	0,077
Euro 6d	tammikuu 2021	17	1,0	0,077	8,5	1,4	0,077

Euro-luokat koskevat laboratoriossa WLTP-menetelmällä mitattuja päästöjä luokasta Euro 6c alkaen ja sitä ennen NEDC-menetelmällä tehtyjä mittauksia. Euro 6d-Temp- ja Euro 6d -luokat edellyttävät henkilöauton RDE-testausta, jossa ajetaan varsinaisessa liikenteessä. RDE-mittauksen tulos saa olla suurempi kuin päästönormi tietyllä kertoimella, koska mittauksen epävarmuudet otetaan huomioon. Tämä vastaavuuskerroin (engl. "conformity factor") on NO_x:ille Euro 6d-Temp -luokassa 2,1 ja Euro 6d:ssä (alkaen 2021) 1,43, ja hiukkasten lukumäärälle kerroin on 1,5 (Euroopan komissio 2019).

Sveitsissä Zürichissä tutkittiin henkilöautojen NO_x-päästöjä optisen etämittauksen avulla. Mittausten aikana liikenne toimi normaalisti Zürichin keskustassa. Kunkin auton mitattu päästö liitettiin auton tyyppihyväksyntä-Euro-luokkaan rekisterinumeron etäluennan avulla. Dataa on kertynyt yhteensä 13 vuodelta ja havaintoja noin 130 000 ohituksesta. Tulokseksi saatiin, että bensiiniautot täyttävät likimain rekisteröintivuotenaan käytössä olleet Euro-normit. Dieselautojen NO_x-päästöt olivat vuosimallista 1995 alkaen suuremmat kuin kulloinkin voimassa olleet päästönormit. Ero johtuu ainakin osittain siitä, että mittausta paikka sijaitsee mäessä, jossa tarvitaan runsaasti tehoa. Todellisessa tilanteessa esiintyvä kuormitus on tutkimuspaikalla paljon vaihtelevampi kuin dynamometrillä tehdyssä päästöttestauksessa (Chen ja Borken-Kleefeld 2014).

Typen oksidien osalta tyyppitestauksen ja todellisissa tilanteissa mitattujen päästöjen ero on havaittu myös muissa tutkimuksissa. 2010-luvun alkupuoliskolla Britanniassa arvioitiin, että 90 % silloisista uusista dieselautoista ylitti senhetkisen uusimman normin vaatimukset moninkertaisesti (Brand 2016). Kesällä 2018 Pariisin keskustassa tehtyjen etämittausten perusteella (180 000 havaintoa) Euro 6 -sertifioitujen dieselhenkilöautojen NO_x-päästöt ylittivät lähes viisinkertaisesti Euro 6 -luokituksen. Euro 6d-temp -luokitettujen autojen päästöt olivat noin 70 % pienempiä kuin muiden Euro 6 -dieselautojen (True 2019).

Mittauksissa havaittu ero dieselautojen Euro-luokan ja varsinaisen NO_x-päästön välillä on lisätty myös EEA:n päästökertoimien kokoelmaan. Esimerkiksi kun tarkastelun kohteena ovat vuonna 2016 rekisteröidyt ja sitä vanhemmat auto, nopeudella 120 km/h NO_x-päästökseen tulee seitsenkertainen arvo verrattuna Euro 6 -luokan testi-vaatimukseen. Nopeudella 80 km/h vastaava ero on viisinkertainen. Uudempien Euro 6 -dieselautojen NO_x-päästöjen on oletettu olevan lähempänä Euro-vaatimuksia, mutta päästöt ovat edelleen vähintään kaksinkertaiset normiin verrattuna. Varhaisempien Euro-luokkien dieselautot tuottavat normiinsa verrattuna vähemmän NO_x:eja mutta absoluuttisesti selvästi enemmän kuin Euro 6 -autot (EMEP/EEA 2016).

4.2.3 Hiukkaset

Hiukkasten luokittelu perustuu niiden kokoon (Taulukko 3). Pienemmät kokoluokat sisältyvät suurempiin; esimerkiksi hengitettävät hiukkaset (PM₁₀) sisältävät pienhiukkaset (PM_{2.5}). Ympäristölainsäädännössä keskitytään hengitettäviin hiukkasiin ja pienhiukkasiin ja niiden massapitoisuuksiin (µg/m³), joille on asetettu terveysperusteisia ilmanlaadun raja- ja ohjearvoja (VNa 2017/79, VNp 1996/480). Hengitettävät hiukkaset kulkeutuvat hengitysilman mukana keuhkoihin ja pienhiukkaset keuhkorakkuloihin asti. Pienhiukkasia pidetään nykyään hyvin merkittävänä terveyshaittojen lähteenä (Silva ja muut 2013). Hyvin pieniä hiukkasia kutsutaan nanohiukkasiksi,

mutta niiden raja-alue vaihtelee eri aloilla ja tutkimuksissa. Koon yläraja voi olla esimerkiksi 50 nm tai 100 nm, tai kokoa ei ole rajattu yksiselitteisesti (esim. EPA 2004, Qian ja muut 2019, Verma ja muut 2019, Muñoz ja muut 2016).

Kaikkien pienimpien hiukkasten osuus kokonaisleijumasta on hyvin pieni massapitoisuutena tarkasteltuna ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Tämän vuoksi niiden pitoisuudet ilmaistaan useimmiten lukumääräpitoisuutena (PN) eli hiukkasten lukumäärä kuutiosenttimetrissä (kpl/cm^3 , $\#/\text{cm}^3$). Toinen mahdollisuus on ilmaista hiukkasten määrä ilmoittamalla niiden pinta-ala. Ultrapienten ja nanohiukkasten terveysvaikutukset ovat EU:ssa ja maailmalla suuren mielenkiinnon kohteena.

Taulukko 3. Hiukkaskokoluokkia.

Lyhenne	Aerodynaaminen halkaisija	Nimitys
TSP	kaikki ilmassa leijuva pöly	hiukkasten kokonaisleijuma
PM₁₀	enintään 10 μm	hengitettävät hiukkaset
PM_{2.5}	enintään 2,5 μm	pienhiukkaset
PM₁	enintään 1 μm	–
PM_{0.1}	enintään 0,1 μm (100 nm)	ultrapienet hiukkaset

Hiukkaset ovat ensisijaisesti kokoava termi, joka sisältää kaikki eri tavoin muodostuneet partikkelit. Hiukkasten fysikaalis-kemialliset ominaisuudet vaihtelevat merkittävästi niiden päästölähteen ja alkuperän perusteella. Karkeimmat hiukkaset (halkaisija 2,5–10 μm) ovat pääasiassa peräisin maaperästä, kun taas pienemmät ovat peräisin erilaisista päästölähteistä, mukaan lukien polttoperäiset päästöt. Tuoreet, vastamuodostuneet hiukkaset ovat kaikkein pienimpiä, hiukkasen koon ollessa pienempi kuin 0,1 μm halkaisijaltaan. Ilmakehässä tapahtuvien reaktioiden ja ikääntymisen johdosta hiukkasten koko kasvaa.

Yleensä polttoperäisiä hiukkasia ei ole enää 2,5 μm halkaisijaltaan suuremmissa kokoluokissa, mutta niitä voi olla kertyneenä vähäisiä määriä suurempien hiukkasten pinnoille. Esimerkiksi liikenne tuottaa polttoperäisiä hiukkasia pakokaasupäästöinä, ja ne voivat syntyä palamattomasta polttoaineesta, epätäydellisesti palaneen polttoaineen muodostamasta hiilestä tai moottorin osien kulumisesta. Tämän lisäksi liikenteessä syntyy päästöjä, jotka eivät ole peräisin polttoprosessista. Niihin kuuluvat muun muassa jarrujen, renkaiden ja tienpinnan kulumisesta muodostuneet hiukkaset (Thorpe ja Harrison 2008). Päästöksi voidaan lukea myös resuspensio, eli renkaiden ja ilmapinnan vaikutuksesta tienpinnasta ilmaan nousseet hiukkaset.

Taulukko 4. Eri kokoisten hiukkasten lähteitä (Lähde: EPA 2004).

Karkeat hiukkaset (2,5–10 μm)	Pienhiukkaset (0,1–2,5 μm)	Ultrapienet hiukkaset (< 0,1 μm)
Teollisuudesta peräisin olevan ja tiepölyn resuspensio Maaperä Renkaiden, jarrujen ja tienpinnan kuluminen Tuhka kontrolloimattomasta palamisesta Meren pärskeet Biologiset lähteet	Hiilen ja öljyn palaminen Bensiinin ja dieselöljyn palaminen Biomassan polttaminen Korkean lämpötilan prosessit Muutonta ilmakehässä	Palaminen Korkean lämpötilan prosessit Muutonta ilmakehässä Biologiset lähteet

Nyky aikaisten autojen PFI-moottorin hiukkaspäästöt ovat kylmäkäynnistyksessä enintään puolet GDI-moottorin vastaavista. Todellisia ajotilanteita kuvaavissa, lämpimissä testioloissa (RDE) PFI-tekniikan päästöt (alle 0,1 mg/km) olivat murto-osa GDI:n vastaaviin (0,9–1,3 mg/km) verrattuna. Kylmien olosuhteiden testeissä hiukkaspäästö oli suurempi, mutta havainto oli sama (PFI 2,5 mg/km; GDI 13 mg/km) (Qian ja muut 2019, Aakko-Saksa ja muut 2017).

Nykyiset bensiiniautot tuottavat vähintään yhtä paljon nanohiukkasia kuin dieselautot. Etanoli- ja kaasukäyttöisten henkilöautojen nanohiukkaspäästöjä ei ole tutkittu riittävästi. Uusien bensiinimoottorien ja käyttövoimien aiheuttamien nanohiukkasten terveysvaikutukset eivät ole tiedossa (Hakkarainen ja muut 2019 (julkaisematon käsikirjoitus), Platt ja muut 2017).

Biodieselin käyttö polttoaineena vähentää moottorin hiukkaspäästöjä. Täyden biodieselin (B100) käyttäminen voi vähentää päästöjä 25–80 %. Pienemmillä sekoitussuhhteilla päästöjen vähenemä oli pienempi, mutta B20-laadullakin yleensä vähintään 10 %. (Agarwal ja muut 2015)

Uudet dieselhenkilöautot täyttävät Euro 5 -luokan tai uudemman vaatimukset (ks. Taulukko 2). Niiden hiukkaspäästöt ovat usein pienempiä kuin bensiinikäyttöisten, uusien henkilöautojen päästöt, koska ne on varustettu hiukkassuodattimella (DPF). Tämä koskee sekä primaarista hiukkaspäästöä että sekundaarista aerosolinmuodostusta. Uusien dieselautojen hiukkaspäästö ja hiukkasten ominaisuudet muistuttavat läheisemmin maakaasulla toimivan polttomoottorin hiukkaspäästöä kuin aikaisemman dieselmootorin (Platt ja muut 2017, Karjalainen ja muut 2016, Hesterberg ja muut 2011).

Suurissa kaupungeissa voi ilmassa esiintyvistä PM_{2.5}-kokoluokan hiukkasista olla neljännes peräisin liikenteestä. Luku sisältää pakokaasupäästöt sekä renkaiden, tienpinnan ja jarrujen kulumisen sekä pölyn resuspension tienpinnasta (Panko 2019).

Autoliikenteen päästöt tuottavat myös sekundaarisia hiukkasia eli aerosoleja (SOA), jotka muodostuvat haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (VOC) hapettua ilmassa. Hapettuneiden yhdisteiden kyllästymishöyrnpaine on usein pienempi kuin alkuperäisen yhdisteen, jolloin ne kerääntyvät nanohiukkasiksi ja edelleen suuremmiksi hiukkasiksi koagulaatio- ja kondensaatioprosesseissa. Kokonais-SOA, joka ei ole pelkästään peräisin liikenteestä, muodostaa huomattavan osan pienhiukkasista; osuus voi olla 20–90 % (Gentner ja muut 2016, Karjalainen ja muut 2016). Osa SOA:sta on peräisin luonnollisista lähteistä, kuten havupuiden ilmaan vapauttamista terpeeneistä muodostuneita.

Nanohiukkasten lukumääräpitoisuudessa liikenneväylän läheisyydessä on havaittu huippu noin 10 nm:n koossa Suomessa tehdyissä mittauksissa. Toinen kokohuippu on havaittu koossa 30–40 nm. Tämä huippu havaittiin sekä aamulla että iltapäivällä tehdyissä mittauksissa (Kangasniemi ja muut 2019).

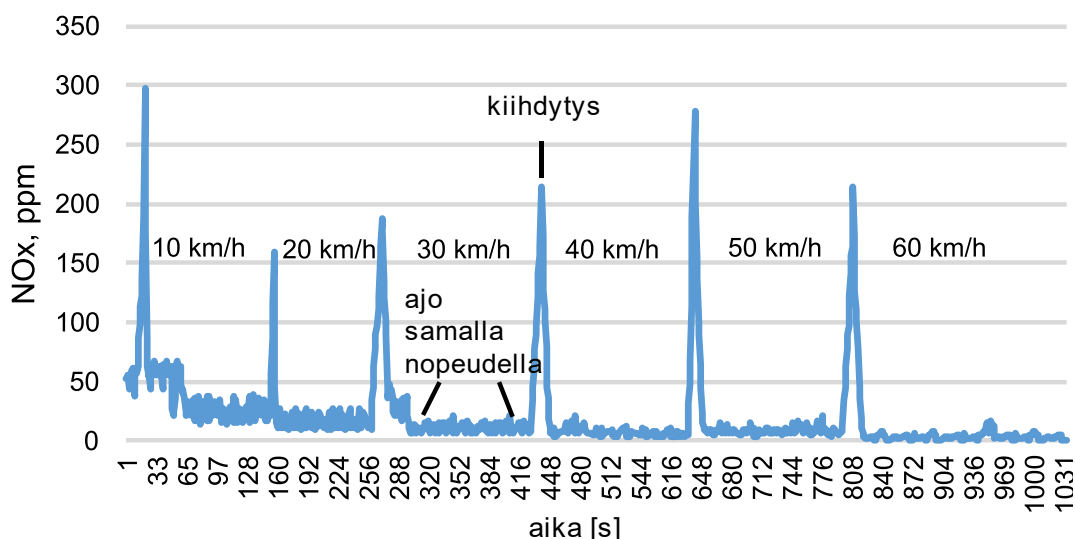
4.2.4 Typen oksidit (NO_x)

Typpi muodostaa hapen kanssa useita oksideja. Ilmanlaadusta puhuttaessa typen oksidit eli NO_x on yhteisnimitys kahdelle typen oksidille: typpioksidille (NO) ja typpidioksidille (NO₂). Näistä ilmanlaadun raja- ja ohjearvot on asetettu typpidioksidille, koska se on haitallisempi terveyden kannalta. Typen oksideihin kuuluu myös dityppi-

oksidi eli typpioksiduuli (N_2O), mutta sillä ei ole ulkoilmassa esiintyvissä pitoisuuksissa merkittäviä terveysvaikutuksia. N_2O :lla on silti merkitystä ympäristön kannalta, koska se on voimakas kasvihuonekaasu ja se hajottaa otsonia yläilmakehässä.

Typen oksideja syntyy palamisen yhteydessä. Ilman typpi reagoi hapen kanssa korkeassa lämpötilassa, jolloin syntyviä typen oksideja kutsutaan termisiksi typen oksideiksi. Autojen pakokaasussa typen oksidit esiintyvät suurimmalta osin NO :na. Vapauduttuaan NO muuttuu ilmassa NO_2 :ksi reaktiossa otsonin kanssa. Samalla NO_2 hajoaa auringonvalon vaikutuksesta NO :ksi ja hapeksi. Näin ollen NO_2 :n pitoisuuteen vaikuttavat ympäristön otsonipitoisuus ja auringon säteily. (Lozhkina ja Lozhkin 2016)

Katalysaattorilla varustettujen bensiiniautojen pakokaasussa on havaittu suurimmat NO_x -pitoisuudet alhaisilla nopeuksilla, alle 20 km/h, sekä suurilla nopeuksilla, 100–120 km/h. Päästö kasvaa lyhytaikaisesti kiihdytyksen aikana (Kuva 4). Päästöpiikit voivat johtua katalysaattorin toimintaperiaatteesta: katalysaattori pelkistää typen oksidit typpikaasuksi. Katalysaattori toimii tehokkaimmin silloin, kun polttoaine ja happi ovat optimaalisessa suhteessa (stoikiometrinen suhde). Kiihdytyksen aikana hapen syöttö lisääntyy, minkä takia NO_x :n pelkistyminen tulee epäedullisemmaksi. Koska päästö kasvaa ajettaessa hitaasti sekä kiihdytettäessä, tällä on merkitystä asuinalueilla sekä erityisesti ruuhkatilanteissa (Lozhkina ja Lozhkin 2016).



Kuva 4. Pakokaasun NO_x -pitoisuuden vaihtelu alhaisilla nopeuksilla (bensiinikäyttöinen auto). Kiihdytettäessä päästö kasvoi lyhytaikaisesti (alkuperäinen kuva Lozhkina & Lozhkin 2016).

Vanhempien dieselautojen kohdalla NO_x -päästöt kilometriä kohti voivat kasvaa henkilöauton ikääntyessä ja puhdistuksen tehon heikentyessä. Päästöjen kasvu 80 000 ajokilometrin jälkeen Euro-luokissa 2 ja 3 olivat vastaavasti 22 % ja 10 %. Sen sijaan Euro 4 -luokassa päästöt pysyivät lähes samana (Chen ja Borken-Kleefeld 2016). Euro 5- ja Euro 6 -luokkien mahdollista NO_x -päästöjen kasvua ajoneuvon ikääntyessä ei ole tutkittu.

