



Teemu Laine

# Jarrujen hiukkaspäästöjen mittaus Euro 7 -päästönormien vaatimusten mukaisesti

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (YAMK)

Ajoneuvotekniikka

Insinöörityö

5.5.2023

## Tiivistelmä

Tekijä:	Teemu Laine
Otsikko:	Jarrujen hiukkaspäästöjen mittaus Euro 7 -päästönormien vaatimusten mukaisesti
Sivumäärä:	45 sivua
Aika:	5.5.2023
Tutkinto:	Insinööri (YAMK)
Tutkinto-ohjelma:	Ajoneuvotekniikka
Ohjaaja:	Lehtori Heikki Parviainen

---

Tämän työn päätavoitteena oli tutkia tulevia Euroopan Unionin Euro 7 -päästöstandardin mukaisia vaatimuksia jarrujen päästömittausvaatimuksia tyyppihyväksynnän yhteydessä. Mittausprotokolla perustuu Yhdistyneiden kansakuntien Euroopan talouskomission laatimaan Global Technical Regulations -ohjeistukseen. Työssä keskityttiin käytännön vaatimukseen jarrudynamometritestissä, jossa ajetaan WLTP-jarrusykli kokonaisella jarruasetelmalla ja mitataan ajon aikana syntyneet hiukkaspäästöt. Työssä selvitettiin erityisesti jarrudynamometrin, jäähdytyksen ilmanvaihdon, jarrujen sisäänajon ja hiukkasten mittalaitteiden GTR-ohjeistuksen mukaisia vaatimuksia. Lisäksi selvitettiin tieteellisistä julkaisuista jarrujen hiukkaspäästöjen muodostumismekanismeja ja niiden vaikutuksia terveyteen.

Tutkimuksen tuloksena syntyi selkeä kuvaus siitä, mitä jarrujen päästömittausvaatimukset ja -järjestelyt vaativat tyyppihyväksynnän mittauksissa. Lisäksi työ tarjoaa tietoa jarrujen kitkamateriaaleista ja niiden vaikutuksista hiukkaspäästöihin ja sen myötä mahdollisiin terveyshaittoihin.

Avainsanat: Euro 7, jarrujen hiukkaspäästöt

## Abstract

Author: Teemu Laine  
Title: Euro 7 Brake Wear Particle Emissions Measurement  
Number of Pages: 45 pages  
Date: 5 May 2023

Degree: Master of Engineering  
Degree Programme: Automotive Engineering  
Supervisors: Heikki Parviainen, Senior Lecturer

---

The purpose of the present thesis was to investigate the upcoming requirements for brake emission measurements in type approval according to the European Union's Euro 7 emission standard. The measurement protocol is based on the Global Technical Regulations guidance developed by the United Nations Economic Commission for Europe. The thesis focused on the practical requirements for the brake dynamometer test, where the WLTP brake cycle is driven with the entire brake assembly and the particle emissions generated during the test are measured. The thesis specifically examined the requirements for the dynamometer, ventilation, bedding-in, and particle measurement equipment. In addition, the formation mechanisms of the brake particle emissions and their impacts on health were also analyzed.

The current thesis provided a clear understanding of the brake emission measurement requirements and arrangements in official tests. Information was also obtained pertaining to brake friction materials and their effects on particle emissions and, consequently, health hazards.

Keywords: Euro 7, brake particle emissions.

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	7
2	Jarrupöly ja hiukkaset	8
3	Jarrupölyn mittaus	13
3.2	GTR-menetelmä jarrujen hiukkaspäästöjen mittaukseen	16
3.3	Yleiset vaatimukset	17
3.4	Testi-sykli	17
3.5	Testausjärjestelmän vaatimukset	18
3.5.1	Ilmankäsittely ja jäähdytys	19
3.5.2	Jarrudynamometri	20
3.5.3	Näytteenotto	21
3.6	Syötettävät parametrit	22
3.7	Testin valmistelut	24
3.8	Lämpötilan mittaus	25
3.9	Testin osat	26
3.9.1	Jarrun jäähdytyksen säätöjakso	26
3.9.2	Jarrun sisäänajovaihe	28
3.9.3	Päästöjen mittausvaihe	29
3.9.4	Huomioitavaa mittauksista	30
3.9.5	Kalibrointivaatimukset	31
4	Jarrupäästöjen analysointi	32
4.1	Hiukkasten massan (PM) mittaaminen	32
4.2	Hiukkasten lukumäärän (PN) mittaaminen	34
4.3	Massahäviön mittaus	36
5	Jarrujen päästöjen vähennyskeinot	38
6	Yhteenveto	41
	Lähteet	44

## Lyhenteet

- AC.3: Harmonization Convention Administrative Committee.
- GRPE: The Working Party on Pollution and Energy, Yhdistyneiden kansakuntien saastumista ja energiaa käsittelevä työryhmä.
- GTR: Global Technical Regulations, UNECE:n kansainväliset tekniset säännöt.
- ICE: Internal Combustion Engine, polttomoottorilla varustettu ajoneuvo.
- ILS: Kansainvälisten tutkimuslaitosten yhteinen tutkimus, Interlaboratory Study.
- LM: Low metallic, puolimetallinen kitkamateriaali.
- NAO: Non-asbestos Organic, asbestiton orgaaninen kitkamateriaali.
- NOVC-HEV: Not off-vehicle Charging Hybrid electric Vehicle, ei ladattava hybridiajoneuvo.
- OVC-HEV: Off-vehicle Charging Hybrid electric Vehicle, ladattava hybridiajoneuvo.
- PAH: Polysyklinen aromaattinen hiilivety.
- PEV: Pure Electric Vehicle, täyssähköajoneuvo.
- PM<sub>10</sub>: Particulate Mass, pienhiukkasten massa, joiden läpimitta on alle 10 mikrometriä.

- PM<sub>2,5</sub>: Particulate Mass, pienhiukkasten massa, joiden läpimitta on alle 2,5 mikrometriä.
- PMP: Particle Measurement Program, epävirallinen työryhmä UNECE:n saastumista ja energiaa käsittelevässä työryhmässä.
- PN: Particle Number, hiukkasten lukumäärä.
- SPN: Solid Particle number, Kiinteiden hiukkasten lukumäärä.
- TF: Task Force, työryhmä.
- TPN: Total Particle Number, hiukkasten lukumäärä.
- UNECE: The United Nations Economic Commission for Europe, Yhdistyneiden kansakuntien Euroopan talouskomissio.
- WLTP: Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure, maailmanlaajuinen harmonisoitu kevyiden ajoneuvojen testimenetelmä.

## 1 Johdanto

Kun vaihtoehtoisten voimansiirtojärjestelmien käyttö yleistyy, muiden kuin pakokaasupäästöjen merkitys korostuu. Tämä näkyy uudessa Euro 7 -päästöstandardissa, joka sisältää myös jarrujen hiukkaspäästömittaukset. Varhaisissa autojen jarruja koskevissa tutkimuksissa jo havaittiin, että jarrutuksessa syntyy hiukkasia kahdessa eri kokoluokassa massan perusteella eroteltuna [1, s. 34].

Liikenteen ilmassa kulkeutuvien hiukkasten aiheuttamia terveysriskejä on tutkittu laajasti. Nykyisen epidemiologisen tutkimuksen kohteena ovat alle 100 nanometrin halkaisijaltaan olevat ultrapienet hiukkaset, jotka voivat saavuttaa ihmisen keuhkojen syvät alueet ja ovat siksi vakava terveysriski [2, s. 318–328]. Muiden kuin pakokaasupäästöjen hiukkasten osuus on jo nyt yli 90 prosenttia liikenteen PM<sub>10</sub>-päästöistä ja 85 prosenttia PM<sub>2,5</sub>-päästöistä [3, s. 10–17].

UNECE:n Particle Measurement Program (PMP) kehittää parhaillaan standardeitua GTR (Global Technical Regulations) testiprotokollia jarrujen kulumispäästöjen mittaamiseksi tulevaa sääntelyä varten. PMP on epävirallinen työryhmä Yhdistyneiden kansakuntien saastumista ja energiaa käsittelevässä työryhmässä (GRPE). Tavoitteena on ollut kehittää testausmenetelmiä ja WLTP-jarrusykliä (WLTP, Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure), jotta eri jarrujärjestelmien vertailu olisi mahdollista. Tulevassa Euro 7:n jarrupäästömittauksissa tullaan käyttämään tätä GTR-protokollan mukaista jarrumittausmenetelmää.

Tämän työn päätavoitteena oli tarkastella laajasti UNECE:n GTR-protokollan teknisiä vaatimuksia jarrupäästömittaukselle sekä selvittää mittauksiin tarvittavat pakolliset laitteistot ja mittajärjestelyt.