Uudet, Euro 6d -luokan dieselaudit voivat tuottaa selvästi vähemmän typen oksideja kuin luokan päästöraja 80 mg/km. Eräillä automalleilla päästö menee jopa tasolle 1 mg/km myös lämpötiloissa 0–10 °C, ja useimmiten päästö on pienempi kuin 40 mg/km. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että SCR-puhdistus toimii hyvin myös viileissä olosuhteissa (ADAC 2019).

FAME-biodieselin käyttö voi lisätä dieselmoottorin NO_x-päästöjä. Tämä johtuu mahdollisesti siitä, että biodiesel palaa korkeammassa lämpötilassa kuin tavallinen dieselöljy sekä polttoaineen rakenteesta: metyyliestereissä on kemiallisesti sitoutuneena happea, joka reagoi korkeassa lämpötilassa typen kanssa (Damanik ja muut 2018).

Lisäaineilla voidaan vähentää dieselmoottorin NO_x-päästöjä, ja mahdolliset vähenykset ovat tyypillisesti 10–20 %:n luokkaa. Toinen mahdollisuus on käyttää uudenlaista tekniikkaa, jossa moottori käy matalammassa lämpötilassa (LTC, low-temperature combustion) ja saavutettu päästövähennys on ollut jopa 50 %:n luokkaa. LTC-tekniikka ei ole vielä yleisesti käytössä. Muita mahdollisia päästön vähentämisen tekniikoita ovat moottorit, joissa polttoaineen ruiskutusta on myöhäistetty, sekä pakokaasun kierrättäminen sylintereiden kautta (E ja muut 2017, Fiebig ja muut 2014).

Uuden sukupolven biopolttoaineet eivät yleensä sisällä happea. Tämän vuoksi niiden NO_x-päästöjen arvioidaan olevan alemmalla tasolla kuin perinteisen biodieselin (FAME-koostumus).

Maakaasun NO_x-päästöt ovat pienemmät kuin vastaavilla dieselautoilla. Dieselin päästöihin verrattuna maakaasun käyttö tuottaa keskimäärin 80–90 % vähemmän NO_x:ja (Vojtíšek-Lom ja muut 2018).

Bensiinautoihin verrattuna maakaasun käyttö voi tuottaa hieman enemmän NO_x-päästöjä. Tämä johtunee siitä, että moottorissa polttoaineseos on suhteessa laihempaa ja palaminen tapahtuu korkeammassa lämpötilassa kuin bensiinillä (Huang ja muut 2016).

Todellisissa ajotilanteissa mitattujen dieselhenkilöautojen NO_x-päästöjen on havaittu lisääntyvän kuumassa säässä. Lämpötilan noustessa yli +30 °C:een, Euro 5 autojen NO_x-päästöt nousivat +20–30 °C lämpötilassa mitattuihin verrattuna 20 % suuremmiksi ja Euro 6 autojen 30 % suuremmiksi (True 2019). Suomessa yli +30 °C:n lämpötilat ovat suhteellisen harvinaisia, mutta kuumen sään jaksot voivat yleistyä ilmaston lämmittäessä.

4.2.5 Rikkidioksidi (SO₂)

Rikkidioksidia (SO₂) syntyy, kun rikkipitoinen aine palaa. Autojen tuottamat SO₂-päästöt ovat nykyään alhaiset, koska polttoaineiden rikkipitoisuus on alhainen. Sähköntuotanto ja polttoaineiden jalostaminen voivat tuottaa rikkidioksidia, mutta näiden toimintojen tuottamia päästöjä ei lueta liikenteen lähipäästöihin. Biopolttoaineissa on vain vähän tai ei ollenkaan rikkiä, ja niiden tuottamat rikkidioksidipäästöt arvioidaan merkityksettömiksi.

4.3 Muut kuin pakokaasuperäiset päästöt

4.3.1 Jarrujen kuluminen

Jarrujen kuluminen tuottaa hiukkaspäästöjä. Jarrujen kuluvien osien (jarrupalojen ja niiden kitkapinnan sekä jarrulevyjen) koostumus vaihtelee suuresti, eikä kokonaiskuluvan saaminen hiukkasten kokojakaumasta tai koostumuksesta ole mahdollista. Lisävaikutena on eri tutkimusmenetelmien käyttö päästöjä määritettäessä (Grigoratos ja muut 2015). Yleissilmäyksen saamiseksi jarrujen kulumisessa muodostuvien hiukkasten vaihtelevaan koostumukseen on valaisevaa ottaa katsaus aiheeseen.

Jarrupalat ja niiden kitkapinnat koostuvat yleisesti viidestä pääkomponentista: sidosaineesta, kuiduista, täyteaineesta, voiteluaineesta ja kitka-aineesta. Sidosaaineet pitävät jarrupalan koossa ja muodostavat 20–40 % jarrupalan massasta, ja ne valmistetaan fenoli-formaldehydihartsista. Kuidut vahvistavat jarrupalaa, ja niiden osuus on 6–35 %. Ne koostuvat enimmäkseen kuparista, teräksestä, messingistä, titaanin yhdisteistä, lasista, orgaanisista materiaaleista tai kevlarista. Täyteaineiden (osuus jarrupalan massasta keskimäärin 20–40 %) tarkoitus on parantaa jarrupalan lämpö- ja meluominaisuuksia. Niitä valmistetaan epäorgaanisista yhdisteistä (bariumsulfaatti, antimonisulfaatti, magnesiumoksidi, kromi(III)oksidi), silikaateista, jauhetusta metalliteollisuuden kuonasta, kiviaineksesta ja metallijauheista. Voiteluaineet (osuus 5–29 %) valmistetaan grafiitista tai esim. kumijauheesta tai metallihiukkasista. Kitkaaineet lisäävät jarrutustehoa nimensä mukaisesti lisäämällä kitkaa, ja ne muodostavat yleensä enintään 10 % jarrupalan massasta. Yleisiä kitka-aineita ovat alumiinioksidi, raudan oksidit, kvartsi ja zirkoni (Grigoratos ja muut 2015, Kole ja muut 2017).

Henkilöautoissa on käytössä enimmäkseen kolmea eri tyyppiä olevia jarrupaloja: asbestiton orgaaninen (NAO), korkeametallinen ja vähämetallinen. NAO-jarrupalat ovat suhteellisen pehmeitä. Niiden etu on pieni meluntuotto, mutta ne tuottavat enemmän hiukkaspäästöjä kuin muut tyypit ja jarrutusteho pienenee palojen kuumentuessa. Korkeametallisissa jarrupaloissa jopa 65 % massasta koostuu metalleista; jarrutusteho on hyvä myös korkeissa lämpötiloissa mutta ne tuottavat runsaasti melua ja kuluttavat jarrulevyjä. Vähämetalliset jarrupalat sisältävät metalleja 10–30 % massasta (Euroopan komissio 2014, Grigoratos ja muut 2015, Hagino ja muut 2016).

Jarrujen kulumisesta aiheutuvat hiukkaspäästöt muodostavat merkittävän osan liikenteen PM₁₀-päästöstä. Eräissä tutkimuksissa on raportoitu jopa 55 % kaupunkiliikenteen PM₁₀-päästöstä olevan jarruista peräisin. Yleensä raportoitu osuus on ollut selvästi pienempi, 10–20 %. Kaikki kulumisessa muodostuvat hiukkaset eivät vapaudu ilmaan eivätkä siten muodosta päästöä. Arvio on, että enintään noin 50 % jarrujen kulumisen seurauksena syntyneistä hiukkasista muodostaa päästön lopun jäädessä tienpintaan (Euroopan komissio 2014, Grigoratos ja muut 2015, Hagino ja muut 2016).

Jarrujen hiukkaspäästöjen kokojakauma vaihtelee laajoissa rajoissa. Riippuen jarrupalojen tyypistä, jarrujen lämpötilasta sekä mittauksista PM₁₀-kokoluokassa (joka sisältää PM_{2.5}:n) on havaittu enimmillään 86 % ja PM_{2.5}-luokassa 63 % hiukkasmassasta. Kuitenkin hiukkasmassasta jopa kolmasosa on joissain tutkimuksissa ollut kooltaan alle 0,1 µm:n hiukkasia. Tämä tarkoittaa, että huomattava osa jarrujen kulumisessa muodostuvista hiukkasista voi olla pieniä. Kokojakauman huippu riippuu jarrupalojen tyypistä ollen tyypillisesti 2–6 µm. Jarruista peräisin olevien hiukkasten metallisisältö vaihtelee laajoissa rajoissa (Taulukko 5). Yleisin metalli on rauta, jota on keskimäärin 10–30 % PM₁₀:n massasta. Antimonia, kuparia ja bariumia on käytetty mittauksissa jarrupölyn indikaattoreina, koska jarrujen kulumisen on niiden merkittävimpiä lähteitä. Bariumia voi olla NAO-jarrupalan kokonaismassasta noin 30 %, koska bariumsulfaatti on yleinen täyteaine (Grigoratos ja muut 2015, Hagino ja muut 2016, Nosko ja muut 2016).

Taulukko 5. Jarrupölyssä havaittujen metallipitoisuuksien vaihteluvälejä. Arvot on koottu useista eri mittauksista ja usean eri tyyppisistä jarrupaloista. Sulkeissa olevat luvut tarkoittavat pitoisuuksia PM₁₀-fraktiossa (Grigoratos ja muut 2015).

Metalli	Kemiallinen merkki	Pitoisuus jarrupölyssä [mg/kg]
Alumiini	Al	330–20 000
Antimoni	Sb	4,0–19 000
Arseeni	As	<2,0–110
Barium	Ba	(5800)–140 000
Kadmium	Cd	<0,06–11
Kalium	K	190–39 000
Kalsium	Ca	500–8 600
Koboltti	Co	12–42
Kromi	Cr	140–12 000
Kupari	Cu	70–210 000
Lyijy	Pb	4,0–1 300
Magnesium	Mg	(1700)–83 000
Mangaani	Mn	520–5 600
Molybdeeni	Mo	5,0–740
Natrium	Na	80–(5 100)
Nikkeli	Ni	80–730
Rauta	Fe	1 300–637 000
Sinkki	Zn	120–27 000
Tina	Sn	230–2 600
Titaani	Ti	100–110 000

Jarrujen kuluessa ja kuumentuessa muodostuu myös nanokokoisia hiukkasia. Nano-hiukkasten lukumäärässä kaikkein pienimpiä hiukkasia (noin 3 nm) on eniten sekä vähämetallisille että NAO-jarrupaloille, kun jarrupalan lämpötila on yli +160 °C. Toisen huippu on noin 11 nm:n hiukkasilla. Valurautaisella vertailupalalla kokojakauma oli kaksihuippuinen, ja huiput olivat alle 8 nm ja yli 100 nm (Nosko ja muut 2016). Hiukkaspäästön on havaittu olevan taustatasolla, kun jarrulevyn lämpötila on alle +160 °C (Mathissen ja muut 2018).

4.3.2 Renkaiden ja tienpinnan kuluminen

Renkaiden ja tienpinnan kulumisesta aiheutuvia hiukkaspäästöjä on vaikea erottaa toisistaan. Niistä voidaan käyttää yhteistä termiä TRWP (tyre and road wear particles). Tutkimusten perusteella enintään 10 % TRWP:stä on PM₁₀-kokoluokassa hiukkasten läpimitan ollessa yleisesti 65–85 µm. Tällaiset suuret hiukkaset eivät merkittävästi siirry ilmaan leijumaksi (Pohrt 2019).

On arvioitu, että henkilöauton yksi rengas kuluu kaikkiaan 1,4 kg yhteensä 50 000 kilometrin matkalla. Tästä saadaan henkilöauton renkaistaan menettämäksi massaksi vuotuisella ajosuoritteella (17 000 km) yhteensä 1,9 kg. Tämä arvio perustuu renkaiden kokonaiskulumiseen, eikä kaikki siitä siirry hiukkasina ilmaan (Pohrt 2019). Muut arviot ovat antaneet samansuuntaisia tuloksia, ja niiden mukaan henkilöauton renkaat kuluisivat vuodessa mainitulla keskimääräisellä suoritteella yhteensä 0,8–2,2 kg (Kole ja muut 2017).

Autonrenkaiden koostumus vaihtelee suuresti. Renkaat koostuvat käytännössä kumista, täyteaineista, vulkanisointiaineista, vanhentumista estävistä aineista ja pehmittimistä. Suurin osa renkaan kulutuspinnoista koostuu erilaisista kumilaaduista kuten luonnonkumin kopolymeereista, polybutadieenikumista, styreeni-butadieenikumista, nitridikumista, neopreenikumista, isopreenikumista tai polysulfidikumista. Henkilöautojen renkaat koostuvat tyypillisesti luonnonkumista (40 %), styreeni-butadieenikumista (30 %) tai butadieenikumista (20 %) (Euroopan komissio 2014).

Kumiin lisätään täyteaineita, jotta rengas olisi riittävän kova ja kestäisi paremmin kulutusta. Yleinen täyteaine on hiilimusta, mutta muut täyteaineet (hiili-piidioksidi kaksifaasitäyte, nanorakenteinen hiilimusta) ovat korvaamassa sitä. Vaihtoehtoisten täyteaineiden käytön tavoitteena on vähentää vierimisvastusta ilman että renkaan lujuus ja kestävyys kärsisivät. Vulkanisointiaineet (rikki, seleeni, telluuri, tiatsolit, orgaaniset peroksidit, nitro-yhdisteet) muodostavat noin 1 % renkaan kumimassasta, ja niiden tarkoitus on parantaa kumin kestävyttä. Vulkanisointiprosessissa käytetään lisäksi kiihdyttimiä (lyijy, magnesium, sinkki, rikkiyhdisteet ja kalsiumoksidi) ja hidastimia (terpeenihartsit-haposeokset) (Euroopan komissio 2014).

Renkaihin voidaan lisätä vanhenemista hidastamaan säilöntäaineita (halogenoituja sykloalkaaneja), hapettumisenestoaineita (amiineja, fenoleita), antiotsonantteja (diamiineja ja vahoja) sekä kuivausaineita (kalsiumoksidi). Pehmittimien tarkoitus on tehdä renkaasta joustavampi ja parantaa tarttumista tienpintaan. Aikaisemmin pehmittimien jatkeaineen pääkomponentti oli korkea-aromaattinen öljy (HAO), joka sisälsi huomattavia määriä PAH-yhdisteitä. EU on asettanut ylärajan jatkeaineen PAH-pitoisuudelle vuodesta 2010 alkaen. EU:n ulkopuolella valmistettujen renkaiden PAH-sisältö voi ylittää asetetun rajan (Euroopan komissio 2014).

Renkaiden päästöt ja päästöjen vaikutukset riippuvat renkaiden koostumuksesta. Koska renkaiden koostumus ja kulumisen vaihtelevat hyvin laajoissa rajoissa, täsmällisten vaikutusten arviointi on hyvin haastavaa. Renkaiden kulumisen aiheuttamista hiukkaspäästöistä on tutkimustietoa suhteellisen hyvin saatavilla yleisellä tasolla.

Renkaiden kulumisen on suurimmillaan kiihdytysten aikaan ja kun sivuttaissuuntainen voima on maksimissaan. Näin tapahtuu erityisesti lähdettäessä liikkeelle liikennevaloista ja käynnösten aikana. Huomattava osa rengasperäisistä hiukkasista syntyy siis taajamissa risteysten läheisyydessä (Pohrt 2019).

Renkaiden kulumisen tuottaa myös ultrapieniä hiukkasia. Ultrapienien hiukkasten kokojakauman maksimi on talvirenkaalle (kitkarengas) luokkaa 10–20 nm (0,01–0,02 µm). Hitailla nopeuksilla ja kuorman kasvaessa jakaumasta voi tulla kaksihuippuinen, maksimien ollessa noin 7 nm ja 22 nm (Foitzik ja muut 2018). Jotkin rengas-materiaalit kuten rengaspolymeerit tai jatkeaineena käytettävät öljyt voivat höyrystyä kulumisen yhteydessä. Ne lopulta tiivistyvät pieniksi hiukkasiksi, eli ne ovat sekundaarisia orgaanisia aerosoleja (SOA). Höyrystynyt osa voi sisältää haitallisia yhdisteitä kuten PAH-yhdisteitä (Aatmeeyata ja Sharma 2009, Kumar ja muut 2013).

Nastarenkaat tuottavat enemmän hiukkaspäästöjä tienpinnan kulumisen takia kuin nastattomat, mutta lisäys riippuu luonnollisesti renkaan ja nastojen ominaisuuksista. Mahdollinen lisäys riippuu nopeudesta ollen taajamanopeuksissa noin 1,5-kertainen. Suuremmilla nopeuksilla kerroin kasvaa (Kupiainen ja Pirjola 2011, Pant ja muut 2013). Ruotsissa tehdyissä mittauksissa arvioitiin, että nastarenkaat kuluttaisivat

tienpinnasta hiukkasia keskimäärin kaikkiaan 2700 mg/km. Tästä arvioitiin PM₁₀-luokkaan kuuluvan vain 30 mg/km eli vähän yli 1 % (Ferm ja Sjöberg 2015).

4.3.3 Mikromuovit

Mikromuovit ovat hienoksi jauhautunutta muovia tai muuta samankaltaista polymeeria. Ne eivät ole yksikäsittäinen epäpuhtaus, vaan termi tarkoittaa kaikkia, fysikaalisilta, kemiallisilta ja toksikologisilta ominaisuuksiltaan erilaisia polymeereja, jotka esiintyvät pieninä hitusina. Tämän vuoksi mikromuovien muodostuminen, hajoaminen ja vaikutukset ympäristöön sekä ihmisiin vaihtelevat suuresti (Rochman ja muut 2019).

Kiinnostus mikromuovien aiheuttamiin mahdollisiin haittoihin on kasvanut viime vuosina. Mikromuoveja esiintyy nykyisin hyvin laajalti ympäristössä, ja niitä on havaittu myös ihmisen ravinnossa kuten joissain simpukoissa sekä teessä, joka on haudutettu käyttäen muovisia teepusseja (Hernandez ja muut 2019). Ne voivat aiheuttaa vesieläöille fysikaalisia ja kemiallisia vaaroja. Mikromuovien mahdolliset vaikutukset ihmisiin ovat toistaiseksi epävarmoja.

Mikromuovin koko määritellään eri lähteissä eri tavalla. Norjassa enintään yhden millimetrin eli alle 1000 µm:n kokoiset kappaleet on luettu mikromuoveihin (NIVA 2019). Tanskalaisessa tutkimuksessa mikromuovin rajana pidettiin alle 5 mm:n (5000 µm) kokoa (Liu ja muut 2019); sama kokoraja on käytössä myös Alankomaissa (RIVM 2015). Myös Yhdysvalloissa ja EU:ssa yleisesti mikromuovin kokoraja on 5 mm (SAPEA 2019).

Autonrenkaiden kumin kuluessa se jauhautuu pieniksi kappaleiksi, joita voidaan kutsua mikromuoveiksi. Norjassa on arvioitu, että yli puolet renkaiden kulumisesta aiheutuvasta hiukkaspäästöstä (kokonaispäästö Norjassa kaikelle tieliikenteelle 7100 t/a) koostuu mikromuovista (Norjassa 4 300 t/a). Myös tiemerkinntöjen maailissa on polymeereja, joten se tuo myös osansa mikromuovikuormitukseen. Lisäksi uusissa päällysteissä voi olla lisäaineena polymeereja asfaltin ominaisuuksia parantamassa, joka kuluu muodostaen mikromuoveja. Muita mikromuovien lähteitä ovat tekonurmet, lentokoneiden renkaat sekä jarrujen kulumisen (NIVA 2019, IVL 2016, Kole ja muut 2017).

Norjalaisen arvion mukaan tiemerkinntöjen kulumisen muodostaa vajaat 5 % renkaiden kulumisen mikromuovimäärästä, ja asfaltin kulumisen muodostaa vain murtoosan tästä. Lentokoneiden pyöristä ja jarrujen kulumisesta tulee vain pieni osa mikromuovien kokonaismäärästä, mutta tekonurmista voi muodostua mikromuoveja jopa 50 % siitä määrästä, joka syntyy renkaiden kulumisesta (NIVA 2019, IVL 2016, Kole ja muut 2017).

Suurin osa renkaiden kulumisen myötä muodostuvista mikromuoveista on kooltaan 50–100 µm, eivätkä ne siten kuulu hengitettäviin hiukkasiin. Tällaiset hiukkaset eivät kulkeudu ilmassa pitkiä matkoja, vaan ne laskeutuvat liikenneväylän läheisyyteen. On arvioitu, että enintään 30 % näin syntyneistä mikromuoveista kulkeutuu ilmaan. Mikromuoveista arvioidaan 7 % olevan kooltaan 30 µm tai pienempiä ja 5 % 10 µm tai pienempiä (PM₁₀-kokoluokka). Tienpintaan ja pientareelle laskeutuneita mikromuovihiukkasia kulkeutuu ojen kautta vesistöihin sadeveden ja sulavan lumen mukana. Mikromuoveja pääsee vesistöihin myös jätevedenpuhdistamojen kautta (NIVA 2019, Liu ja muut 2019, Kole ja muut 2017).

Renkaiden kulumisesta muodostuneen mikromuovien määrä pienenee jyrkästi etäännyttäessä ajoradasta, siten että se on ollut 5 metrin etäisyydellä noin 80 % aivan tien reunalla mitatusta. Kun etäisyys on 30 metriä, ei mikromuovien pitoisuutta voitu erottaa taustapitoisuudesta (NIVA 2019).

4.3.4 Resuspensio

Resuspensio tarkoittaa tienpinnassa olevien hiukkasten päätymistä uudelleen ilmaan. Renkaiden ja tienpinnan kulumisesta aiheutuvaa päästöä voi olla vaikea erottaa resuspensiosta. Resuspensio vaihtelee hyvin paljon riippuen säästä, tien pintamateriaalista, tienpinnalla olevasta aineksesta, auton massasta, ajonopeudesta, renkaista (kesä, kitka, nasta) ja ajotavasta. Suuret hiukkaset laskeutuvat nopeasti takaisin tielle, joten ne voivat resuspendoitua yhä uudestaan.

Suomessa resuspensio on näkyvimmillään keväällä katupölyn puhdistamisen aikaan: talven aikana kaduille levitetty ja renkaissa jauhautunut hiekka poistetaan. Mukana on myös talvirenkaiden tiestä kuluttama aines. Puhdistustilanteissa kaupunki-ilman hiukkasista huomattava määrä on karkeaa ainesta (kooltaan 2,5–10 µm), joka ei pysy ilmassa kauaa eikä kulkeudu pitkälle (Kupiainen ja Pirjola 2011).

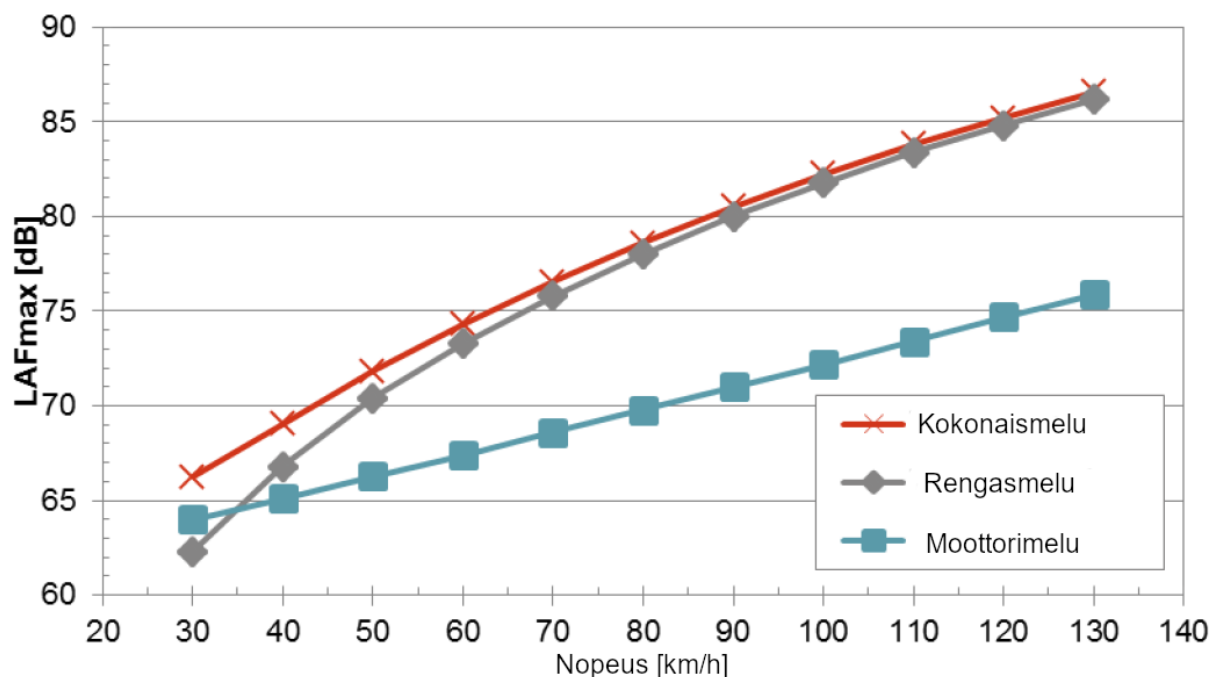
Resuspension päästökertoimien arviointi on erityisen haastavaa, koska siihen vaikuttavia tekijöitä on runsaasti.

5 Henkilöautojen melu

5.1 Ajoneuvojen melupäästö yleisesti

Tavanomaisella moottorilla varustettujen henkilöautojen melupäästö muodostuu useasta eri osalähteestä, ja niiden merkittävyys riippuu mm. ajonopeudesta. Karkeasti osalähteet voidaan jakaa kahteen päälähteeseen: rengasmeluun ja moottorimeluun.

Alla (Kuva 5) on esitetty Nord2000-melumallin mukainen osalähteiden vaikutus kokonaismeluun nopeuden funktiona. Kuvasta voidaan todeta, että rengasmelu muodostaa merkittävän osan kokonaismelusta alkaen jo noin 30 km/h nopeudesta.



Kuva 5. Henkilöautojen moottorimelu, rengasmelu ja kokonaismelu nopeuden funktiona Nord 2000-melumallin mukaisesti (Alkuperäinen kuva Internoise 2013).

5.2 Ajoneuvojen melupäästön lainsäädäntö

5.2.1 Melupäästörajat EU:ssa

EU:n alueella tyyppihyväksyttävien ajoneuvojen melupäästörajat on annettu Euroopan parlamentin asetuksessa (EU) 540/2014 (moottoriajoneuvojen ja varaosaäänenvaimennusjärjestelmien melutasosta, direktiivin 2007/46/EY muuttamisesta ja direktiivin 70/157/ETY kumoamisesta), joka on annettu 16. huhtikuuta 2014. Asetuksella kiristetään ajoneuvojen melupäästöjä vaiheittain vuosina 2016, 2022 ja 2024 (Taulukko 6).

Ensimmäisessä EU:n ajoneuvojen melua säännellessä direktiivissä vuonna 1970 (Direktiivi 70/157/ETY) henkilöautojen melupäästön raja-arvo oli 82 dB. Vuonna 1981 rajaksi asetettiin 80 dB, ja vuonna 1995 74 dB. Uusimman asetuksen mukaan yleisimmän henkilöautoluokan (M₁) melupäästön raja-arvo on tällä hetkellä 72 dB (Taulukko 6).

Taulukko 6. Melupäästön raja-arvot EU asetuksen 540/2014 mukaan (henkilöautot).

Ajo- neu- vo- luokka	Ajoneuvoluokan kuvaus	Melupäästön raja-arvot [dB(A)]		
M	Henkilöiden kuljetukseen tarkoitettut ajoneuvot	Vaihetta 1 sovelletaan uusiin ajoneuvotyyppisiin 1. päivästä heinäkuuta 2016	Vaihetta 2 sovelletaan uusiin ajoneuvotyyppisiin 1. päivästä heinäkuuta 2020 ja ensirekisteröintiin 1. päivästä heinäkuuta 2022	Vaihetta 3 sovelletaan uusiin ajoneuvotyyppisiin 1. päivästä heinäkuuta 2024 ja ensirekisteröintiin 1. päivästä heinäkuuta 2026
M₁	Tehon ja massan suhde $\leq$ 120 kW/1 000 kg	72	70	68
M₁	120 kW/1 000 kg < tehon ja massan suhde $\leq$ 160 kW/1 000 kg	73	71	69
M₂	160 kW/1 000 kg < tehon ja massan suhde	75	73	71
M₃	tehon ja massan suhde > 200 kW/1 000 kg istuimia, kpl $\leq$ 4 Kuljettajan istuimen R-piste $\leq$ 450 mm maasta	75	74	72

Ajoneuvon melupäästön mittaaminen tehdään yleistäen kuvattuna siten, että mitauspisteet sijaitsevat 7,5 metrin etäisyydellä ajolinjasta (molemmiin puolin), ajoneuvolla kiihdytetään täydellä kaasulla 50 km/h nopeudesta mitauspisteen ohi 20 metrin matka ja suurin meluarvo rekisteröidään. Mittauskertoja on vähintään neljä, ja niiden ero saa olla enintään 2 dB.

5.3 Rengasmelulainsäädäntö

Rengasmelu on ajoneuvojen hallitsevin melulähde yleensä jo noin 40 km/h nopeudesta alkaen. EU pyrkii alentamaan renkaiden melupäästöä, ja raja-arvot sisältyvät vuonna 2009 Euroopan parlamentin ja neuvoston asetukseen 661/2009 moottoriajoneuvojen, niiden perävaunujen sekä niihin tarkoitettujen järjestelmien, osien ja erillisten teknisten yksiköiden yleiseen turvallisuuteen liittyvistä tyyppihyväksyntävaatimuksista.

Henkilöautojen renkaille (rengasluokka C1) melun raja-arvo on 70–74 dB riippuen renkaan nimellislevydestä (Taulukko 7). Vastaavat arvot on annettu myös pakettiautojen (C2) ja kuorma-autojen (C3) renkaille.

Taulukko 7. Luokan C1 (henkilöautot) renkaiden melun raja-arvot (EY 2009).

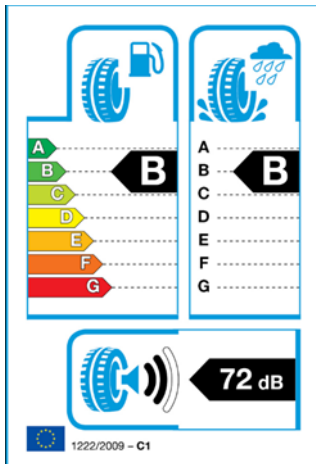
Rengasluokka	Nimellisleveys [mm]	Raja-arvo [dB(A)]
C1A	≤ 185	70
C1B	> 185 ≤ 215	71
C1C	> 215 ≤ 245	71
C1D	> 245 ≤ 275	72
C1E	> 275	74

Talvirenkaiden, extra load -renkaiden ja reinforced-renkaiden tai kaikkien näiden luokitusten osalta edellä mainittuja raja-arvoja on korotettava 1 dB(A).

Huomattava on, että raja-arvot eivät koske nastoitettuja renkaita. Tällä on merkitystä Suomen olosuhteissa, koska nastarenkaat ovat kesärenkaita ja nastattomia talvirenkaita (kitkarenkaita) useita desibelejä (6-10 dB) meluisampia (LVM 2008, Inter-noise 2016). Tämän suuruinen ero koetaan noin melun kaksinkertaistumisena. Myös melun taajuusjakaumassa on eroja. Nastarenkaiden melussa korostuvat erityisesti pienillä nopeuksilla nastojen iskujen aiheuttamat korkeat, yli 6 kHz, taajuudet verrattuna kitkarenkaisiin (Kokkonen 2008). Meluerot ovat suurimmillaan lähietäisyydellä (esim. katu ympäristössä), pitkillä etäisyyksillä ilmakehän aiheuttama absorptio leikkaa korkeataajuisia nastamelua enemmän kuin renkaan muuta melua, jolloin meluero oletettavasti pienenee. Trafin teettämän (Trafi 2015) haastattelututkimuksen mukaan 13 % suomalaisista autoilijoista ajoi talviaikaan kitkarenkailla ja loput 87 % ajoivat nastarenkailla.

EU:n alueella myytäviä renkaita koskee Euroopan parlamentin ja neuvoston (EY) rengasmerkintää koskeva asetus 1222/2009. Merkintä on tullut voimaan 1.11.2012 ja se koskee kaikkia EU:n alueella myytäviä uusia renkaita, jotka on valmistettu 1.7.2012 jälkeen. Asetuksella pyritään lisäämään tieliikenteen turvallisuutta, taloudellisuutta ja ympäristöystävällisyyttä edistämällä sellaisten polttoainetaloudellisten ja turvallisten renkaiden käyttöä, jotka aiheuttavat mahdollisimman vähän melua. Asetuksen määrittelemissä renkaissa pitää joko olla rengasmerkintätarra tai luokitus-tietojen pitää olla myymälässä esillä renkaan lähettyvillä. Esimerkki erään renkaan vakio muotoisesta rengasmerkinnästä on seuraavassa (Kuva 6).

Meluluokitus on merkinnän alaosassa. Se ilmaistaan kolmella kaariviivalla ja desibeli-lukemalla (dB), ja rengasluokka näkyy alareunassa. Esimerkkikuvassa (Kuva 6) on esitetty mustana kaksi kaariviivaa ja lukemana 72 dB. Tämä tarkoittaa, että mittaus-tulos on 72 dB, ja rengas täyttää rengasluokkansa (esimerkissä C1) mukaisen melu-vaatimuksen tai on enintään 3 dB sitä hiljaisempi. Jos rengas olisi vähintään 3 dB hiljaisempi kuin vaatimus, sen merkintä olisi yksi mustattu kaariviiva. Jos melu ylittää vaatimuksen, on mustattuna kaikki kolme viivaa.



Kuva 6. Esimerkki EU-rengasmerkinnästä.

EU:n komissio on antanut toukokuussa 2018 ehdotuksen uudeksi asetukseksi rengasmerkinnöistä, ja samalla asetuksen 1222/2009 kumoamisesta. Rengasmeluluokkien vaatimukset kiristyisivät 3 dB.

Rengasmelulainsäädäntö ei määrittele melutasoja erikseen ajoneuvojen eri käyttövoimille. Kuitenkin esimerkiksi sähköautojen rengastyyppi voi olla erilainen kuin vastaavassa, polttomoottorikäyttöisessä ajoneuvossa. Sähköautoja varten myös kehitetään rengastyyppejä, joiden vierintävastus olisi mahdollisimman pieni. Yksi tapa on kaventaa renkaan leveyttä, mikä rengasmerkintäasetuksen kannalta johtaa pienempään melutasoon.

Sähköautoihin suunniteltavien renkaiden kehitystyö on todennäköisesti tällä hetkellä voimakasta. Norjassa ja Puolassa vuonna 2014 tehtyjen mittausten perusteella sähköautoihin suunniteltujen renkaiden melutaso oli keskimäärin samalla tasolla kuin tavanomaiset renkaat (EURONOISE 2015a, EURONOISE 2015b). EU:n rahoittaman FOREVER-projektin (Impact of low-noise tyres on electric vehicle noise emission) WP3-loppuraportissa todetaan, että sähköautojen tai niille suunniteltujen renkaiden vierintämelu ei eroa tavanomaisten autojen tuottamasta vierintämelusta (IFSTTAR 2015).