Työn alussa kuvataan jarrupölyn hiukkaspäästöjä ja niiden aiheuttamia terveyshaittoja tieteellisten julkaisujen pohjalta. Lisäksi tuodaan esiin tutkimuksia jarrumateriaalien koostumuksien ja ajoneuvojen rakenneratkaisujen vaikutuksista hiukkaspäästöihin. Pääosa työstä kuitenkin keskittyy selvittämään GTR:n

mukaisia jarruhiukkasmittauksien vaatimuksia jarrudynamometrillä. Lopussa pohditaan, miten jarrupäästöjä tutkimusten perusteella voitaisiin vähentää.

## 2 Jarrupöly ja hiukkaset

Hiukkasten haitoissa [4, s. 371–386] on otettava huomioon useita tekijöitä, kuten hiukkaskoko, kemiallinen koostumus, pinta-ala, kemia ja varaus. Hiukkaskoko ja kemiallinen koostumus ovat tärkeimmät tekijät. Karkeat hiukkaset laskeutuvat pääasiassa ylempiin hengitysteihin, kun taas ultrapienet hiukkaset tunkeutuvat syväälle keuhkoihin ja aiheuttavat hapettumisstressiin ja tulehdukseen liittyviä vaaroja. Ultrapienet hiukkaset voivat myös siirtyä verenkiertoon ja siirtyä muihin kudoksiin, kuten maksaan, munuaisiin ja aivoihin. Huomattava osa jarrukulutushiukkasista on halkaisijaltaan alle 100 nm, mikä aiheuttaa huolta niiden mahdollisista haitallisista terveysvaikutuksista. Altistuminen hengitettävälle hiukkasille voi johtaa hengityselinten ja sydän- ja verisuonitautien sairauksiin sekä kuolleisuuteen sydän- ja verisuonitauteihin, hengityselinten sairauksiin ja keuhkosyöpään. Vaikka ei ole olemassa kattavia tutkimuksia, joissa jarrujen kuluminen aiheuttamat hiukkaset yhdistettäisiin suoraan ihmisten terveyteen.

Hiukkasten kemiallinen koostumus on tärkeä tekijä haitallisten vaikutusten kannalta ihmisten terveyteen. Useat PM<sub>2,5</sub>-hiukkasten ainesosat, kuten PAH-yhdisteet (polysyklinen aromaattinen hiilivety), metallit ja epäorgaaniset suolat, ovat tunnettuja aiheuttamaan haitallisia vaikutuksia terveydelle [4, s. 371–386]. Siirtymämetallit, kuten rauta, kupari, nikkeli ja kromi, voivat tuottaa reaktiivisia happilajeja ja aiheuttaa hapetusstressiä biologisissa kudoksissa. Metallit, kuten sinkki, alumiini ja lyijy, voivat myös vaikuttaa siirtymämetallien toksisiin vaikutuksiin joko tehostamalla tai vähentämällä niiden aktiivisuutta. Lisäksi on muitakin alkuaineita, jotka on yhdistetty negatiivisiin reaktioihin. Epidemiologiset tutkimukset ovat osoittaneet, että veren lyijypitoisuuden ja sydän- ja verisuonitautikuolleisuuden ja -sairastavuuden välillä on korkea korrelaatio, kun taas kupari ja rikki on yhdistetty lisääntyneeseen kuukausikuolleisuuteen. Useissa tutkimuksissa on yhdistetty eri metallien pitoisuudet pienhiukkasissa terveyshaittoihin, kuten lyhytaikaiseen kuolleisuuteen, keuhkojen tulehdukseen ja



keuhkovaurioihin. Kansainvälinen syöväntutkimuskeskus on luokitellut antimonin mahdolliseksi ihmisen keuhkojen syöpää aiheuttavaksi aineeksi.

Kitkapinnat vaikuttavat siihen, miten hyvin jarrujärjestelmä toimii ja miten paljon siirtymistä tapahtuu jarrupäälysteiden pintojen välillä. Yleisimpiä kitka-aineita ovat alumiinioksidi, rautaoksidit, kvartsi ja zirkoni [5, s. 291]. Henkilöautoissa käytetään yleensä kolmea erilaista jarrupäälystetyyppiä: asbestittomia orgaanisia (NAO), puolimetallisia ja matala-asbestisia metallisia (LM). Nykyaikaiset asbestittomat jarrupäälysteet sisältävät eri epäorgaanisia yhdisteitä kuin vanhemmat päälysteet, vaikka metalliyhdisteet ovatkin pysyneet jokseenkin samoina. Metallipitoisuudet jarrujen päälysteissä vaihtelevat. Kuvassa 1 esitetystä taulukosta nähdään, että kuparia ja rautaa esiintyy merkittäviä määriä (jopa 20,1 % ja 9,8 % massasta). Myös muita metalliyhdisteitä, erityisesti magnesiumia, kaliumia, rikkiä ja sinkkiä, esiintyy suurehkoja määriä. [6, s. 4.]

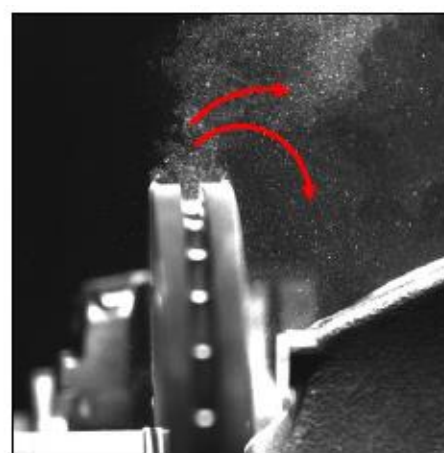
Element	Amount (wt %) in the following friction materials				
	M1	M2	M3	M4	M6
Magnesium	10.4	1.3	8.7	11.6	2.6
Aluminium	9.1	3.5	8.4	1.4	1.1
Silicon	5.8	3.0	6.3	11.2	3.9
Phosphorus	0.90	0.13	0.29	0.05	0.01
Sulphur	5.2	2.8	7.1	3.7	6.4
Potassium	0.67	3.7	0.48	2.1	4.0
Calcium	5.0	3.6	1.5	3.4	2.3
Titanium	0.17	9.7	0.11	4.2	9.0
Chromium	3.3	—	2.0	3.3	0.05
Iron	7.1	4.2	9.8	12.2	0.88
Copper	5.4	5.9	20.1	9.9	2.7
Zinc	12.5	3.2	7.0	4.3	0.05
Strontium	0.01	—	0.029	—	0.46
Zirconium	0.14	24.7	3.1	4.4	15.3
Molybdenum	—	—	1.6	—	0.89
Tin	8.8	2.2	0.38	5.5	1.7
Antimony	—	—	4.6	—	—
Barium	—	3.9	1.5	0.16	27.7
Bismuth	0.81	0.98	—	0.27	—
Carbon	22.4	23.7	16.2	19.1	19.8
Fluorine	2.1	2.5	0.44	3.2	0.47

Kuva 1. Kitkamateriaalien koostumus [6, s. 4].

NAO-typin jarrupäälysteet ovat suhteellisen pehmeitä ja aiheuttavat vähän jarrumelua verrattuna muihin tyyppihin. Ne menettävät kuitenkin jarrutuskapasiteettiaan suurilla nopeuksilla ja korkeissa lämpötiloissa sekä tuottavat enemmän pölyä kuin muut tyypit. Vähämetalliset kitkapinnat koostuvat orgaanisista yhdisteistä, joihin on sekoitettu pieniä määriä metalleja (10–30 painoprosenttia). Niillä

on suuri kitka ja hyvä jarrutuskyky korkeissa lämpötiloissa. Puolimetallisissa jarrupaloissa on enemmän metallia (jopa 65 % massasta), mikä tekee niistä kestävämpiä ja lämmönsiirtokyvyltään erinomaisia. Toisaalta niillä on taipumus kuluttaa jarrulevyjä nopeammin ja niillä on häiritseviä meluominaisuuksia.

Jarrituksen aikana levyn ja jarrupäällysteen välillä syntyy kitkakosketus, jonka seurauksena syntyy erikokoisia hiukkasia. Kuvassa 2 esitetään jarruhiukkasten irtoaminen jarrusta levyn pyöriessä. PM<sub>10</sub>-hiukkasten (hiukkaskoko alle 10 mikrometriä) päästökertoimet jarrujen kulumisesta ovat yleensä välillä 2,0–8,0 mg/km henkilöautojen osalta [7, s. 2491–2504]. Ilmenaun teknisen yliopiston tutkimuksessa PM<sub>10</sub>-hiukkasten päästöt olivat noin 6,0–7,0 mg/km henkilöautoissa [8, s. 2], mikä vastaa melko hyvin Euro 5/6-standardin dieselajoneuvojen pakokaasupäästöjen standardia. Mittauksissa oli saatu jopa 14 mg/km hiukkaspäästöarvoja [8, s. 8].