5.4 Eri käyttövoimien merkitys melupäästöön

5.4.1 Sähköautot

Tavanomaisilla polttomoottoriautoilla moottoriääni on tutkimusten mukaan vallitseva alle 30 km/h nopeuksilla, ja yli 30 km/h nopeudella rengasmelu muuttuu vähitellen merkittävimmäksi melulähteeksi. Sähköautojen merkitys melutasoihin on siten oletettavasti suurin pienillä, alle 30 km/h nopeuksilla.

Tanskalaisessa tutkimuksessa selvitettiin yhden automallin (Citroën Berlingo) melutasoa, voimanlähteenä polttomoottori ja sähkömoottori (Vejdirektoratet 2015). Sähkömoottorilla varustettu auto oli 10 km/h nopeudella noin 5 dB polttomoottoriautoa hiljaisempi, 30 km/h nopeudella autojen melussa ei ollut enää eroa.

EU:n ympäristömeludirektiivin (2002/49/EY) mukaisissa melumallinnuksissa käytetävän CNOSSOS-EU-melumallin melupäästötietoihin ehdotetaan eräissä tutkimuksessa muutosta, jolloin sähköautojen melupäästö muuttuisi tavanomaisiin polttomoottoriautoihin nähden taulukon (Taulukko 8) mukaisella tavalla (Pallas ja muut

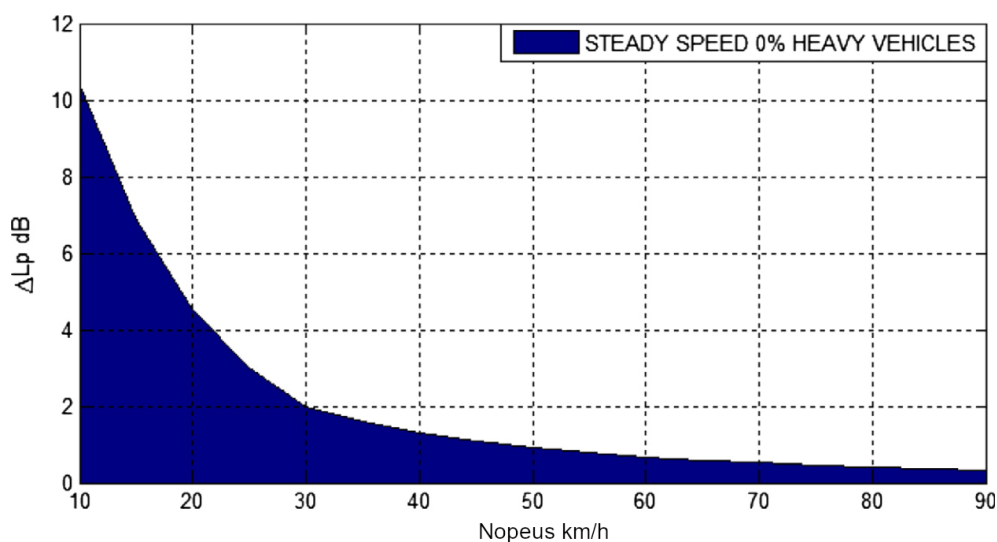
2016). Merkittävä (n. 3 dB) vaikutus on noin 30 km/h asti, siitä ylöspäin merkitys on melko pieni. Noin 1 dB:n vaikutus on 50 km/h nopeudessa.

Taulukko 8. Sähköautojen melutason ero tavanomaiseen polttomoottoriautoon verrattuna, ehdotetun CNOSSOS-EU-melumalliin tehtävän muutoksen vaikutus. (Pallas ja muut 2016)

Nopeus [km/h]	Päällyste		
	Referenssi	SMA-NL8	Thin layer A
20	-5,0	×	×
30	-2,6	×	×
40	-1,6	-1,7	-1,4
50	-1,0	-1,0	-1,0
70	-0,6	-0,7	-0,6
90	-0,5	×	-0,5
110	-0,4	×	-0,4

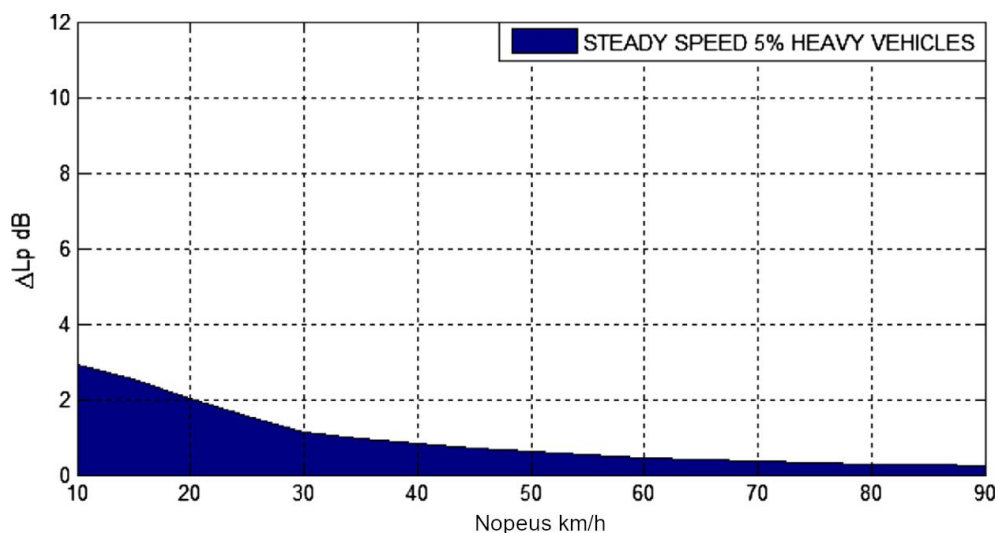
Sähköautojen merkitystä kaupunkien meluvyöhykkeiden laskennassa muodostuviin melutasoihin selvitettiin espanjalaisessa tutkimuksessa, jossa ranskalaista melulas-kentamallin "NMBP ROUTES" melupäästötietoa muokattiin sähköautoja varten siten, että tavanomaisen polttomoottoriauton moottorimelun osuus poistettiin mallista (Campello-Vicente ja muut 2017). Mallilla laskettiin tämän jälkeen melutason muutoksia erilaisissa tilanteissa.

Melutason muutos, jos kaikki polttomoottoriautot korvataan sähköautoilla, eikä tiellä aja lainkaan raskaita ajoneuvoja, on kuvan (Kuva 7) mukainen. Yli 1 dB melutason alenema saavutetaan vielä 40 km/h nopeudella.



Kuva 7. NMBP ROUTES -melumallin mukainen melutason alenema polttomoottoriautoihin nähden ajonopeuden funktiona, kun 100 % tiellä ajavista ajoneuvoista on sähköautoja (vain henkilöautoja). (Alkuperäinen kuva Campello-Vicente ja muut 2017)

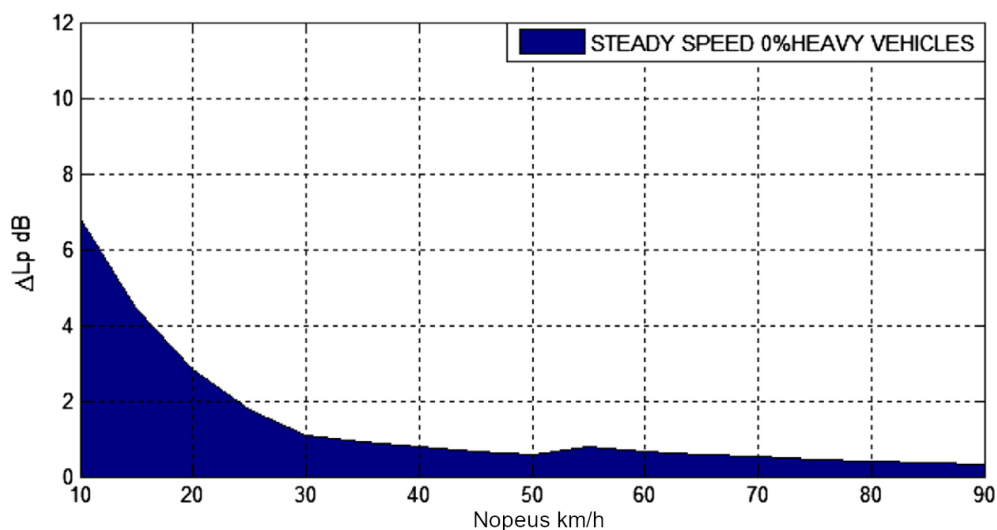
Kuvassa (Kuva 8) on tilanne, kun edelliseen tilanteeseen on lisätty 5 % polttomoottorikäyttöisiä raskaita ajoneuvoja, eli sähköautojen (henkilöautojen) osuus tiellä on 95 %.



Kuva 8. NMBP ROUTES -melumallin mukainen melutason alenema polttomoottoriautoihin nähden ajonopeuden funktiona, kun 95 % tiellä ajavista ajoneuvoista on sähköautoja (henkilöautoja) ja 5 % raskaita ajoneuvoja (polttomoottori). (Alkuperäinen kuva Campello-Vicente ja muut 2017)

Tutkimuksessa selvitettiin myös sähköautoihin liitettävien äänivaroituslaitteiden (AVAS, Acoustic Vehicle Alert System) mahdollista vaikutusta muodostuvaan melutasoon polttomoottoriautojen ja sähköautojen välillä. AVAS-järjestelmä on pakollinen EU:n alueella käyttöön otettavissa sähköautoissa 1.7.2019 alkaen, ja vuodesta 2021 alkaen kaikissa sähköautoissa. Keinotekoinen ääni pienentää sähköautojen ja polttomoottoriautojen välistä melueroa pienillä nopeuksilla.

Tulosten (Kuva 9) perusteella AVAS pienentää saavutettavaa meluhyötyä pienillä nopeuksilla. 30 km/h nopeudella AVAS järjestelmällä varustetut autot ovat noin 1 dB hiljaisempia kuin tavanomaiset polttomoottoriautot. Kuvaa tulkittaessa on huomattava, että tutkimuksessa on todennäköisesti ollut AVAS -järjestelmä käytössä 50 km/h nopeuteen asti, kun lain mukaan järjestelmä saa toimia vain 19 km/h nopeuteen asti.



Kuva 9. NMBP ROUTES melumallin mukainen melutason alenema polttomoottoriautoihin nähden ajonopeuden funktiona, kun 100 % tiellä ajavista ajoneuvoista on AVAS -järjestelmällä varustettuja sähköautoja (vain henkilöautoja). (Alkuperäinen kuva Campello-Vicente ja muut 2017)

5.4.2 Muut käyttövoimat

Muiden polttomoottoritekniikkaan perustuvien käyttövoimien (etanoli, kaasu jne.) merkitys meluntuoton kannalta on hyvin samanlainen bensiiniauton kanssa, koska moottoritekniikka on perusteeltaan samanlaista. Täten ne eivät aiheuta juurikaan mieltävissä olevia eroja melussa verrattuna bensiiniautoihin.

Ladattavien hybridautojen, joissa on sähkömoottorin lisäksi polttomoottori, melutaso riippuu kulloinkin käytössä olevasta moottorista. Sähköllä ajettaessa melutaso vastaa täyssähköauton melua. Myös vetyä (polttokenno) polttoaineena käyttävä tekniikka on meluntuotoltaan sähköauton kaltainen.

5.5 Laajamittaisen autokannan sähköistymisen merkitys melun kannalta

Selvitysten ja tutkimusten pohjalta arvioituna sähköautojen melua alentava vaikutus 30 km/h ajonopeudella on enintään 2 dB ja 50 km/h nopeudella enintään 1 dB, jos tarkastellaan vain sähköautoa verrattuna polttomoottoriautoon. Tavanomaisessa liikennetilanteessa, jossa on 3–10 % polttomoottorilla varustettuja raskaita ajoneuvoja, melun muutos on pienempi.

Alle 30 km/h nopeuksilla saavutetaan suurin hyöty. Esimerkiksi kaupunkien keskustojen valo-ohjatut risteysalueet, joissa polttomoottoriautoissa muodostuu merkittävästi moottorimelua (kiihdytysmelua), voivat hyötyä suhteellisesti eniten sähköautojen osuuden merkittävästä kasvusta. Samoin merkittävästi hyötyviä ovat ne alueet, joissa liikenteen keskinopeus jää selvästi alle 30 km/h, ja raskaan liikenteen osuutta rajoitetaan tai niiden edellytetään olevan vastaavasti vähämeluisia (esim. sähköbusseja). Tällaisia alueita ovat tyypillisesti keskusta-alueiden kadut ja asuntokadut.

AVAS-järjestelmä pienentää hieman sähköautojen meluetua suhteessa polttomoottoreihin 0–20 km/h nopeuksissa.

5.6 Kuljetapasiirtymien vaikutus meluhaittoihin

Yhdyskuntasuunnittelussa pyritään siihen, että yhä suurempi osa asukkaista valitsisi liikkumismuodokseen henkilöauton sijaan joukkoliikennevälineen. Lisäksi pyöräilyn ja kävelyn mahdollisuuksia edistetään. Tällä pyritään siihen, että autoliikenteen määrä saataisiin vähenemään.

Meluhaittojen kannalta tällä on vaikutusta melua alentavasti. Autoliikenteen määrän väheneminen alentaa melutasoa siten, että 10 %:n väheneminen alentaa melutasoa 0,5 dB, 20 %:n väheneminen 1 dB ja 50 %:n väheneminen 3 dB. Jos kuitenkin samalla raskaan liikenteen osuus (esimerkiksi linja-autot) kasvaa merkittävästi, ei melutaso alene yhtä paljon, koska yksi bussi vastaa melultaan useaa henkilöautoa.

Paikallisliikenteen bussien sähköistymisen vaikutusta on selvitetty Stuttgartin kaupungin osalta (Laib ja muut 2019). Tehtyjen mittausten mukaan sähköbussi oli pienellä nopeudella (20 km/h) jopa 14 dB hiljaisempi kuin polttomoottorilla varustettu bussi, 50 km/h nopeudella eroa ei enää ollut. Laaditun melumallin mukaan tavanomaisella tiellä (vuorokausiliikennemäärä 5800) 50 km/h nopeusrajoituksen alueella, jossa bussien nopeus on 30 km/h ja liikenteestä on busseja 10 % ja muuta raskasta

liikennettä 2 %, saavutettiin 1 dB:n päiväaikaisen kokonaismelutason alenema sähköbussien käytöllä. Yöaikainen melutason alenema oli 2 dB, kun bussien osuus kasvoi 14 %:iin.

Vähäliikenteisellä kadulla (vuorokausiliikennemäärä 550 ajoneuvoa), jossa 30 km/h nopeusrajoitus, bussien nopeus 20 km/h ja liikenteestä busseja 6 % ja muuta raskasta liikennettä 0 %, saavutettiin 3 dB:n alenema kokonaismelutasoon. Yöaikainen melutason alenema oli 5 dB, kun bussien osuus kasvoi 17 %:iin.

Tällä perusteella arvioituna bussien sähköistyminen voi vaikuttaa taajama-alueilla vähennystä 1–5 dB keskimelutasoihin, riippuen bussien osuudesta ja muun raskaan liikenteen määrästä. Henkilöautoliikenteen sähköistyminen aiheuttaa lisäksi melutason alenemaa, jota ei Stuttgartin tutkimuksessa otettu huomioon.

6 Päästötietojen arviointi

Laajan kokonaiskuvan saaminen päästöistä kaikille käyttövoimille ei ole mahdollista, koska uusista käyttövoimista ja polttoaineista on saatavilla hyvin rajoitetusti tietoa. Etenkin biokaasulla toimivan henkilöauton päästöille ei ole tutkimustietoa saatavilla. Puhdistetun biokaasun eli biometaanin voidaan arvioida vastaavan maakaasua polttoaineena. Biodieselin päästökokeissa on maailmalla tutkittu FAME-biodieseliä, jota Suomessa on myynnissä vain vähän. Suomessa myytävien biopolttoaineiden aiheuttamia päästöjä ei ollut käytettävissä. Myöskään polttoainekonversion jälkeisten päästöjen mittaustuloksia ei ollut käytettävissä.

Pakokaasupäästöt ovat suhteellisen hyvin tunnettuja ja selvitettyjä etenkin NO_x-päästölle ja hengitettävien hiukkasten massapitoisuudelle. Puutteellisinta tieto on hiukkasten muodostaman kokojakauman kohdalla, koskien uusia moottoritekniikoita ja käyttövoimia.

Dieselhenkilöautojen typen oksidien päästöt ovat pienentyneet uusien Euro-luokkien tullessa käyttöön, mutta todellisissa liikennetilanteissa päästövähennys on ollut pienempi kuin tiukentuneet normit. Tämän vuoksi Euro 4 -dieselautot ja sitä uudemmalla tekniikalla varustetut autot tuottavat kaikissa ajonopeuksissa selvästi vastaavaa Euro-luokan vaatimusta suuremman määrän typen oksideja. Uusimpien Euro 6d -dieselautojen NO_x-päästöjen odotetaan kuitenkin olevan aiempaa pienempiä, ja autosta riippuen ne voivat olla selvästi alhaisempia kuin verrattava Euro 6d -luokitus. Uusien Euro-luokiteltujen bensiinikäyttöisten henkilöautojen NO_x-päästöt ovat lähellä luokan vaatimusta tai jäävät sen alle.