Kuva 2. Hiukkasten leviäminen jarrulevytä [8, s. 10].

Kuvassa 3 esitellään tulevan Euro 7 -normin tämänhetkinen ehdotus PM<sub>10</sub>-raja-arvoksi 7 mg/km. Nykyisten autojen jarrupäästöt saattavat siis ylittää tulevat raja-arvot. Vuonna 2035 raja putoaa arvoon 3 mg/km. Mittaus tapahtuu UNECE:n GTR-menetelmän mukaan.

Table 4: Euro 7 brake particle emission limits in standard driving cycle applying until 31/12/2034

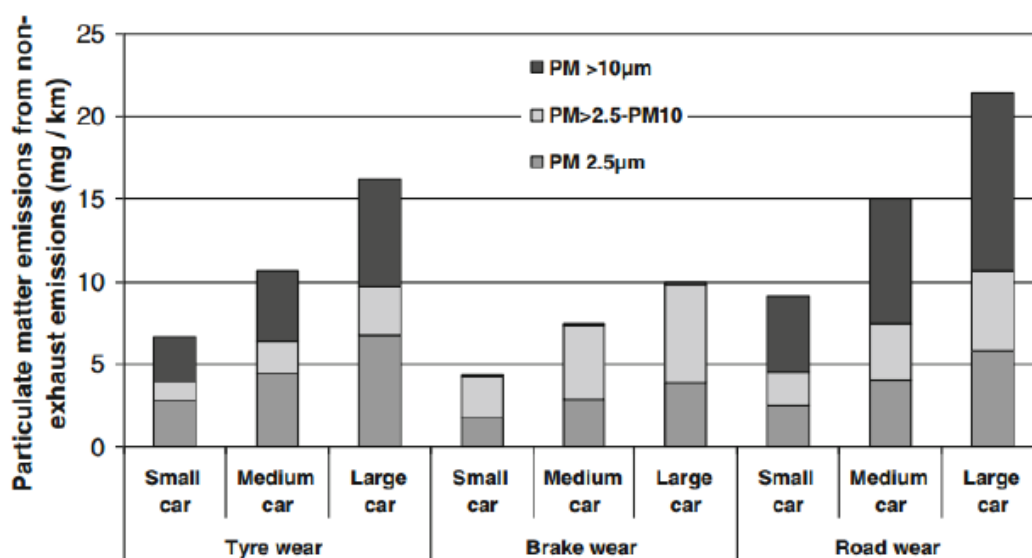
Emission limits in mg/km per vehicle	M1, N1 vehicles	M2, M3 vehicles	N2, N3 vehicles
Brake particle emissions (PM <sub>10</sub> )	7		
Brake particle emissions (PN)			

Table 5: Euro 7 brake particle emission limits in applying from 1/1/2035

Emission limits in mg/km per vehicle	M1, N1 vehicles	M2, M3 vehicles	N2, N3 vehicles
Brake particle emissions (PM <sub>10</sub> )	3		
Brake particle emissions (PN)			

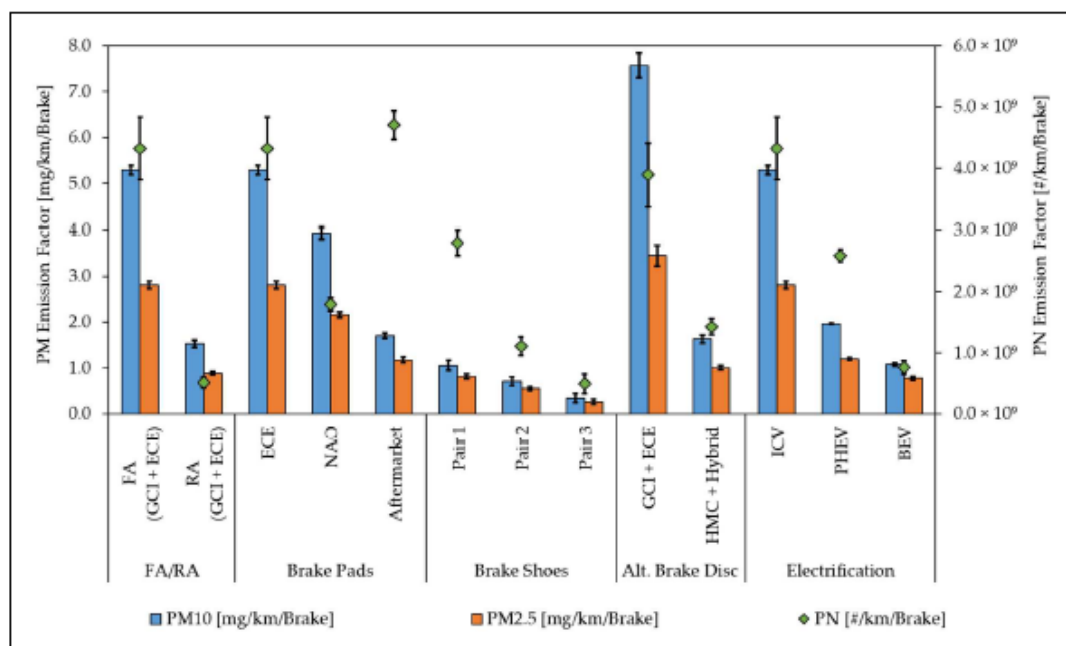
### Kuva 3. Euro 7 -vaatimukset jarrujen hiukaspäästöille.

Ajoneuvon massa vaikuttaa muiden kuin pakokaasuhiukaspäästöjen syntyymiseen merkittävästi. Renkas-, jarru- ja tiekulutus lisääntyvät massan kasvaessa, kuten kuvasta 4 voidaan havaita [3, s. 4]. Jarrujen aiheuttamat hiukaspäästöt eivät ole näistä muista kuin pakokaasun aiheuttamista päästöistä suurimmat, mutta renkaan ja tiekulutuksen aiheuttamia päästöjä on vaikeampi vähentää, joten lainsäädäntö keskittyy nyt jarrujen päästöjen vähentämiseen.



Kuva 4. Ajoneuvon massan vaikutus hiukaspäästöihin [3, s. 4].

Hiukkaspäästöihin vaikuttaa jarrun rakenne ja se, käytetäänkö sähköistä regeneraatiota. Kuvasta 5 huomataan, että rumpujarrut tuottavat selkeästi vähemmän päästöjä kuin levyjarrut, koska jarrupöly varastoituu rumpun sisään ja materiaalit ovat erilaisia. Voidaan havaita myös, että täyssähköauton (BEV) jarrujen hiukkaspäästöt ovat n. neljäsosa pelkällä polttomoottoriautolla (ICV) varustetun auton jarrujen hiukkaspäästöihin verrattuna [8, s. 4].



Kuva 5. Jarrutustavan ja -rakenteen vaikutus hiukkaspäästöihin [8, s. 4].

Eräässä tutkimuksessa tutkittiin ruostutetun jarrulevyn aiheuttamia hiukkaspäästöjä [9, s. 6]. Siinä jarrutustehon osalta havaittiin, että 96 tunnin suolasumulle altistumisen jälkeen, ruostunut jarrulevy tuotti johdonmukaisesti huomattavasti alhaisemman kitkakertoimen ja levyn pintalämpötila oli alhaisempi kuin ruosteettomalla levyllä. Kuitenkin ruostunut levy tuotti vähintään kaksinkertaisen määrän ja massan hiukkaspäästöjä PM<sub>2,5</sub>- ja PM<sub>10</sub>-luokkiin kuuluvien hiukkasten määrän osalta ja jopa lähes 30 kertaa enemmän hiukkasten massaa PM<sub>10</sub>-luokassa käytettäessä suurempaa jarrupainetta. Tämän erittäin merkittävän kasvun syynä voi olla suolasumuliuksen tuottama korroosiotuotteet, erityisesti rautaoksidit, jotka lisäävät hiukkaspäästöjä.

Kun sähköajoneuvojen riippuvuus regeneroivasta jarrutusenergiasta lisääntyy, niin mekaanisia jarruja käytetään vähemmän. Tämä voi aiheuttaa jarrulevyjen ruostumista käyttämättömyyden vuoksi. Esitetyt tulokset osoittavat, että harvemmat jarrutukset voivat aiheuttaa enemmän hiukkaspäästöjä, erityisesti kun jarrulevy on ruostunut. Tämä voi johtaa huomattavasti suurempiin päästöihin kuin jarruja tiheämmin käytettäessä.

### 3 Jarrupölyn mittaus

Tämä työn luku perustuu UNECE:n GTR-ohjeistukseen (ECE/TRANS/WP.29/GRPE/2023/4, Proposal for a new UN GTR on Laboratory Measurement of Brake Emissions for Light-Duty Vehicles) [10].

Viime vuosina kiinnostus tieliikenteen muiden kuin pakokaasupäästöjen tutkimiseen on kasvanut merkittävästi. Aikaisemmin kaikki säätelytoimet kohdistuivat pakokaasupäästöjen vähentämiseen, mutta kun ne vähenivät tiukkojen säädösten vuoksi, niin muiden kuin pakokaasupäästöjen, kuten jarrupölyn, suhteellinen osuus ympäristön hiukkaspitoisuuksista kasvoi. Ajoneuvojen valmistajilla on intressiä yhdenmukaistaa jarrupäästöjen testausmenettelyjä ja suorituskykyvaatimuksia maailmanlaajuisesti, sillä he valmistavat ajoneuvoja maailmanlaajuiselle asiakaskunnalle ja useille eri alueille. Myös sääntelyviranomaiset ovat kiinnostuneita maailmanlaajuisesta yhdenmukaistamisesta tehokkaamman kehityksen ja teknisen kehityksen mukautumisen aikaansaamiseksi.

UNECE:n GTR [10] koskee jarrujen kulumisesta aiheutuvien hiukkaspäästöjen maailmanlaajuisia yhdenmukaistettuja kevyiden ajoneuvojen testausmenettelyjä (WLTP). GTR:llä pyritään yhdenmukaistamaan kevyiden ajoneuvojen päästöjä koskevat testausmenettelyt mahdollisimman hyvin todellisia ajo-olosuhteita edustaviksi. UNECE:n GTR-asiakirjat on tarkoitus sisällyttää alueelliseen lainsäädäntöön mahdollisimman monessa sopimuspuolella. Ajoneuvoluokkien valinta on haasteellista, koska se riippuu alueellisista olosuhteista. GTR:n soveltamisalan kehittämisessä on oltu varovaisia, sillä liian laaja muodollinen soveltamisala voi estää tai vaikeuttaa sen täytäntöönpanoa sopimusosapuolissa. Sen

takia dynamometritestausmenettely on rajattu alle 3500 kg:n ajoneuvoihin. Vielä tammikuussa 2023 [5] GTR:n ohjeistus on ehdotelma, ennen kuin siitä tulee lopullinen ja virallinen versio. Sitä käytetään esimerkiksi tulevassa Euro 7 -jarrumittauksissa.

### 3.1 Tausta

UNECE GRPE:n (The Working Party on Pollution and Energy) päätöksen mukaisesti vuonna 2013 annettiin tehtäväksi PMP-työryhmälle (Particulate Measurement Programme) tutkia tieliikenteen muiden kuin pakokaasupäästöjen hiukkaspäästöjä. PMP-työryhmän tärkeimpänä tavoitteena oli selvittää, tarvitaanko hiukkasten mittausmenettelyjä laajentaa koskemaan muita lähteitä, kuten jarruja, renkaiden kulumista ja tien kulumista.

PMP-työryhmä valitsi jarrujen ja renkaiden kulumisen tieliikenteen muiden kuin pakokaasupäästöjen merkittävimmiksi lähteiksi ja määritteli ne tulevien tutkimusten pääaiheiksi. Jarrukulumis päästöjen osalta PMP-työryhmän tärkeimpänä tehtävänä oli määrittellä "normaaleja" tai "tyypillisiä" ajo-olosuhteita, tutkia nykyisten ajosykliden soveltuvuutta jarruista aiheutuvien hiukkaspäästöjen tutkimiseen ja kehittää uusi testisykli, joka jäljittelee kevyiden ajoneuvojen ajo- ja jarrustointia todellisissa olosuhteissa. Lisäksi työryhmää laajennettiin siten, että siihen kuului myös muita kuin pakokaasuasiantuntijoita. Työryhmä kehitti ohjeita ja parhaita käytäntöjä jarrujen kulumishiukkasten näytteenottoa ja mittausta varten sekä testitulosten raportointia koskevia vähimmäisvaatimuksia.

AC.3 (Harmonization Convention Administrative Committee) hyväksyi PMP-työryhmän ensimmäisen toimeksiannon kesäkuussa 2013. Se koski jarrujen hiukkaspäästöjä. PMP-työryhmän tavoitteena oli saavuttaa useita tavoitteita kesäkuuhun 2016 mennessä, kuten kirjallisuustutkimuksen tekeminen muiden kuin pakokaasupäästöjen hiukkaspäästöjen fysikaaliskemiallisesta luonteesta, massasta, lukumäärästä ja kokojakaumasta. Lisäksi tavoitteena oli koota tärkeimpien tietämyksen puutteita, tulevan tutkimuksen tarpeiden yksilöiminen, raportoinnin vaatimukset, sekä asiantuntijaryhmän perustaminen muiden kuin

pakokaasupäästöjen alalla. Työryhmän tehtävänä oli analysoida WLTP-tietokantaa normaalien ja äärimmäisten ajo-olosuhteiden määrittelemiseksi ja kerätä tietoa nykyisistä menetelmistä, joilla otetaan näytteitä ja mitataan muita kuin pakokaasupäästöjä.

AC.3 hyväksyi kesäkuussa 2016 PMP-työryhmän toisen toimeksiannon, joka korostaa muiden kuin pakokaasupäästöjen merkitystä. Toimeksiannon mukaan PMP-työryhmän tulee kehittää yhteisesti hyväksytty testimenettely jarrujen kulumishiukkasten näytteenottoa ja arviointia varten sekä massan, että lukumäärän osalta. Tavoitteena on tarjota tarvittava väline jarrupäästöjä koskeville tuleville tutkimuksille, joita voidaan vertailla keskenään helposti. Toimeksiantoön liittyen käsiteltiin seuraavia asioita raportointikaudella 2016–2019:

- Kehitettiin ja validointiin uusi testisykli jarrukulumishiukkasten tutkimiseen.
- Tutkittiin ja valittiin menetelmiä hiukkasten tuottamiseen ja näytteenottoon.
- Tutkittiin ja valittiin mittalaitteita jarrukulumishiukkasten mittaamiseen ja karakterisointiin.

PMP-työryhmä analysoi nykyisten jarrusyklien soveltuvuutta perusteellisesti ja päätti kehittää uuden testisyklin, joka on tarkoitettu jarrujen kulumispartikkelien tutkimiseen. Tämän vuoksi työryhmä perusti lokakuussa 2016 erityisen työryhmän (TF1), jonka tehtävänä oli nopeuttaa testisyklin kehittämistä. Syyskuussa 2017 PMP-työryhmä päätti perustaa erityisen työryhmän (TF2), jonka tehtävänä oli tutkia, valita menetelmät sekä instrumentit jarrujen kulumishiukkasten mittaamiseen. TF2 aloitti toimintansa lokakuussa 2017.

Raportointikaudella 2016–2019 PMP:tä käsittelevä työryhmä pyrki saavuttamaan useita tavoitteita. Ensinnäkin työryhmä valitsi jarrutestilaitteiston menetelmän jarrujen kulumishiukkasten tuottamista ja näytteenottoa varten. Tämän lisäksi TF2 sopi yksimielisesti, että sekä PM (Particulate mass)- (PM<sub>10</sub> ja PM<sub>2,5</sub>)

että PN (Particle number)-päästöt ( $\geq 10$  nm) on otettava huomioon menetelmän tavoitemittausparametreina. Lisäksi työryhmä kehitti ja julkaisi WLTP-jarrusyklin, joka perustuu todellisiin tietoihin WLTP-tietokannasta ja edustaa todellisia sovelluksia. Työryhmä myös suoritti WLTP-jarrusyklin validoinnin laboratorioiden välisellä tarkkuusanalyysillä kahdeksassa eri laboratoriossa Euroopassa ja Yhdysvalloissa (ILS-1, Interlaboratory Study-1). Lisäksi työryhmä analysoi perusteellisesti nykyisiä menetelmiä ja laitteistoja jarruhiukkaspäästöjen näytteenottoa ja mittausta varten ja sopi siitä, että on tarpeen määritellä jarruhiukkaspäästöjen näytteenottoa ja mittausta koskevat vähimmäisvaatimukset ja -eritteilyt.