Muut liikenneperäiset päästöt vaihtelevat hyvin laajasti johtuen muun muassa autosta, renkaista, jarruista, päällysteestä ja ajonopeudesta. Niistä voidaan esittää lähinnä suuntaa antavia arvioita. Tulevaisuudessa liikenneperäisten päästöjen tutkimus muodostuu merkittävästi päästöistä, jotka eivät ole peräisin moottorista.

Renkaiden kulumisesta muodostuvien mikromuovien siirtyminen leijumaksi sekä hengitettävien tai pienhiukkasten osuus on epävarma. Suomessa voidaan arvioida, että syntyvien mikromuovien määrä on samaa luokkaa kuin Norjassa eli karkeasti 5000 t/a. Tästä noin 7 %:n arvioidaan siirtyvän ilmaan, eli leijumaksi luettavan mikromuovin määräksi tulee 300–400 t/a, joka on noin puolet arvioidusta renkaiden kulumisen tuottamasta hiukkaspäästöstä.

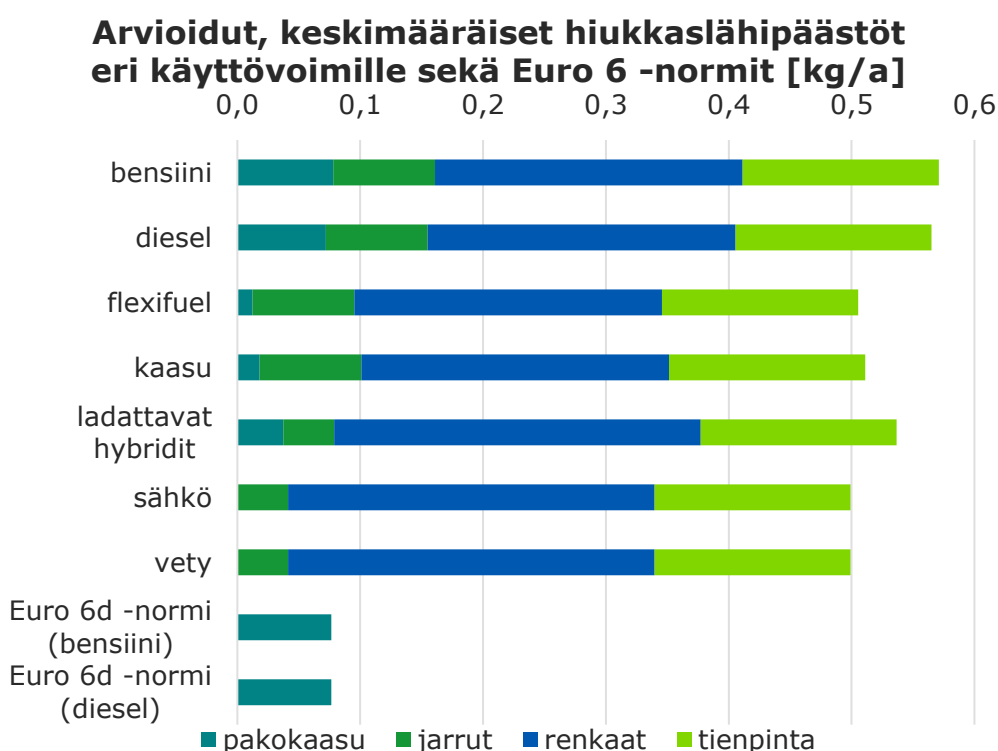
Useat henkilöautojen päästömittaukset on tehty uusista tai uudehkoista autoista. On kuitenkin olemassa tietoa siitä, että päästönvähennystekniikoiden toiminta heikkenee dieselautoissa niiden ikääntyessä (Chen ja Borken-Kleefeld 2016).

Tieteellisessä kirjallisuudessa raportoidut autojen päästömittaukset on tehty usein lämpimissä oloissa. Niiden soveltaminen Suomen oloihin ei ole välttämättä suoraviivaista. Suomen oloissa kylmäkäynnistykset muodostavat merkittävän osan ajoneuvojen päästöistä, etenkin talviaikaan. Uusi WLTP-testausmenetelmä parantaa testien vastaavuutta varsinaisten ajonaikaisten päästöjen kanssa.

7 Tutkimuksen tulokset

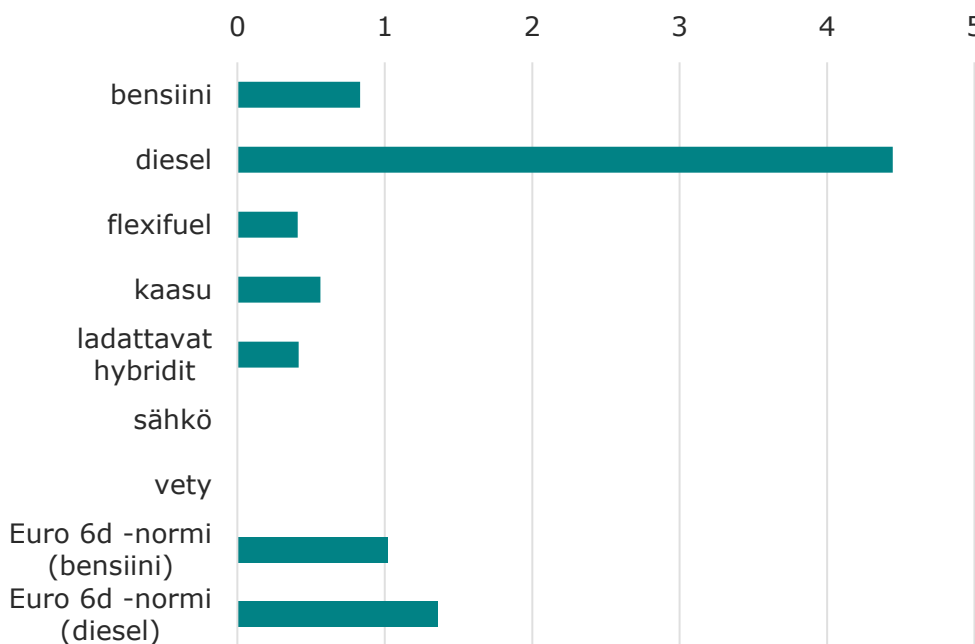
7.1 Yksikköpäästöt

Seuraavassa on esitetty vuosilähipäästöjä käyttäen yhden henkilöauton keskimääräistä vuosisuoritetta (17 000 km). Tulokset on laskettu selvityksessä käytettyjen lähteiden perusteella nykyiselle henkilöautokannalle käyttövoimittain. Dieselautojen kohdalla NO_x-päästöt ylittävät ainakin uusien Euro-normien vaatimukset. Tämä johtuu osittain siitä, että niiden päästökertoimissa on mukana myös vanhan autokannan vaikutusta. Dieselautojen NO_x-päästöjen osalta syynä on myös se, että todellisessa ajotilanteessa päästö on vanhoilla Euro 6 -autoilla ja sitä vanhemmilla ajoneuvoilla selvästi suurempi kuin ajoneuvon rekisteröity Euro-luokka. (Kuva 11, Kuva 10) Nykyaikaisten, uusien bensiiniautojen pakokaasupäästöt ovat selvästi pienempiä kuin Euro 6 -vaatimukset.



Kuva 10. Hiukkasvuosipäästöjä per henkilöauto (kg/a) laskettuna keskimääräisellä suoritteella eri käyttövoimille sekä Euro 6d -normien päästörajat. Hiukkaspuäästön muodostumistapa on eritelty.

Arvioidut, keskimääräiset NO_x-lähipäästöt eri käyttövoimille sekä Euro 6 -normit [kg/a]



Kuva 11. NO_x-vuosipäästöjä (pakokaasupäästöt) per henkilöauto (kg/a) laskettuna keskimääräisellä suoritteella eri käyttövoimille sekä Euro 6d -normien päästörajat.

7.2 Arvio suoritevaihtelun vaikutuksesta päästöihin

Nykytilanteen päästöt on laskettu typen oksideille ja hiukkasille pakokaasupäästöjen osalta käyttäen LIPASTOn päästökertoimia. Tulevien skenaarioiden kokonaispäästöt on laskettu käytössä olevien keskimääräisten päästökertoimien avulla, jotka on saatu kirjallisuudesta. Laskelmista on jätetty resuspension vaikutus pois, koska sen arvioiminen suuresta vaihtelusta johtuen on haasteellista. Laskennan tulosten lukuarvot on esitetty liitteessä 2.

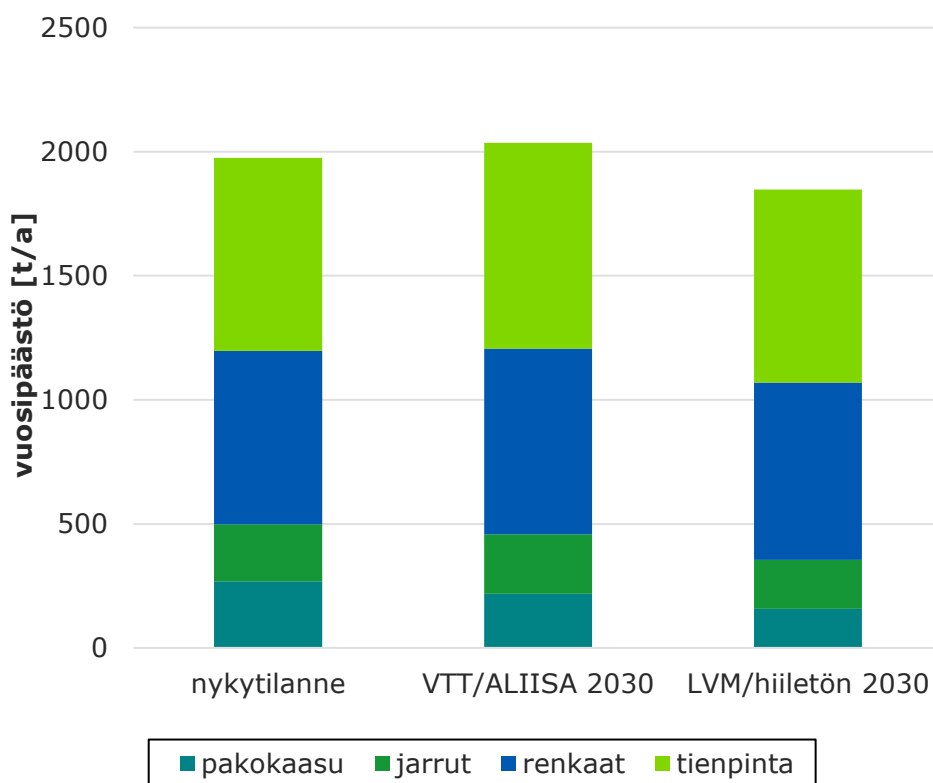
Hiukkasmaisten pakokaasupäästöjen osuus kokonaispäästöstä pienenee skenaarioiden mukaisissa laskelmissa. Pakokaasun hiukkaspäästö vähenee nykytilanteen mukaisesta noin 20 % skenaariossa VTT/ALIISA 2030 ja noin 50 % skenaariossa LVM/hiiletön 2030. Sen sijaan ei-pakokaasupäästöt eivät pienene olennaisesti, koska niiden muodostumisen on oletettu pysyvän samankaltaisena. Arvio jarrujen, renkaiden ja tienpinnan kulumisen hiukkaspäästöstä kasvaa noin 5 % nykytilanteesta VTT/ALIISA 2030:een mentäessä (Taulukko 9, Kuva 12).

Nykytilanteessa hiukkasia pakokaasupäästöissä tulee 270 t/a, kun VTT/ALIISA 2030 -skenariossa niitä muodostuu 220 t/a (vähennys 19 %) ja LVM/hiiletön 2030 -skenariossa 160 t (vähennys 51 %). Kokonaispäästö hiukkasille on nykytilanteessa 1980 t/a, VTT/ALIISA 2030 -skenariossa 2040 t/a (lisäys 3 %) ja LVM/hiiletön 2030 -skenariossa 1850 t/a (vähennys 6 %). Nykytilanteesta skenaarioon LVM/hiiletön 2030 mentäessä jarrujen kulumisen hiukkaspäästö pienenee noin 15 %, kun taas renkaiden ja tienpinnan kulumisesta aiheutuva hiukkaspäästö pysyy käytännössä ennallaan. Muutokset johtuvat pääasiassa sähköautojen osuuden kasvusta sekä skenaariossa LVM/hiiletön 2030 siitä, että henkilöautojen kokonaismäärä vähenee hien.

Taulukko 9. Skenaarioiden mukaiset laskennalliset, vuotuiset kokonaishiukkaspäästöt, yksikkö t/a. Päästöt on laskettu kunkin skenaarion mukaisella henkilöautomäärällä käyttäen liitteessä 1 mainittuja päästökertoimia, paitsi nykytilanteessa pakokaasupäästöt ovat LIPASTOn päästökertoimien mukaiset. Taulukossa esitetään myös muutos nykytilanteeseen verrattuna.

Hiukkaspäästön aiheuttaja	Nykytilanne	VTT/ALIISA 2030	Muutos	LVM/hiiletön 2030	Muutos
Pakokaasu	269	218	−19 %	157	−51 %
Jarrut	230	240	+5 %	198	−13 %
Renkaat	699	748	+7 %	715	+2 %
Tienpinta	778	829	+7 %	778	≈ 0 %
Ei-pakokaasupäästöt yhteensä	1706	1818	+7 %	1691	−1 %
Kaikki yhteensä	1975	2036	+3 %	1848	−6 %

Skenaarioiden vuosilähipäästöt, hiukkaset [t/a]

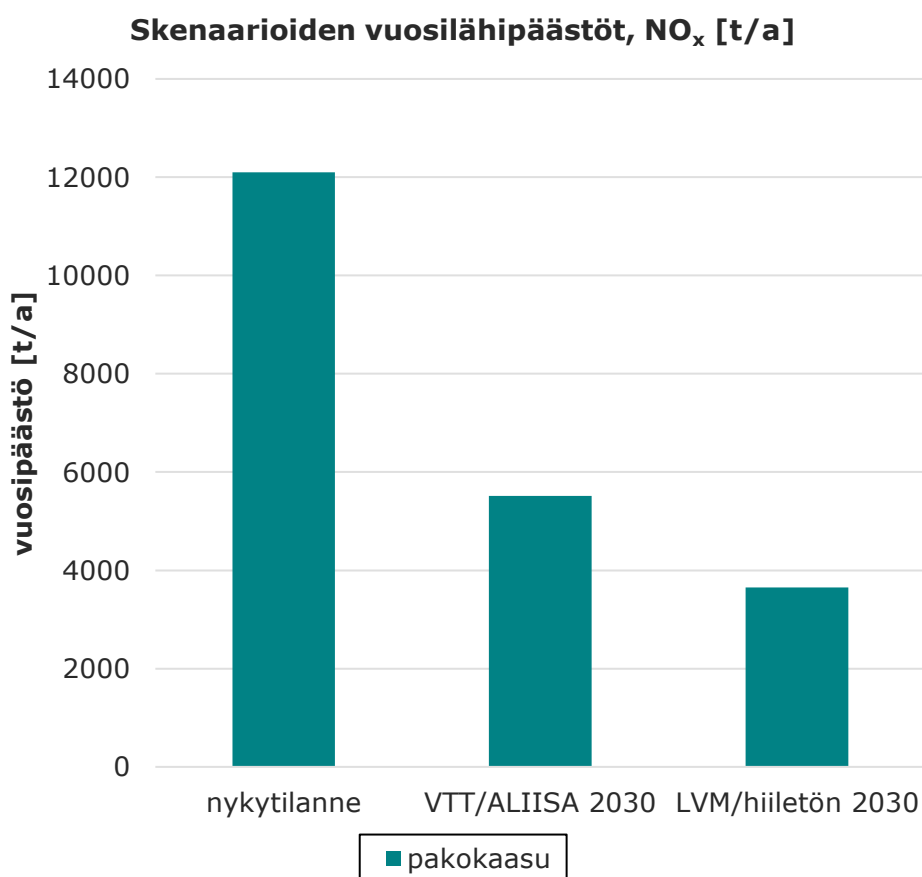


Kuva 12. Arvioidut henkilöautoliikenteen hiukkasvuosipäästöt (leijuma) nykytilanteessa sekä ALIISA-mallin tilanteessa 2030 ja liikenne- ja viestintöministeriön asettaman liikenteen ilmastopolitiikan työryhmän hiilettömän liikenteen 2045 skenaarion välitavoitteessa v. 2030. Nykytilanteessa hiukkasia pakokaasupäästössä tulee 270 t/a, kun VTT/ALIISA 2030 -skenaariossa niitä muodostuu 220 t/a (vähennys 19 %) ja LVM/hiiletön 2030 -skenaariossa 160 t (vähennys 51 %). Kokonaispäästö hiukkasille on nykytilanteessa 1980 t/a, VTT/ALIISA 2030 -skenaariossa 2040 t/a (lisäys 3 %) ja LVM/hiiletön 2030 -skenaariossa 1850 t/a (vähennys 6 %).

Arvioidut vuotuiset typen oksidien päästöt vähenevät autokannan sähköistyksen yleistyessä. Esitetty arvio autokannan ALIISA 2030 -tilanteessa on suurempi kuin VTT:n LIPASTO-ennuste, koska LIPASTO sisältää lisäoletuksia autoteknologian kehittymisestä. Vuosipäästö on nykytilanteessa 12 100 t/a, skenaariossa VTT/ALIISA 2030 se on 5 500 t/a (vähennystä 54 %) ja 3 700 t/a skenaariossa LVM/hiiletön 2030 (vähennystä 70 %) (Taulukko 10, Kuva 13).

Taulukko 10. Skenaarioiden mukaiset laskennalliset, vuotuiset typen oksidien kokonaispäästöt, yksikkö t/a. Päästöt on laskettu kunkin skenaarion mukaisella käyttäen liitteessä 1 mainittuja päästöjä, paitsi nykytilanteessa päästöt ovat LIPASTOn päästökertoimien mukaiset. Taulukossa esitetään myös muutos nykytilanteeseen verrattuna.