PMP-työryhmä päätti seuraavaksi perustaa kolmannen erillisen työryhmän (TF3) maaliskuussa 2021 järjestämään ja toteuttamaan uusia validointeja laboratorioissa (ILS-2). TF3:n tärkeimpiin tehtäviin kuului ILS-2:n järjestäminen ja toteuttaminen. ILS-2:n tehtäviin kuului jarruhiukkaspäästöjen näytteenottoa ja mittausta varten määriteltyjen toteutettavuuden ja sovellettavuuden tarkistaminen, hiukas- ja PN-päästömittausten toistettavuuden verifiointi.

Seuraavaksi PMP-työryhmä perusti neljännen erityisen työryhmän (TF4), jonka tehtävänä oli tutkia ja valita sopivat menetelmät kitkattoman jarrutuksen sisällyttämiseksi testausprotokollaan. TF4 laati viisi erilaista menetelmäehdotusta ja esitteli ne PMP-työryhmälle. Lopullinen ehdotus esiteltiin PMP-työryhmälle marraskuussa 2021). TF4 päätti toimintansa joulukuussa 2022, kun se oli pitänyt 21 kokousta ja toimittanut jarrupäästöjä koskevan GTR:n. PMP-työryhmä voi harkita TF4:n toiminnan jatkamista, jotta ehdotetut kitkajarrutuksen osuustoimintakertoimet voitaisiin muuttaa muiden kuin kitkajarrutuksen aiheuttamien PM- ja PN-päästöjen laskemiseksi. [10, s. 4–7.]

### 3.2 GTR-menetelmä jarrujen hiukkaspäästöjen mittaukseen

GTR:n ohje jarrujen hiukkaspäästöjen mittaukseen koskee ajoneuvoja, joissa käytetään kuivien kitkamateriaalien ja jarrulevyn tai jarrurummun yhdistelmään



perustuvaa kitkajarrua. Pienten sarjojen valmistajat voivat itse päättää tämän yleisohjeen soveltamisesta lainkäyttöalueellaan. [10, s. 8.]

### 3.3 Yleiset vaatimukset

Mittauksissa määritellään jarruperhe jarruasetelman perusteella, missä otetaan huomioon jarrun rakenneratkaisut. Eri ajoneuvot voivat kuulua yhteen jarrupäästöperheeseen riippumatta niiden sähköistysasteesta, jos niiden jarruasetelma on sama (esim. levyn koko, satula, palat jne.). Kitkajarrutuksen osuudet, näkyvät alla olevasta kuvasta 6. Kuvasta nähdään, että ICE:n (pelkkä polttomoottori) kerroin on 1, ei ladattavan (NOVC-HEV) kerroin 0,63, ladattavan hybridin (OVC-HEV) kerroin 0,30 ja täyssähköauton (PEV) kerroin 0,15. Kaikki testit tehdään täydellä kitkajarrutuksen arvoilla (kerroin 1), mutta ajoneuvotyypin mukainen kerroin vähentää lopullista päästöarvoa kertoimen mukaan. [10, s. 23.]

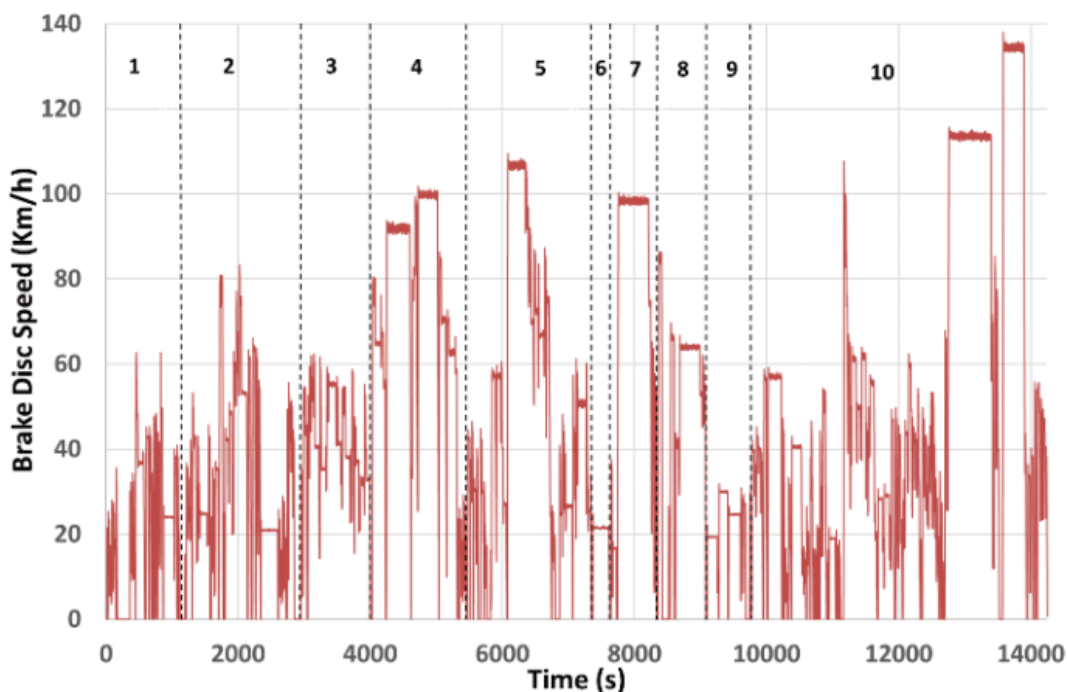
<i>Brake type</i>	<i>Vehicle Type</i>	<i>Friction Braking Share Coefficient (c)</i>
<u>Full-friction braking</u>	<u>ICE</u>	<u>1.0</u>
<u>Non-friction braking</u>	<u>NOVC-HEV Cat.1</u>	<u>0.63</u>
	<u>NOVC-HEV Cat.2</u>	<u>0.40-0.45 (subject to change within the boundaries until 23.12)</u>
	<u>OVC-HEV</u>	<u>0.30</u>
	<u>PEV</u>	<u>0.15</u>

Kuva 6. Kitkajarrutuksen osuus eri ajoneuvotyypeille [10, s. 23].

### 3.4 Testi-sykli

WLTP-jarrusykli koostuu 10:stä eri osiosta, jotka edustavat erilaisia ajo- ja jarrutusolosuhteita. Osiot ovat erotettu toisistaan jäähdytysjaksoilla. Kokonaisuudessaan syklin kesto on 15826 sekuntia ilman jäähdytysjaksoja. Jarrutushidastusjaksoja on 303 kappaletta ja kokonaismatka on 192 kilometriä. Keskinopeus on 43,7 km/h ja enimmäisnopeus 132,5 km/h. Keskimääräinen hidastuvuus on

0,97 m/s<sup>2</sup> ja suurin hidastuvuus 2,18 m/s. Kuvassa 7 on koko WLTP-jarrusykli, jossa on 10 osiota. [10, s. 53.]



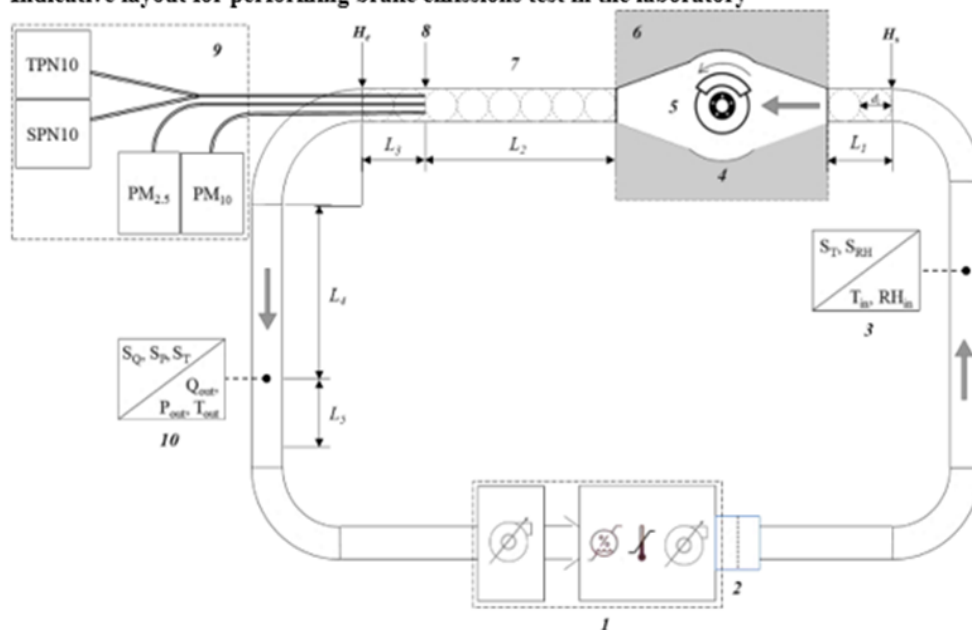
Kuva 7. WLTP-jarrusykli.

### 3.5 Testausjärjestelmän vaatimukset

GTR:n vaatimuksissa määritellään dynamometrijärjestelmä, jolla pyritään jarrujen hiukkaspäästöjen toistettaviin mittauksiin. Hyväksytyn jarrupäästötestin suorittaminen edellyttää useiden osajärjestelmien vankkaa integrointia, jotta voidaan varmistaa, että ajosykli, jäähdytysilma, dynamometrin ohjaus, jarrun kotelointi, näytteenottotunneli, aerosolien näytteenottojärjestelmät ja tiedonkeruu täyttävät kaikki GTR:ssä määritellyt vaatimukset. Kuvassa 8 esitetään koko mitausjärjestelmä. Tärkeimmät komponentit ovat nro 1 jäähdytyspuhaltimet, nro 6 jarrun asennuskotelo ja nro 9 hiukkasten analysointilaitteisto. [10, s. 25.]

Figure 7.1.

## Indicative layout for performing brake emissions test in the laboratory



Kuva 8. Testausjärjestelmä kokonaisuudessaan [10, s. 25].

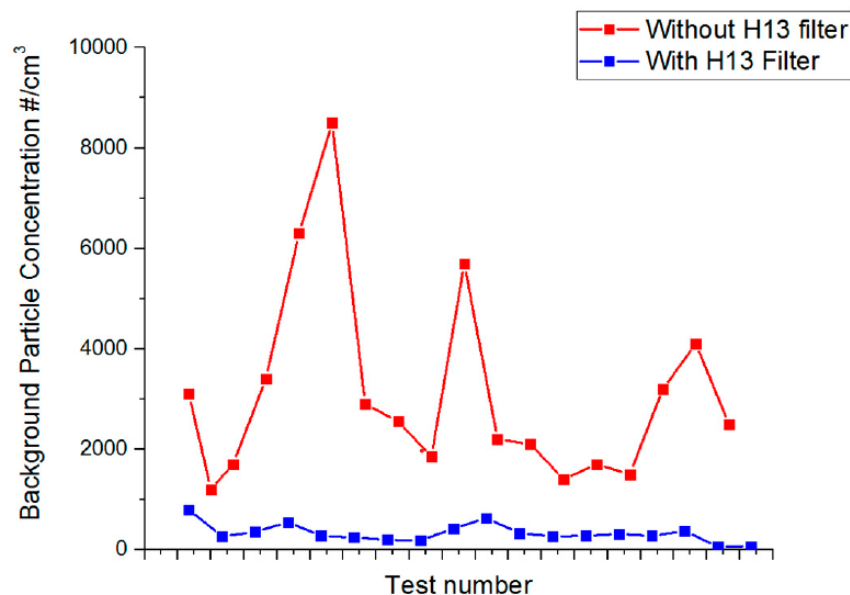
## 3.5.1 Ilmankäsittely ja jäähdytys

Jäähdytysilman lämpötilan ja kosteuden tulee olla stabiilit. Lisäksi jäähdytysilman on oltava puhdasta ja sen taustahiukkaspitoisuusarvojen on oltava matalat. Jäähdytysilman virtauksen on oltava tasaista, jotta voidaan taata toistettavat testausolosuhteet.

Ilmastointijärjestelmä syöttää testauslaitteistoon jäähdytysilmaa. Tyypillisesti järjestelmäkoonpanoon kuuluu jäähdytyslaitteita, jotka jäähdyttävät ja poistavat kosteutta ilmasta, lämmityslaitteita, jotka nostavat ilman lämpötilaa ja höyry- tai vesisumugeneraattoreita, jotka lisäävät ilman kosteutta.

Jäähdytysilman lämpötila on mittauksessa 23 °C ja ilmankosteus 50 % Rh laitteen vähimmäisvirtauksen ollessa 100–300 m<sup>3</sup>/h ja maksimivirtauksen ollessa 1000 m<sup>3</sup>/h. Jäähdytysilma on puhdistettava EN 1822 -standardin mukaisella H13 Hepa-suodattimella. Kuvassa 9 esitetään taustahiukkaspitoisuus suodattimen kanssa ja ilman. Taustahiukkaspitoisuudet määritellään samalla

mittalaitteistolla, kuin itse päästötetkin. Taustapitoisuusmittauksessa jarrulevy ei saa pyöriä ja jarrupalat eivät saa olla kontaktissa levyyn. Taustapitoisuusarvot vähennetään jarrun lopullisista mittaustuloksista. [10, s. 27–34.]



Kuva 9. Jarrumittausjärjestelmän taustahiukkaspitoisuus suodattimella ja ilman [11, s. 5].

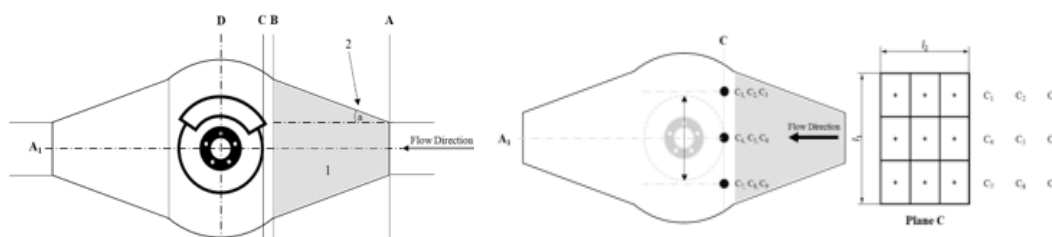
### 3.5.2 Jarrudynamometri

Systemi koostuu vaihtuvanopeuksista sähkömoottorista, jolla voidaan kiihdyttää jarrua tai pitää sen nopeus vakiona. Se myös simuloi mitattavan ajoneuvon pyörän hitausmomenttia, jotta testi vastaisi todellisia olosuhteita. Dynamometri koostuu:

- servo-ohjaimesta, jota tarvitaan käyttämään jarrua (hydraulinen tai sähköinen)
- mekaanisesta kokoonpanosta, johon voi kiinnittää testattavan jarrun

- antureista ja laitteista, joilla kerätään tietoa ja valvotaan järjestelmän toimintaa
- jarrukotelosta, joka on suljettu kammio ja johon jarru asennetaan testausta varten. Se estää käsittelemättömän ilman pääsemisen sisään ja jarrupölyn pääsemisen ulos.

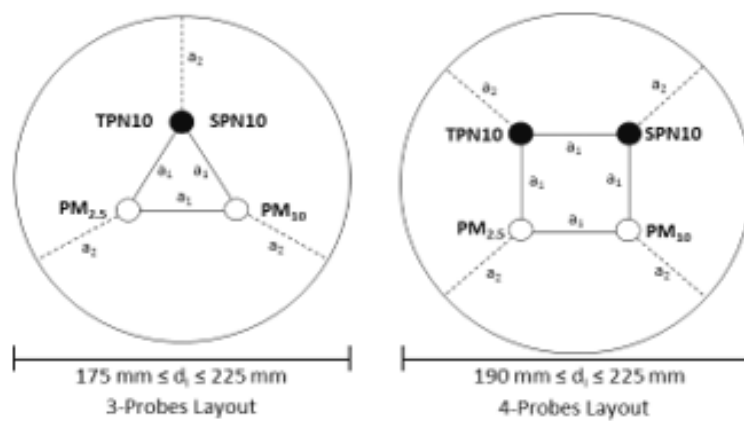
Kuvasta 10 nähdään jarrukotelon perusmuoto. Kotelossa ei saa olla jyrkkiä muutoksia ja pintojen pitää olla sähkökiillotettua ruostumatonta terästä. Jäähdytysilma pitää johtaa vaakatasossa koteloon ja jäähdytysilman nopeuden pitää olla 35 %:n sisällä toisistaan 9 mittapisteessä, kuten kuvassa 10 myös esitetään. [10, s. 36–37.]



Kuva 10. Suljettu jarrukotelo [10, s. 37].

### 3.5.3 Näytteenotto

Kanavan koko, joka johtaa ilman pois jarrusta, on oltava halkaisijaltaan 175–225 mm. Kanavan pituuden ennen hiukkasten näytteenottimia tulee olla vähintään kuusi kertaa kanavan halkaisija. Näytteenottimet pitää sijoittaa kuvan 11 mukaisesti kanavan sisään. Kolmen tai neljän näytteenottimen käyttö on mahdollista. Näytteenottimet asetetaan tasaisesti tunnelin sisälle, niin että niiden vähimmäisetäisyys on 47,5 mm toisistaan ja kanavan seinämistä. [10, s. 40–42.]