NO _x -päästön aiheuttaja	Nykytilanne	VTT/ALIISA 2030	Muutos	LVM/hiiletön 2030	Muutos
Pakokaasu	12098	5516	–54 %	3650	–70 %

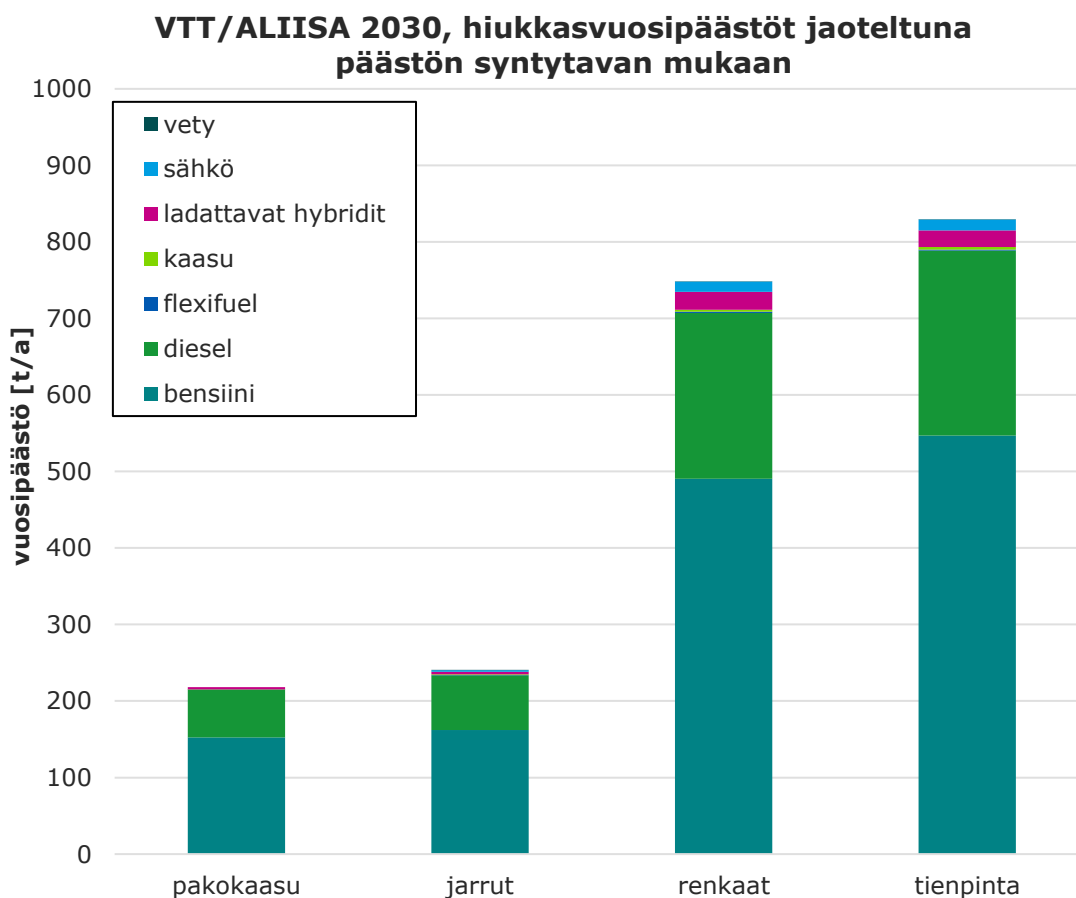


Kuva 13. Arvioidut henkilöautoliikenteen NO_x-vuosipäästöt nykytilanteessa sekä ALIISA-mallin tilanteessa 2030 ja liikenne- ja viestintäministeriön asettaman liikenteen ilmastopolitiikan työryhmän hiilettömän liikenteen 2045 skenaarion välitavoitteessa v. 2030. Nykytilanteen vuosipäästö on 12 100 t/a, skenaariossa VTT/ALIISA 2030 se on 5 500 t/a (vähennys 54 %) ja 3 700 t/a skenaariossa LVM/hiiletön 2030 (vähennys 70 %).

Seuraavat kuvat ja taulukot näyttävät, kuinka valtaosa henkilöautojen hiukkaslähipäästöistä (sisältäen kaikki henkilöautot, Suomen vuosipäästö) on muita kuin pakokaasupäästöjä myös tulevaisuuden skenaarioissa. Havainto ei riipu käyttövoimasta (Taulukko 11, Taulukko 12, Kuva 14, Kuva 15). Laskennan oletusten takia sähköautojen yleistyessä renkaiden ja tienpinnan kulumisen aiheuttama hiukkaspäästö yleistyy suhteessa enemmän kuin sähköautojen osuus.

Taulukko 11. Skenaarion VTT/ALIISA 2030 mukaiset laskennalliset, vuotuiset koko henkilöautokannan hiukkaspäästöt, yksikkö t/a, eriteltynä käyttövoiman ja päästön syntyttävän mukaan.

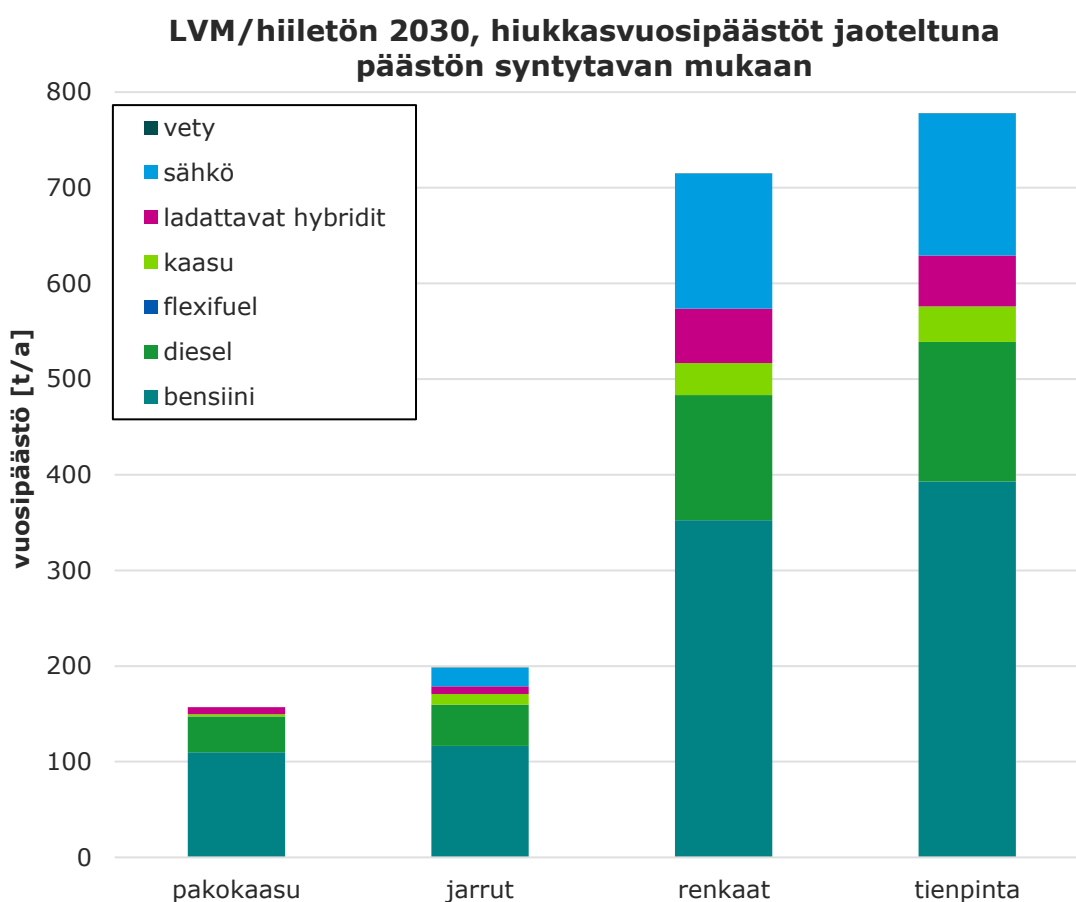
VTT/ALIISA 2030	Pakokaasu	Jarrut	Renkaat	Tienpinta
Bensiini	153,7	162,2	490,7	547,1
Diesel	62,3	71,6	216,5	241,4
Flexifuel	0,07	0,48	1,5	1,6
Kaasu	0,20	0,92	2,8	3,1
Ladattavat hybridit	2,9	3,2	23,3	21,8
Sähkö	0	1,9	13,4	14,1
Vety	0	0,02	0,15	0,15



Kuva 14. Henkilöautoliikenteen tuottamat vuotuiset hiukkaslähipäästöt jaoteltuna hiukkasten syntyttävän mukaan VTT/ALIISA 2030 -skenaarion mukaisessa autokantatilanteessa. Kaaviossa on eroteltu, miten eri käyttövoimilla toimivat henkilöautot muodostavat hiukkasia syntyttävän mukaan.

Taulukko 12. Skenaarion LVM/hiiletön 2030 mukaiset laskennalliset, vuotuiset koko henkilöautokannan hiukkaspäästöt, yksikkö t/a, eriteltynä käyttövoiman ja päästön syntyttävän mukaan.

LVM/hiiletön 2030	Pako- kaasu	Jarrut	Renkaat	Tienpinta
Bensiini	109,7	116,5	352,4	393,0
Diesel	37,7	43,3	130,9	146,0
Flexifuel	0	0	0	0
Kaasu	2,4	11,0	33,3	37,1
Ladattavat hybridit	7,2	7,9	56,9	53,3
Sähkö	0	19,6	141,5	148,4
Vety	0	≈ 0	≈ 0	≈ 0



Kuva 15. Henkilöautoliikenteen tuottamat vuotuiset hiukkaslähipäästöt jaoteltuna hiukkasten syntyttävän mukaan LVM/hiiletön 2030 -skenaarion mukaisessa autokantatilanteessa. Kaaviossa on eroteltu, miten eri käyttövoimilla toimivat henkilöautot muodostavat hiukkasia syntyttävän mukaan.

7.3 Päätelmät

Vanhat dieselhenkilöautot aiheuttavat todennäköisesti valtaosan henkilöautojen NO_x-päästöistä. Autokantaa uudistamalla ja suosimalla Euro 6d -normin täyttäviä autoja voidaan henkilöliikenteen NO_x-päästöä vähentää tehokkaasti. Euro 6d -luokan diesel-

henkilöautojen NO_x-päästöt ovat selvästi pienempiä kuin varhaisten Euro 6 -rekisteröityjen autojen. Euro 6 -normin täyttävän dieselauton NO_x-päästöt ovat silti noin kaksinkertaiset verrattuna bensiinikäyttöiseen henkilöautoon.

Nyky aikaisten bensiiniautojen nanohiukkaspäästöt ovat vähintään yhtä suuret kuin dieselautojen. Jos dieselautojen myyntiä rajoitetaan NO_x-päästön takia, nanohiukkaspäästöt kasvavat bensiiniautojen vallatessa markkinoita. Uusien bensiinimoottorien tuottamien nanohiukkasten terveysvaikutuksia ei tunneta. Kun pakokaasun hiukkaspäästö pienenee, niin massapitoisuudesta ei voi päätellä mahdollisia terveyshaittoja. Lukumäärällisesti suurin osa hiukkasista on siten hyvin pieniä, minkä takia niiden lukumäärä ja pinta-ala ovat merkityksellisempiä tekijöitä kuin massapitoisuus.

Henkilöautoliikenteen tuottamista leijuvista hiukkasista valtaosa aiheutuu muista kuin pakokaasun hiukkaspäästöstä. On odotettavissa, että pakokaasupäästöjen osuus hiukkaspäästöstä pienenee tulevaisuudessa pienempipäästöisten autojen ja autokannan sähköistymisen takia.

Renkaiden, jarrujen ja tienpinnan kulumisen aiheuttamaa hiukkaspäästöä voidaan vähentää ennakoivalla ajotavalla. Kun jarrutukset jäävät vähemmälle, niin jarrupalat luonnollisesti kuluvat vähemmän. Kun jarrutukset ovat kevyempiä, niin jarrupalat ja -levyt kuumenevat vähemmän eikä nanohiukkasia muodostu yhtä paljon. Lisäksi renkaan ja tienpinnan väliset voimat pienenevät jarrutusten ja kiihdytysten vähtessä, jolloin hiukkasia muodostuu vähemmän renkaiden ja tienpinnan kulumisesta.

Nopeusrajoituksilla ja liikenteen ohjauksella voidaan vaikuttaa päästöihin. Renkaiden, jarrujen ja tienpinnan kulumisen aiheuttamat hiukkaspäästöt pienenevät, kun nopeusrajoitukset ovat järkevästi asetettuja ja niistä aiheutuvat kiihdytykset ja jarrutukset vähenevät. Nopeusrajoituksilla voidaan vaikuttaa etenkin dieselautojen NO_x-päästöihin. Taajamaliikenteessä ei välttämättä päästä pienimmät NO_x-päästöt tuottaviin ajonopeuksiin 60–70 km/h.

Polttoaineita käyttävien autojen korvaaminen ladattavilla hybrideillä ja täyssähköautoilla vähentää typen oksidien lähipäästöjä. Energiantuotannossa syntyy NO_x-päästöjä, mutta suurten laitosten hyötysuhde on parempi ja päästöt energiayksikköä kohti pienempiä kuin yksittäisillä polttomoottoriautoilla, ja energia voidaan tuottaa vähäpäästöisillä ja uusiutuvilla menetelmillä. Näin ollen energiantuotannon päästöt eivät välttämättä lisäänty olennaisesti. Sähköautojen regeneroiva jarrutusmekanismi vähentää jarrujen kulumisesta aiheutuvia päästöjä.

Täyssähköautojen houkuttavuus kasvaa, kun akkuteknologia ja latausmahdollisuudet paranevat. Nykyisin ladattavat hybridit ovat taajamissa päästöjen vähentämisen kannalta kompromissi. Lyhyet kaupunkiajot tapahtuvat sähköllä, jolloin pakokaasun NO_x- ja hiukkaspäästöt vähenevät ympäristössä, jossa on eniten päästöille altistuvia ihmisiä. Pitemmät matkat, joita on loppujen lopuksi suhteellisen harvoin, voitaisiin ajaa muulla käyttövoimalla.

Uusien henkilöautojen melupäästöjä (käyttövoimasta riippumatta) rajoitetaan EU:ssa lainsäädännöllisesti portaittain vuosina 2022–2026 yhteensä 3–4 dB. Tämä tulee jollain aikavälillä vaikuttamaan myös ympäristön melutasoja alentavasti etenkin taajamissa. Lisäksi jos sähköautojen osuus autokannasta kasvaa suureksi, on lisäksi odotettavissa melun alenemista etenkin taajamissa pienillä, alle 50 km/h ajonopeuksilla. Suuruusluokkana 50 km/h nopeudella melun alenema voi koko henkilöautokannan

sähköistyessä olla 1 dB, 30 km/h nopeudella 2 dB ja alle 30 dB nopeudella selvästikin yli 2 dB.

Merkittävät muutokset ympäristön kokonaismelussa edellyttävät, että myös raskaan liikenteen melupäästöissä tapahtuu vastaavia muutoksia kuin henkilöautoissa. Taajamien bussiliikenteen sähköistymisellä voidaan odottaa 1-5 dB alenemista kokonaismelutasoon, riippuen mm. bussien osuudesta, ajonopeudesta ja muun raskaan liikenteen määrästä.

8 Lähdeluettelo

8.1 Tieteelliset julkaisut

- Aakko-Saksa, P. T., Rantanen-Kolehmainen, L., Skyttä, E. 2014. Ethanol, Isobutanol, and Biohydrocarbons as Gasoline Components in Relation to Gaseous Emissions and Particulate Matter. *Environ. Sci. Technol.*, 48:10489–10496.
- Aatmeeyata, Sharma, M. 2010. Contribution of Traffic-Generated Nonexhaust PAHs, Elemental Carbon, and Organic Carbon Emission to Air and Urban Runoff Pollution. *J. Environ. Engineer.*, 136:
- Agarwal, A. K., Gupta, T., Shukla, P. C., Dhar, A. 2015. Particulate emissions from biodiesel fuelled CI engines. *Energy Convers. Manage.*, 94:311–330.
- Grigoratos, T., Martini, G. 2015. Brake wear particle emissions: a review. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 22:2491–2504.
- Bielaczyc, P., Szczotka, A., Woodburn, J., 2017. Exhaust emissions of particulate matter from light-duty vehicles – an overview and the current situation. *Combustion Engines*, 171:227–238.
- Brand, C. 2016. Beyond 'Dieselgate': Implications of unaccounted and future air pollutant emissions and energy use for cars in the United Kingdom. *Energ. Policy*, 97:1–12.
- Campello-Vicente, H., Peral-Orts, R., Campillo-Davo, N., Velasco-Sanchez, E. 2016. The effect of electric vehicles on urban noise maps. *Applied Acoustics*, 116:59–64.
- Chasapidis, L., Grigoratos, T., Zygogianni, A., Tsakis, A., Konstandopoulos, A. G. 2018. Study of Brake Wear Particle Emissions of a Minivan on a Chassis Dynamometer. *Emiss. Control Sci. Technol.*, 4:271–278.
- Chen, Y., Borken-Kleefeld, J. 2014. Real-driving emissions from cars and light commercial vehicles — Results from 13 years remote sensing at Zurich/CH. *Atmos. Environ.* 88:157–164.
- Chen, Y., Borken-Kleefeld, J. 2016. NO_x Emissions from Diesel Passenger Cars Worsen with Age. *Environ. Sci. Technol.*, 50:3327–3332.
- Damanik, N., Ong, H. C., Tong, C. W., Mahlia T. M. I., Silitonga, A. S. 2018. A review on the engine performance and exhaust emission characteristics of diesel engines fueled with biodiesel blends. *Environ. Sci. Pollut. R.*, 25:15307–15325.
- Dardiotis, C., Fontaras, G., Marotta, A., Martini, G., Manfredi, U. 2015. Emissions of modern light duty ethanol flex-fuel vehicles over different operating and environmental conditions. *Fuel*, 140:531–540.
- E, J., Pham, M., Zhao, D., Deng, Y., Le, D., Zuo, W., Zhu, H., Liu, T., Peng, Q., Zhang, Z., Effect of different technologies on combustion and emissions of the diesel engine fueled with biodiesel: A review. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 80:620–647.
- Ferm, M., Sjöberg, K. 2015. Concentrations and emission factors for PM_{2.5} and PM₁₀ from road traffic in Sweden. *Atmos. Environ.*, 119:211–219.
- Fiebig, M., Wiartalla, A., Holderbaum, B., Kiesow, S. 2014. Particulate emissions from diesel engines: correlation between engine technology and emissions. *J. Occup. Med. Toxicol.*, 9:6.
- Foitzik, M.-J., Unrau, H.-J., Gauterin, F., Dörnhöfer, J., Koch, T., Investigation of ultra fine particulate matter emission of rubber tires. *Wear*, 394–395:87–95.
- Foroufzanfar, M. H., Afshin, A., Alexander, L., Anderson, H. R., Bhutta, Z. A., Biryukov, S., ja muut 2015. Global, regional, and national comparative risk

assessment of 79 behavioural, environmental and occupational, and metabolic risks or clusters of risks in 188 countries, 1990–2013: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2013. *Lancet*, 386:2287–2323.