Kuva 11. Näytteenottoputkien asennus kanavassa [10, s. 42].

### 3.6 Syötettävät parametrit

Taulukosta 1 näkyvät parametrit, jotka testauslaitoksella on oltava käytettävissä ennen mittausta.

Taulukko 1. Testiparametrit [10, s. 46–47].

	Parametrit	Kuvaus
1	Ajoneuvon merkki ja malli	Jarruperhe. Tyyppi (ICE, PEV, OVH-HEV jne.)
2	Mitattava akseli	Etu- vai taka-akseli
3	Asennuspaikka	Oikea vai vasen
4	Testimassa	Jarrupäästöperheen kanta-ajoneuvon massa
5	Jarruvoiman jakautuminen	Jarrusuhte etuakseli/taka-akseli
6	Kiinnitystapa	Jarruasetelman tuentatapa
7	Levyn tai rummun osanumero	Valmistajan koodi
8	Kitkamateriaalin osanumero	Valmistajan koodi
9	Nimellinen pyöräkuorma	Kuormitus testattavassa jarruyksikössä
10	Testipyöräkuorma	Kuormitus testattavassa jarruyksikössä, kun häviöt otettu huomioon
11	Renkaan dynaaminen säde	Renkaan säde kuormituksessa

12	Jarrun tehollinen säde	Etäisyys jarrun keskipisteestä kitkamateriaalin keskipisteeseen
13	Jarrun nimellinen hitausmomentti	Pyöräkuorma, joka rasittaa käyttöjarrua kuten varsinainen ajoneuvo
14	Jarrutestin hitausmomentti	Jarrun nimellinen hitausvoima lisättynä häviöillä ja tiekuormalla
15	Levyn/rummun suurin halkaisija	Halkaisija
16	Levyn massa	Levyn massa ennen testausta, käytetään nimelliskuormassa ja jäähdytysmäärittelyissä
17	Mäntien lukumäärä puolta kohti	Satulan yhdellä puolella olevien mäntien lukumäärä
18	Männän halkaisija	Testattavan jarrun männän halkaisija
19	Satulan kiristysmomentti	Valmistajan kiritysarvo satulan kiinnitykselle
20	Satulan/rummun tehokkuus	Tehokkuus kitkahäviöiden osalta, jos ei määritetty niin käytetään 100 %
21	Kynnyspaine	Vähimmäispaine sisäisen vastuksen voittamiseksi
22	Jarrun kierous	Sallittu levyn/rummun kierous

Ajoneuvon testimassa ( $M_{veh}$ ) on ajokuntoisen ajoneuvon massa lisättynä sen ajoneuvon lisävarusteiden massalla 37,5 kg, joka vastaa 0,5 matkustajan lisämassaa luokan 1–1 (henkilöauto) ajoneuvoissa.

Jarruvoimajakauma kuvaa kokonaisjarruvoiman välistä suhdetta etu- (FAF) ja taka-akselin (RAF) välillä. Ajoneuvon jarruvoiman jakauman antaa ajoneuvon valmistaja, mutta jos sitä ei ole saatavilla, niin voima jaetaan 77 % etuakselille ja 32 % taka-akselille 1–1-luokan ajoneuvoilla (66 % ja 39 % tavaran kuljetukseen soveltuvan luokan 2 ajoneuvoissa).

Pyörän nimelliskuorma ( $WL_n$ ) edustaa testattavan jarrun kuormitusta ennen tiekuormien tai häviöiden huomioon ottamista:

$$WL_{n-f} = 0,5 * M_{veh} * FAF, \text{ etupyörän nimelliskuorma}$$

$$WL_{n-r} = 0,5 * M_{veh} * RAF, \text{ takapyörän nimelliskuorma}$$

Testipyöräkuorma ( $WL_t$ ) edustaa testattavan jarrun kuormitusta, kun tievoimat ja muut häviöt ovat otettu huomioon.  $WL_t$ :tä on pienennetty 13 prosentilla verrattuna  $WL_n$ -arvoon.

$$WL_{t-f} = 0,87 * WL_{n-f}, \text{ etupyörän testikuorma}$$

$$WL_{t-r} = 0,87 * WL_{n-r}, \text{ takapyörän nimelliskuorma}$$

Jarrun nimellinen hitausmomentti ( $I_n$ ) tarkoittaa pyörän kuormitusta, jonka pyörimissäde on sama kuin renkaan dynaaminen vierintäsäde. Se lasketaan pyörän nimelliskuorman ( $WL_n$ ) ja renkaan dynaamisen säteen ( $r_R^2$ ) avulla:

$$I_n = WL_n * r_R^2$$

Jarrutestin hitausmomentti ( $I_t$ ) on jarrun nimellinen hitausmomentti ( $I_n$ ) vähennettynä ajoneuvon vierintävastusvoimalla ja muilla häviöillä. Jarrutestin hitausmomenttia pienennetään 13 prosentilla verrattuna nimelliseen hitausmomenttiin. [10, s. 42–46.]

### 3.7 Testin valmistelut

Testauksen esivalmisteluihin kuuluvat seuraavat seikat: [10, s. 48–49.]

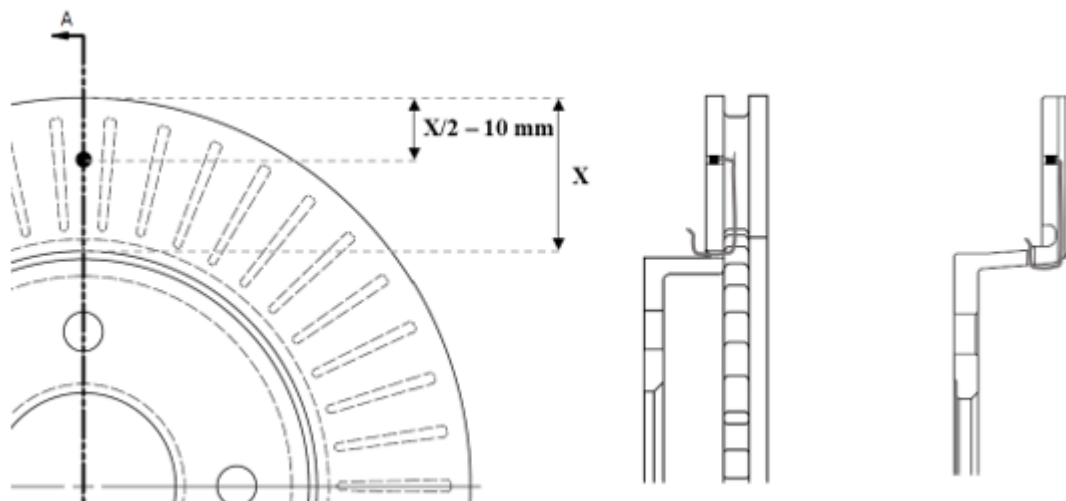
- Varmistetaan että esitiedot ja ohjelmistot ovat ajan tasalla.
- Syötetään jarrudynamometrin asetukset.
- Asennetaan jarruasetelma testauslaitteeseen.



- Ilmataan jarrut.
- Mitataan levyn kierous (alle 0,05 mm).
- Testataan jarru 3–30 baarilla vuotojen tarkistusta varten.
- Suljetaan jarrukotelo, käynnistetään ilmastointijärjestelmä ja tarkistetaan jäähdytysjärjestelmän toiminta.
- Suoritetaan erilaisia kiihdytyksiä, joilla saavutetaan nopeudet 5 km/h, 50 km/h ja 135 km/h. Kiihdytyksen aikana kirjataan sekä hitausmomentti sen jälkeen, kun on ajettu tavoitenopeudella 10 sekuntia ja kun jarrupaine on nolla. Käytetään kiihtyvyytasoa  $1 \text{ m/s}^2$  nopeudelle 5 km/h ja  $2 \text{ m/s}^2$  kahdelle muulle tavoitenopeudelle. Tarkistetaan, että pyörimismomentti pysyy välillä 0–20 Nm.
- Toistetaan WLTP-jarrusyklin ensimmäinen jarrutustapahtuma 10 kertaa tiedonkeruun, parametrien, jarrutestin inertian ja koko järjestelmän toiminnan tarkastamiseksi.
- Tarkistetaan, että jäähdytysilmavirta täyttää vaatimukset.
- Tarkastetaan, että taustapäästötasot ovat sallituissa rajoissa.
- Varmistetaan, että mittarit ja laitteet ovat käytössä ja toimivat.

### 3.8 Lämpötilan mittaus

Mittauksissa on käytettävä jarrun lämpötilan mittaamiseen upotettuja termopareja, jotka kykenevät mittaamaan alueella 0–800 celsiusastetta. Levyyn termopari upotetaan kitkapinnan keskipisteestä 10 mm ulospäin säteen suuntaan 0,5 mm:n syvyyteen, kuten kuvassa 12 esitetään. [10, s. 50.]