Gentner, D. R., Jathar, S. H., Gordon, T. D., Bahreini, R., Day, D. A., El Haddad, I., Hayes, P. L., Pieber, S. M., Platt, S. M., de Gouw, J., Goldstein, A. H., Harley, R. A., Jimenez, J. L., Prévôt, A. S. H., Robinson, A. L. 2016. Review of Urban Secondary Organic Aerosol Formation from Gasoline and Diesel Motor Vehicle Emissions. *Environ. Sci. Technol.*, 51:1074–1093.

Hagino, H., Oyama, M., Sasaki, S. 2016. Laboratory testing of airborne brake wear particle emissions using a dynamometer system under urban city driving cycles *Atmos. Environ.*, 131:269–278.

Hakkarainen, H., Sainio, M., Ihantola, T., Rönkkö, T., Aakko-Saksa, P., Jalava, P.I. 2019. Toxicological evaluation of exhaust emissions from light-duty vehicles using different fuel alternatives in sub-freezing conditions. Julkaisematon käsikirjoitus.

Hernandez, L. M., Xu, E. G., Larsson, H. C. E., Tahara, R., Maisuria, V. B., Tufenkji, N. 2019. Plastic Teabags Release Billions of Microplastics and Nanoparticles into Tea. *Environ. Sci. Technol.*, . DOI: 10.1021/acs.est.9b02540.

Herout, M., Malafak, J., Kučera, L., Dlabaja, T. 2011. Biogas composition depending on the type of plant biomass used. *Res. Agr. Eng.* 57:137–143.

Hesterberg, T. W., Long, C. M., Sax, S. N., Lapin, C. A., McClellan, R. O., Bunn, W. B., Valberg, P. A. 2011. Particulate Matter in New Technology Diesel Exhaust (NTDE) is Quantitatively and Qualitatively Very Different from that Found in Traditional Diesel Exhaust (TDE). *J. Air & Waster Manage. Assoc.*, 61:894–913.

Hooftman, N., Oliveira, L., Messagie, M., Coosemans, T., Van Mierlo, J. 2015. Environmental Analysis of Petrol, Diesel and Electric Passenger Cars in a Belgian Urban Setting. *Energies*, 9:84.

Huang, X., Wang, Y., Xing, Z., Du, K., Emission factors of air pollutants from CNG-gasoline bi-fuel vehicles: Part II. CO, HC and NOx. *Sci. Total Environ.*, 565:698–705.

Kangasniemi, O., Kuuluvainen, H., Heikkilä, J., Pirjola, L., Niemi, J. V., Timonen, H., Saarikoski, S., Rönkkö, T., Dal Maso, M. 2019. Dispersion of a Traffic Related Nanocluster Aerosol Near a Major Road. *Atmosphere*, 10:309–327.

Karjalainen, P., Timonen, H., Saukko, E., Kuuluvainen, H., Saarikoski, S., Aakko-Saksa, P., Murtonen, T., Bloss, M., Dal Maso, M., Simonen, P., Ahlberg, E., Svenningsson, B., Brune, W. H., Hillamo, R., Keskinen, J., Rönkkö, T. 2016. Time-resolved characterization of primary particle emissions and secondary particle formation from a modern gasoline passenger car. *Atmos. Chem. Phys.*, 16:8559–8570.

Kaya, T., Kutlar, O. A., Taskiran, O. O. 2018. Evaluation of the Effects of Biodiesel on Emissions and Performance by Comparing the Results of the New European Drive Cycle and Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle. *Energies*, 11:2814–.

Kole, P. J., Löhr, A. J., Van Belleghem, F. G. A. J., Ragas, A. M. J. 2017. Wear and Tear of Tyres: A Stealthy Source of Microplastics in the Environment. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 14:1265.

Kumar, P., Pirjola, L., Ketzler, M., Harrison, R. M. 2013. Nanoparticle emissions from 11 non-vehicle exhaust sources — A review. *Atmos. Environ.*, 65:252–277.

Kupiainen, K. J., Pirjola, L. 2011. Vehicle non-exhaust emissions from the tyre-road interface — effect of stud properties, traction sanding and resuspension. *Atmos. Environ.*, 45:4141–4146.

- Liu, F., Borg Olesen, K., Reimer Borregaard, A., Vollertsen, J. 2019. Microplastics in urban and highway stormwater retention ponds. *Sci. Total Environ.*, 671:992–1000.
- Lozhkina, O. V., Lozhkin, V. N. 2016. Estimation of nitrogen oxides emissions from petrol and diesel passenger cars by means of on-board monitoring: Effect of vehicle speed, vehicle technology, engine type on emission rates. *Transport. Res. D-Tr. E.*, 47:251–264.
- Marotta, A., Pavlovic, J., Ciuffo, B., Serra, S., Fontaras, G. 2015. Gaseous Emissions from Light-Duty Vehicles: Moving from NEDC to the New WLTP Test Procedure. *Environ. Sci. Technol.*, 49: 8315–8322.
- Mathissen, M., Grochowicz, J., Schmidt, C., Vogt, R., Farwick zum Hagen, F., H., Grabiec, T., Steven, H., Grigoratos, T. 2018. A novel real-world braking cycle for studying brake wear particle emissions. *Wear*, 414–415:219–226.
- Muñoz, M., Heeb, N. V., Haag, R., Honegger, P., Zeyer, K., Mohn, J., Comte, P., Czerwinski, J. 2016. Bioethanol Blending Reduces Nanoparticle, PAH, and Alkyl- and Nitro-PAH Emissions and the Genotoxic Potential of Exhaust from a Gasoline Direct Injection Flex-Fuel Vehicle. *Environ. Sci. Technol.*, 50:11853–11861.
- Nosko, O., Vanhanen, J., Olofsson, U. 2017. Emission of 1.3–10 nm airborne particles from brake materials. *Aerosol Sci. Tech.*, 51: 91–96.
- Pallas, M.-A., Bérengier, M., Chatagnon, R., Czuka, M., Conter, M., Muirhead, M. 2016. Towards a model for electric vehicle noise emission in the European prediction method CNOSSOS-EU. *Applied Acoustics*, 113:89–101
- Panko, J. M., Hitchcock, K. M., Fuller, G. W., Green, D. 2019. Evaluation of Tire Wear Contribution to PM_{2.5} in Urban Environments. *Atmosphere*, 10:99–2013.
- Pirjola, L., Kuuluvainen, H., Timonen, H., Saarikoski, S., Teinilä, K., Salo, L., Datta, A., Simonen, P., Karjalainen, P., Kulmala, K., Rönkkö, T. 2019. Potential of renewable fuel to reduce diesel exhaust particle emissions. *Applied Energy*, 254:113636–113647.
- Platt, S. M., El Haddad, I., Pieber, S. M., Zardini, A. A., Suarez-Bertoa, R., Clairotte, M., Daellenbach, K. R., Huang, R.-J., Slowik, J., G., Hellebust, S., Temime-Roussel, B., Marchand, N., de Gouw, J., Jimenez, J. L., Hayes, P. L., Robinson, A. L., Baltensperger, U., Astorga, C., Prévôt, A. S. H. 2017. Gasoline cars produce more carbonaceous particulate matter than modern filter-equipped diesel cars. *Sci. Rep.* 7:4926–4934.
- Platt, S. M., El Haddad, I., Pieber, S. M., Zardini, A. A., Suarez-Bertoa, R., Clairotte, M., Daellenbach, K. R., Huang, R.-J., Slowik, J., G., Hellebust, S., Temime-Roussel, B., Marchand, N., de Gouw, J., Jimenez, J. L., Hayes, P. L., Robinson, A. L., Baltensperger, U., Astorga, C., Prévôt, A. S. H. 2017. Gasoline cars produce more carbonaceous particulate matter than modern filter-equipped diesel cars. *Sci. Rep.* 7:4926–4934
- Pohrt, R. 2019. Tire wear particle hot spots – review of influencing factors. *Facta Universitatis Series: Mechanical Engineering*, 17:17–27.
- Qian, Y., Li, Z., Yu, L., Wang, X., Lu, X. 2019. Review of the state-of-the-art of particulate matter emissions from modern gasoline fueled engines. *Appl. Energ.*, 238:1269–1298.
- Rasi, S. 2009. Biogas Composition and Upgrading to Biomethane. Jyväskylän yliopisto, väitöskirja. Jyväskylä studies in biological and environmental science 202.
- Rochman, C. M., Brookson, C., Bikker, J., Djuric, N., Earn, A., Bucci, K., Athey, S., Huntingdon, A., McIlwraith, H., Munno, K., De Frond, H., Kolomijeca, A., Erdle, L., Grbic, J., Bayoumi, M., Borrelle, S. B., Wu, T., Santoro, S., Werbowski, L. M., Zhu, X., Giles, R. K., Hamilton, B. M., Thaysen, C., Kaura, A., Klasios, N., Ead, L., Kim, J.,

- Sherlock, C., Ho, A., Hung, C. 2019. Rethinking Microplastics as a Diverse Contaminant Suite. *Environ. Toxicol. Chem.*, 38:703–711.
- Silva, R. A., West, J. J., Zhang, Y., Anenberg, S. C., Lamarque J.-F., Shindell, D. T., Collins W. J., Dalsoren, S., Faluvegi, G., Folberth, G., Horowitz, L. W., Nagashima, T., Naik, V., Rumbold, S., Skeie, R., Sudo, K., Takemura, T., Bergmann, D., Cameron-Smith, P., Cionni, I., Doherty, R. M., Eyring, V., Josse, B., MacKenzie, I. A., Plummer, D., Righi, M., Stevenson, D. S., Strode, S., Szopa, S., Zeng, G. 2013. Global premature mortality due to anthropogenic outdoor air pollution and the contribution of past climate change. *Environ. Res. Lett.*, 8:034005.
- Singh, A. P., Pal, A., Agarwal, A. K., 2016. Comparative particulate characteristics of hydrogen, CNG, HCNG, gasoline and diesel fueled engines. *Fuel*, 185:491–499.
- Thorpe, A., Harrison, R. M. 2008. Sources and properties of non-exhaust particulate matter from road traffic: a review. *Sci. Total. Environ.*, 400:270–282.
- Timmers, V. R. J. H., Achten, P. A. J. 2016. Non-exhaust PM emissions from electric vehicles. *Atmos. Environ.*, 134:10–17.
- Verma, P., Stevanovic, S., Zare, A., Dwivedi, G., Van, T. C., Davidson, M., Rainey, T., Brown, R. J., Ristovski, Z. D. 2019. An Overview of the Influence of Biodiesel, Alcohols, and Various Oxygenated Additives on the Particulate Matter Emissions from Diesel Engines. *Energies*, 12:1987–2012.
- Vojtíšek-Lom, M., Beránek, V., Klír, V., Jindra, P., Pechout, M., Voříšek, T. 2018. On-road and laboratory emissions of NO, NO₂, NH₃, N₂O and CH₄ from late-model EU light utility vehicles: Comparison of diesel and CNG. *Sci. Total Environ.*, 616–617:774–784.
- Yang, J., Roth, P., Durbin, T. D., Johnson, K. C., Asa-Awuku, A., Cocker, D. R. III, Karavalakis, G. 2019. Investigation of the Effect of Mid- And High-Level Ethanol Blends on the Particulate and the Mobile Source Air Toxic Emissions from a Gasoline Direct Injection Flex Fuel Vehicle. *Energy Fuels*, 33:429–440.

8.2 Muut lähteet

- ADAC 2019: Saubere Diesel: Abgasnorm Euro 6d-Temp im Test. 21.2.2019. <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/abgas-diesel-fahrverbote/abgasnorm/test-euro-6d-temp/>. Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V., verkkosivu. Vierailtu 3.10.2019.
- EMEP/EEA 2016: EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016. Technical guidance to prepare national emission inventories. EEA Report No 21/2016.
- EPA 2004: Air Quality Criteria for Particulate Matter. Volume I of II. United States Environmental Protection Agency, 2004, Research Triangle Park, North Carolina, USA.
- EURONOISE 2015a: Berge, T., Frode Haukland, Piotr Mioduszewski, Ryszard Wozniak. 2015. Tyre/road noise of passenger car tyres, including tyres for electric vehicles – road measurements. Proceedings at EURONOISE 2015 conference, p. 1333–1338
- EURONOISE 2015b: Ejsmont, J., Beata Świeczko-Żurek, Stanisław Taryma, Piotr Mioduszewski 2015. Noise Generated by Tyres Designed for Electric Vehicles - Results of Laboratory Experiments. Proceedings at EURONOISE 2015 conference.
- EU 2003. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2003/30/EY, annettu 8 päivänä toukokuuta 2003, liikenteen biopolttoaineiden ja muiden uusiutuvien polttoaineiden käytön edistämisestä.

EU 2017/1151: komission asetus (EU) 2017/1151, annettu 1 päivänä kesäkuuta 2017, moottoriajoneuvojen tyyppihyväksynnästä kevyiden henkilö- ja hyötyajoneuvojen päästöjen (Euro 5 ja Euro 6) osalta ja ajoneuvojen korjaamiseen ja huoltamiseen tarvittavien tietojen saatavuudesta annetun Euroopan parlamentin ja neuvoston asetuksen (EY) N:o 715/2007 täydentämisestä, Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2007/46/EY, komission asetuksen (EY) N:o 692/2008 ja komission asetuksen (EU) N:o 1230/2012 muuttamisesta ja komission asetuksen (EY) N:o 692/2008 kumoamisesta.

Euroopan komissio 2014. Grigoratos, T., Martini, G. 2014. Non-Exhaust Traffic Related Emissions. Brake and Tyre Wear PM. European Commission, Joint Research Centre, Institute of Energy and Transport, Ispra, Italy.

Euroopan komissio 2019: Ehdotus. Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus moottoriajoneuvojen tyyppihyväksynnästä kevyiden henkilö- ja hyötyajoneuvojen päästöjen (Euro 5 ja Euro 6) osalta ja ajoneuvojen korjaamiseen ja huoltamiseen tarvittavien tietojen saatavuudesta annetun asetuksen (EY) N:o 715/2007 muuttamisesta. COM(2019) 2018 final. Bryssel, 14.6.2019.

EY 2009: Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EY) N:o 661/2009, annettu 13 päivänä heinäkuuta 2009, moottoriajoneuvojen, niiden perävaunujen sekä niihin tarkoitettujen järjestelmien, osien ja erillisten teknisten yksiköiden yleiseen turvallisuuteen liittyvistä tyyppihyväksyntävaatimuksista (ETA:n kannalta merkityksellinen teksti).

ICCT 2019: Anenberg, S., Miller, J., Henze, D., Minjares, R. 2019. A global snapshot of the air pollution-related health impacts of transportation sector emissions in 2010 and 2015. The International Council on Clean Transportation, Washington, D.C., 2019.

Internoise 2013. Møller Iversen, L., Marbjerg, G., Bendtsen, H. 2013. Noise from electric vehicles – ‘state-of-the-art’ literature survey. Internoise 2013, Innsbruck, Austria.

IFSTTAR 2015: Gasparoni, S., Martin Czuka, Reinhard Wehr, Marco Conter, Marie-Agnès Pallas, et al, 2018. Impact of low-noise tyres on electric vehicle noise emission. [Research Report] IFSTTAR - Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux. 2015, 61 p. hal-01349294.

IVL 2016. Magnusson, K., Eliasson, K., Fråne, A., Haikonen, K., Hultén, J., Olshammar, M., Stadmark, J., Voisin, A. 2016. Swedish sources and pathways for microplastics to the marine environment. A review of existing data. IVL Svenska Miljöinstitutet, report C 183. NIVA 2018. Vogelsang, C., Lusher, A. L., Dadkhah, M. E., Sundvor, I., Umar, M., Ranneklev, S. B., Eidsvoll, D., Meland, S. 2018. Microplastics in road dust – characteristics, pathways and measures. NIVA (Norwegian Institute for Water Research), report 7361-2019.

LVM 2018. Särkijärvi, J., Jääskeläinen, S., Lohko-Soner, K. (toim.) 2018. Toimenpideohjelma hiilettömään liikenteeseen 2045. Liikenteen ilmastopolitiikan työryhmän loppuraportti. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 13/2018. ISBN 978-952-243-559-0

RIVM 2015. Verschoor, A. J., Towards a definition of microplastics. Considerations for the specification of physico-chemical properties. Ministry of Health, Welfare and Sport, National Institute for Public Health and the Environment (RIVM), Letter report 2015-0116.

SAPEA 2019. Science Advice for Policy by European Academies 2019 . A Scientific Perspective on Microplastics in Nature and Society. Berlin: SAPEA.

- Trafi 2015. Kitkarengastutkimus. TNS Gallup Oy.
https://www.trafi.fi/filebank/a/1458200454/5f9ee4fd4afb9d7db3193ed580454faf/20047-Kitkarenkaiden_yleisyys_Asiakkaalle_Trafi.pdf
- True 2019: Dallmann, T., Bernard, Y., Tietge, U., Muncrief, R. 2019. Remote sensing of motor vehicle emissions in Paris. True, The real urban emissions initiative. September 2019.
- Vejdirektoratet 2015: Skov, S., Moller Iversen, L. 2015. Noise from electric vehicles- Measurements. COMPETT -project WP3. Final report 25032015. Danish Road Directorate, 2015.
- VNa 2017/79. Valtioneuvoston asetus ilmanlaadusta. Annettu Helsingissä 26.1.2017.
- VNp 1996/480. Valtioneuvoston päätös ilmanlaadun ohjearvoista ja rikkilaskeuman tavoitearvosta. Annettu Helsingissä 19 päivänä kesäkuuta 1996.
- VTT 2018. LIPASTO, Suomen liikenteen pakokaasupäästöjen ja energiankulutuksen laskentajärjestelmä. <http://lipasto.vtt.fi/>, vierailtu 29.8.2019. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, Helsinki.
- YM 2016: Hänninen, O., Korhonen, A., Lehtomäki, H., Asikainen, A., Rumrich, I. 2016. Ympäristöministeriön raportteja 16/2016. Ilmansaasteiden terveysvaikutukset. Ympäristöministeriö, Helsinki.

Liite 1. Yksikköpäästötaulukot

Vuosipäästö on laskettu keskimääräisellä suoritteella 17 000 km.

Pakokaasupäästöt, bensiinikäyttöiset henkilöautot, typen oksidit NO_x.

Lähde	Kuvaus	mg/km	kg/a
EMEP/EEA 2016	bensiini, pakokaasu, 120 km/h, minimi	10,4	0,176
EMEP/EEA 2016	bensiini, pakokaasu, 120 km/h, maksimi	6540,0	111,180
EMEP/EEA 2016	bensiini, geometrinen keskiarvo, n = 87, minimi	69,3	1,177
EMEP/EEA 2016	bensiini, geometrinen keskiarvo, n = 51, maksimi	269,26	4,577
Lozhkina 2016	BMW x3, 40 km/h	18,9	0,321
Lozhkina 2016	Skoda Yeti, 40 km/h	8,4	0,143
Lozhkina 2016	Mercedes GLA 4matic, 40 km/h	10,9	0,186
Lozhkina 2016	BMW x3, 100 km/h	43,8	0,745
Lozhkina 2016	Skoda Yeti, 100 km/h	6,6	0,112
Lozhkina 2016	Mercedes GLA 4matic, 100 km/h	7,0	0,119
Lozhkina 2016	bensiini, geometrinen keskiarvo	10,0	0,169
Dardiotis 2015	22 °C, geometrinen keskiarvo	18,2	0,310
Dardiotis 2015	-7 °C, geometrinen keskiarvo	31,1	0,529
Weber 2019	PB bensiini, vm. 2014, -7 °C, kylmäkäynnistys	71,0	1,207
Weber 2019	PB bensiini, vm. 2014, 23 °C, kylmäkäynnistys	193,0	3,281
Weber 2019	PD bensiini, vm. 2015, -7 °C, kylmäkäynnistys	106,0	1,802
Weber 2019	PD bensiini, vm. 2015, 23 °C, kylmäkäynnistys	212,0	3,604
Weber 2019	PE bensiini, vm. 2016, -7 °C, kylmäkäynnistys	26,0	0,442
Weber 2019	PE bensiini, vm. 2016, 23 °C, kylmäkäynnistys	30,0	0,510
Weber 2019	PF bensiini, vm. 2016, -7 °C, kylmäkäynnistys	80,0	1,360
Weber 2019	PF bensiini, vm. 2016, 23 °C, kylmäkäynnistys	78,0	1,326
Hooftman 2016	Euro 4	75,30	1,280
Hooftman 2016	Euro 5	40,70	0,692
Hooftman 2016	Euro 6	48,20	0,819
KESKIMÄÄRIN		49,04	0,834

Pakokaasupäästöt, bensiinikäyttöiset henkilöautot, hiukkaset PM.

Lähde	Kuvaus	mg/km	kg/a
Timmers et al. 2016	lähteiden keskiarvo	3,1	0,053
EMEP/EEA 2016	n = 204	2,21	0,038
Weber 2019	bensiini 2014 -7, kylmäsytytys	43,10	0,733
Weber 2019	bensiini 2014 23, kylmäsytytys	5,10	0,087
Weber 2019	bensiini 2015 -7, kylmäsytytys	23,40	0,398
Weber 2019	bensiini 2015 23, kylmäsytytys	3,00	0,051
Weber 2019	bensiini 2016 -7, kylmäsytytys	38,40	0,653
Weber 2019	bensiini 2016 23, kylmäsytytys	2,00	0,034
Weber 2019	bensiini 2016 -7, kylmäsytytys	6,90	0,117
Weber 2019	bensiini 2016 23, kylmäsytytys	0,60	0,010
Weber 2019	geometrinen keskiarvo	6,86	0,117
Hooftman 2016	Euro 4	1,50	0,026
Hooftman 2016	Euro 5	2,20	0,037
Hooftman 2016	Euro 6	2,40	0,041
KESKIMÄÄRIN		4,59	0,078

Pakokaasupäästöt, dieselkäyttöiset henkilöautot, typen oksidit NO_x.

Lähde	Kuvaus	mg/km	kg/a
EMEP/EEA 2016	diesel, varhainen	527,26	8,963
EMEP/EEA 2016	diesel, Euro 1	584,20	9,931
EMEP/EEA 2016	diesel, Euro 2	568,60	9,666
EMEP/EEA 2016	diesel, Euro 3	675,70	11,487
EMEP/EEA 2016	diesel, Euro 4	445,00	7,565
EMEP/EEA 2016	diesel, Euro 5	480,00	8,160
EMEP/EEA 2016	diesel, Euro 6	260,21	4,424
EMEP/EEA 2016	n = 24	548,81	9,330
Vojtišek-Lom 2018	kylmäkäynnistys, kaupunki	546,00	9,282
Vojtišek-Lom 2018	lämminkäynnistys, kaupunki	537,00	9,129
Vojtišek-Lom 2018	monipuolinen reitti	615,00	10,455
Weber 2019	diesel 2013 -7, kylmäsytytys	1294,00	21,998
Weber 2019	diesel 2013 -7, lämminsytytys	615,00	10,455
Weber 2019	diesel 2013 23, kylmäsytytys	469,00	7,973
Weber 2019	diesel 2013 23, lämminsytytys	499,00	8,483
Weber 2019	diesel 2013 -7, kylmäsytytys	1228,00	20,876
Weber 2019	diesel 2013 -7, lämminsytytys	526,00	8,942
Weber 2019	diesel 2013 23, kylmäsytytys	300,00	5,100
Weber 2019	diesel 2013 23, lämminsytytys	369,00	6,273
Weber 2019	diesel 2015 -7, kylmäsytytys	863,00	14,671
Weber 2019	diesel 2015 23, kylmäsytytys	248,00	4,216
Weber 2019	diesel 2015 -7, kylmäsytytys	1417,00	24,089
Weber 2019	diesel 2015 23, kylmäsytytys	609,00	10,353
Hooftman 2016	Euro 4	850,00	14,450
Hooftman 2016	Euro 5	820,00	13,940
Hooftman 2016	Euro 6	568,00	9,656
ADAC 2019	Euro 6d	1,00	0,017
ADAC 2019	Euro 6d	7,00	0,119
ADAC 2019	Euro 6d	40,00	0,680
ADAC 2019	Euro 6d	1,00	0,017
ADAC 2019	Euro 6d	56,00	0,952
ADAC 2019	Euro 6d	14,00	0,238
KESKIMÄÄRIN		261,55	4,446

Pakokaasupäästöt, dieselkäyttöiset henkilöautot, hiukkaset PM.

Lähde	Kuvaus	mg/km	kg/a
Timmers et al. 2016	lähteiden keskiarvo	2,4	0,041
EMEP/EEA 2016	diesel, pakokaasu, 120 km/h, maksimi	253,2	4,304
EMEP/EEA 2016	diesel, pakokaasu, 120 km/h, minimi	0,9	0,015
EMEP/EEA 2016	diesel, pre-Euro	133,2	2,264
EMEP/EEA 2016	diesel, Euro 1	72,0	1,224
EMEP/EEA 2016	diesel, Euro 2	40,8	0,694
EMEP/EEA 2016	diesel, Euro 3	33,1	0,563
EMEP/EEA 2016	diesel, Euro 4	24,2	0,411
EMEP/EEA 2016	diesel, Euro 5	1,7	0,029
EMEP/EEA 2016	diesel, Euro 6	1,5	0,026
EMEP/EEA 2016	n = 56	3,32	0,056
Weber 2019	DC diesel, vm. 2013, -7, kylmäkäynnistys	1,10	0,019
Weber 2019	DC diesel, vm. 2013, 23, kylmäkäynnistys	0,70	0,012
Weber 2019	DD diesel, vm. 2013, -7, kylmäkäynnistys	1,20	0,020
Weber 2019	DD diesel, vm. 2013, 23, kylmäkäynnistys	0,50	0,009
Weber 2019	DG diesel, vm. 2015, -7, kylmäkäynnistys	0,40	0,007
Weber 2019	DG diesel, vm. 2015, 23, kylmä käynnistys	0,80	0,014
Weber 2019	DH diesel, vm. 2015, -7, kylmäkäynnistys	1,80	0,031
Weber 2019	DH diesel, vm. 2015, 23, kylmäkäynnistys	1,10	0,019
Hooftman 2016	Euro 4	50,00	0,850
Hooftman 2016	Euro 5	2,80	0,048
Hooftman 2016	Euro 6	1,10	0,019
KESKIMÄÄRIN		4,24	0,072

Pakokaasupäästöt, korkeaseosetanoli, typen oksidit NO_x.

Lähde	Kuvaus	mg/km	kg/a
Dardiotis et al. 2015	22 °C, geometrinen keskiarvo	16,80	0,286
Dardiotis et al. 2015	-7 °C, geometrinen keskiarvo	27,09	0,461
KESKIMÄÄRIN		21,33	0,363

Pakokaasupäästöt, korkeaseosetanoli, hiukkaset PM.

Lähde	Kuvaus	mg/km	kg/a
Yang 2019	kylmäkäynnistys	0,31	0,005
Yang 2019	lämminkäynnistys	0,28	0,005
KESKIMÄÄRIN		0,29	0,005

Pakokaasupäästöt, maakaasu (metaani), typen oksidit NO_x.

Lähde	Kuvaus	mg/km	kg/a
EMEP/EEA 2016	keskiarvo, n = 12 (pieni kuorma)	15,65	0,266
EMEP/EEA 2016	keskiarvo, n = 24	70,32	1,195
KESKIMÄÄRIN		33,17	0,564

Pakokaasupäästöt, maakaasu (metaani), hiukkaset PM.

Lähde	Kuvaus	mg/km	kg/a
EMEP/EEA 2016	Bifuel, CNG, 120 km/h, maksimi	1,3	0,022
EMEP/EEA 2016	Bifuel, CNG, 120 km/h, minimi	0,8	0,014
EMEP/EEA 2016	keskiarvo, n = 48	1,13	0,019
KESKIMÄÄRIN		1,07	0,018

Hiukkaspäästöt jarrujen kulumisesta.

Lähde	Kuvaus	mg/km	kg/a
Grigoratos et al. 2015	US EPA LDV, asbestia sisältävät jarrut	7,9	0,134
Grigoratos et al. 2015	vähämetallinen, puolimetallinen, NAO (keskimäärin)	8,1	0,138
Grigoratos et al. 2015	NAO	5,8	0,099
Grigoratos et al. 2015	katukuilussa	8,0	0,136
Grigoratos et al. 2015	valtatie	1,6	0,027
Grigoratos et al. 2015	henkilöauto, Iso-Britannia	7,0	0,119
Hagino et al. 2016	keskimäärin, kaupunkiajo sykli	1,0	0,017
Timmers et al. 2016	lähteiden keskiarvo	9,3	0,158
KESKIMÄÄRIN		4,87	0,083

Hiukkaspäästöt renkaiden kulumisesta.

Lähde	Kuvaus	mg/km	kg/a
Timmers et al. 2016	lähteiden keskiarvo, täyssähköauto	7,2	0,122
Timmers et al. 2016	lähteiden keskiarvo, polttomoottoriauto	6,1	0,104
Euroopan komissio 2014	tutkimusten keskiarvo (nastaton)	6,30	0,107
Euroopan komissio 2014	tutkimusten keskiarvo (nastaton)	2,40	0,041
Euroopan komissio 2014	tutkimusten keskiarvo (nastaton)	13,00	0,221
Euroopan komissio 2014	maksimi (nastarengas)	350,00	5,950
Kole 2017	keskimäärin Ruotsissa	50,00	0,850
KESKIMÄÄRIN		14,74	0,251

Hiukkaspäästöt tienpinnan kulumisesta.

Lähde	Kuvaus	mg/km	kg/a
Timmers et al. 2016	lähteiden keskiarvo, sähköauto	8,9	0,151
Timmers et al. 2016	lähteiden keskiarvo, polttomoottori	7,5	0,128
Timmers et al. 2016	lähteiden keskiarvo	3,8	0,065
Timmers et al. 2016	lähteiden keskiarvo	3,1	0,053
Ferm 2015	nastarenkaat, Uumaja	17,60	0,299
Ferm 2015	nastarenkaat, Göteborg	49,50	0,842
KESKIMÄÄRIN		9,39	0,160

Liite 2. Kokonaispäästötaulukot

Skenaarioiden mukaiset laskennalliset, vuotuiset kokonaishiukkaspäästöt, yksikkö t/a. Päästöt on laskettu kunkin skenaarion mukaisella henkilöautomäärällä käyttäen liitteessä 1 mainittuja päästöjä, paitsi nykytilanteessa pakokaasupäästöt ovat LIPAS-TOn päästökertoimien mukaiset. Taulukossa esitetään myös muutos nykytilanteeseen verrattuna.

Hiukkaspäästön aiheuttaja	Nykytilanne	VTT/ALIISA 2030	Muutos	LVM/hiiletön 2030	Muutos
Pakokaasu	269	218	−19 %	157	−51 %
Jarrut	230	240	+5 %	198	−13 %
Renkaat	699	748	+7 %	715	+2 %
Tienpinta	778	829	+7 %	778	≈ 0 %
Ei-pakokaasupäästöt yhteensä	1706	1818	+7 %	1691	−1 %
Kaikki yhteensä	1975	2036	+3 %	1848	−6 %

Skenaarioiden mukaiset laskennalliset, vuotuiset typen oksidien kokonaispäästöt, yksikkö t/a. Päästöt on laskettu kunkin skenaarion mukaisella henkilöautomäärällä käyttäen liitteessä 1 mainittuja päästöjä, paitsi nykytilanteessa päästöt ovat LIPAS-TOn päästökertoimien mukaiset. Taulukossa esitetään myös muutos nykytilanteeseen verrattuna.

NO _x -päästön aiheuttaja	Nykytilanne	VTT/ALIISA 2030	Muutos	LVM/hiiletön 2030	Muutos
Pakokaasu	12098	5516	−54 %	3650	−70 %

Skenaarioiden VTT/ALIISA 2030 mukaiset laskennalliset, vuotuiset hiukkaspäästöt, yksikkö t/a, eriteltynä käyttövoiman ja päästön syntyvän mukaan.

VTT/ALIISA 2030	Pakokaasu	Jarrut	Renkaat	Tienpinta
Bensiini	152,73	162,17	490,67	547,09
Diesel	62,29	71,56	216,52	241,41
Flexifuel	0,07	0,48	1,46	1,63
Kaasu	0,20	0,92	2,77	3,09
Ladattavat hybridit	2,93	3,23	23,29	21,82
Sähkö	0	1,86	13,41	14,07
Vety	0	0,02	0,15	0,15

Skenaarioiden LVM/hiiletön 2030 mukaiset laskennalliset, vuotuiset hiukkaspäästöt, yksikkö t/a, eriteltynä käyttövoiman ja päästön syntyvän mukaan.

LVM/hiiletön 2030	Pakokaasu	Jarrut	Renkaat	Tienpinta
Bensiini	109,70	116,48	352,42	392,95
Diesel	37,67	43,27	130,93	145,99
Flexifuel	0	0	0	0
Kaasu	2,41	11,00	33,28	37,11
Ladattavat hybridit	7,15	7,89	56,85	53,27
Sähkö	0	19,64	141,47	148,38
Vety	0	≈ 0	≈ 0	≈ 0

Liikenne- ja viestintävirasto Traficom

PL 320, 00059 TRAFICOM
p. 029 534 5000

traficom.fi

ISBN 978-952-311-503-3
ISSN 2669-8781 (verkkajulkaisu)

TRAFICOM
Liikenne- ja viestintävirasto