Kuva 12. Termoparin asennus jarrulevyyn [10, s. 51].

### 3.9 Testin osat

Jarrupäästötesti dynamometrillä koostuu kolmesta osasta:

1. Jarrun jäähdytyksen säätö. Ensimmäisessä vaiheessa käytetään WLTP-jarrusyklin 10. osiota.
2. Jarrujen sisäänajo. Toisessa vaiheessa suoritetaan viisi toistoa kokonaisuudesta WLTP-jarrusyklistä.
3. Jarrupäästöjen mittaus. Viimeisessä vaiheessa suoritetaan yksi kokonainen WLTP-jarrusykli hiukkaspäästöjen mittaamiseen.

#### 3.9.1 Jarrun jäähdytyksen säätöjakso

Jotta eri jarrujen testausta varten voitaisiin suorittaa jäähdytysilman säätö, on käytettävä GTR:ssä kuvattua menetelmää. Tämä sisältää erityisiä sääntöjä jarrujen lämpötilan säätämiseksi ennen testiä.

Testauslaitoksen on ensin määritettävä asianmukainen jäähdytysilmavirta testattavalle jarrulle luokittelemalla se ryhmään sen etupyörän nimelliskuorman

( $WL_n-f$ ) ja levyn tai rummun massan (DM) suhteen ( $WL_n-f/DM$ ).  $WL_n-f/DM$ -suhde lasketaan jakamalla etupyörän nimelliskuorma ( $WL_n-f$ ) levyn tai rummun massalla (DM). Jokainen ryhmä määritellään seuraavasti:

- ryhmä 1:  $WL_n-f/DM \leq 45$
- ryhmä 2:  $45 < WL_n-f/DM \leq 65$
- ryhmä 3:  $65 < WL_n-f/DM \leq 85$
- ryhmä 4:  $WL_n-f/DM > 85$ .

Jäähdytyksen säätöjaksossa ajetaan vain WLTP-jarrusyklin 10. osiota, jonka aikana mitataan keskimääräinen (ABT) jarrulämpötila. Lisäksi lasketaan jarrutuksen alkulämpötilan keskiarvo (IBT) kuudesta valitusta jarrutustapahtumasta osion 10 aikana. Kuvassa 13 nämä kuusi mittapistettä esitetään (hidastustapahtuma). Myös jarrutustapahtumien lopullinen keskimääräinen jarrulämpötila (FBT) mitataan.

Parametri	Yksikkö	Hidastustapahtuma					
		#46	#101	#102	#103	#104	#106
Aloitusaika	s	2088	4438	4459	4494	4522	4903
Loppuaika	s	2092	4447	4467	4503	4529	4918
Jarrutuksen kesto	s	4.0	9.0	8.0	9.0	7.0	15.0
Alkuperäinen nopeus	km/h	97.4	112.0	68.2	80.9	73.4	132.5
Lopullinen nopeus	km/h	82.7	56.1	12.0	35.3	39.3	34.0

Kuva 13. WLTP-jarrusyklin 10:n osion hidastustapahtumat [10, s. 60].

Testimittauksen arvoja (ABT, IBT ja FBT) verrataan sitten kuvan kuvassa 14 näkyviin jarruryhmien lämpötilan tavoitearvoihin. Jäähdytysvirtaa säädetään, jos tavoitearvot eivät täyty.

<i>Ryhmä</i>	<i>ABT [A<sub>1</sub>]</i>	<i>IBT [A<sub>2</sub>] ± Toleranssi</i>	<i>FBT [A<sub>3</sub>] ± Toleranssi</i>
$WL_{n,f}/DM \leq 45$	$\geq 50$ °C	$65 \pm 25$ °C	$95 \pm 35$ °C
$45 < WL_{n,f}/DM \leq 65$	$\geq 55$ °C	$75 \pm 25$ °C	$115 \pm 35$ °C
$65 < WL_{n,f}/DM \leq 85$	$\geq 60$ °C	$85 \pm 25$ °C	$130 \pm 35$ °C
$WL_{n,f}/DM > 85$	$\geq 65$ °C	$95 \pm 25$ °C	$150 \pm 35$ °C

Kuva 14. Jarruryhmien lämpötilan tavoitearvot [10, s. 61].

Testauslaitoksen on noudatettava seuraavia vaiheita: Ensin jäähdytysilman virtaus on asetettava nimellisarvoon. Sitten jarru lämmitetään  $40 \pm 1$  asteeseen WLTP-jarrusyklin 10. osion ensimmäisten 7 jarrutustapahtuman (1–7) aikana (jarrutustapahtumat #190–#196 koko WLTP-jarrutussykliä tarkasteltaessa). Tämän jälkeen jarru jäähdytetään takaisin  $40 \pm 1$  asteeseen.

Jos tavoitelämpötilaa ei saavuteta edellä kuvatulla tavalla, yksi jarrutapahtumista 1–7 valitaan 10. osiosta ja toistetaan useita kertoja, kunnes jarrulämpötila saavuttaa  $40 \pm 1$  asteen tavoitelämpötilan. Tämän jälkeen suoritetaan WLTP-jarrutussyklin 10. osio jarrulämpötilan ollessa  $40 \pm 1$  astetta ja matka ajetaan ilman keskeytyksiä.

On tärkeää noudattaa edellä kuvattuja jarrulämpötilaa koskevia säännöksiä, sillä muussa tapauksessa jäähdytyksen säätöjakso on mitätöity. Tällaisessa tilanteessa testauslaitoksen on toistettava jäähdytyksen säätöjakso käyttäen eri ilmavirtaa. Jäähdytyksen säätöä voidaan kuitenkin toistaa samoilla käytetyillä jarrun osilla. [10, s. 59–63.]

### 3.9.2 Jarrun sisäänajovaihe

Sisäänajo koostuu viidestä peräkkäisestä kokonaisesta WLTP-jarrusyklin ajosta. Ilmavirta asetetaan edellisessä jäähdytysosiossa verifioituun arvoon. Aloitetaan WLTP-jarrutussyklin ensimmäinen ajo jarrulämpötilassa ( $23 \pm 5$  °C). Sisäänajossa ei käytetä varsinaisessa mittausosiossa olevia jäähdytysjaksoja syklin osioiden välissä, mutta eri WLTP-jarrusyklien välissä jäähdytetään jarru

40 asteeseen ennen uuden syklin käynnistämistä. Jos jarrun lämpötila jää alle 30 asteeseen, niin testi pitää keskeyttää ja jäähdytystä pitää säätää uudelleen. Uudet jarruosat vaaditaan, jos sisäänajo joudutaan aloittamaan uudestaan. [10, s. 64–65.]

### 3.9.3 Päästöjen mittausvaihe

WLTP-jarrutus syklin asianmukainen suorittaminen edellyttää kaikkien kymmenen syklin osion suorittamista peräkkäin, ja yksittäisten osioiden välillä on pakollinen jäähdytysjakso päästömittausjakson suorittamisen aikana. Päästömittaukseen sovelletaan erityissäännöksiä, jotka koskevat jarrulämpötilaa WLTP-jarrusyklin kunkin osion alussa. Testauslaitoksen on suoritettava seuraavat vaiheet: [10, s. 66–70.]

- Jäähdytysilmavirta säädetään nimellisarvoon.
- Aloitetaan WLTP-jarrutus syklin osio 1 jarrujen lämpötilassa ( $23 \pm 5 \text{ °C}$ ) suorittamatta mitään lämmittelypysähdyksiä.
- Syklin osioiden välissä jäähdytetään jarrua niin kauan kunnes lämpötila putoaa 40 asteeseen. Sen jälkeen voidaan aloittaa seuraava osio, kunnes kaikki 10 osiota on ajettu.
- Jos jarrun lämpötila on 30–40 °C osion lopussa, voidaan seuraava osio aloittaa välittömästi.
- Jos jarrun lämpötila jää osion lopussa alle 30 °C, niin testi pitää keskeyttää ja selvittää poikkeamat tai toistaa jäähdytyksen säätö. Keskeytyksen jälkeen aloitetaan uusilla jarruosilla sisäänajovaiheesta.

### 3.9.4 Huomioitavaa mittauksista

Jarrupölyn mittausjärjestelyissä pitää erityisesti ottaa huomioon, että jarrudynamometri noudattaa tarkasti pyydettyä WLTP-jarrusyklin nopeuskäyrästä. Virhe korostuu kaupunkijarrutustapahtumissa. Lisäksi dynamometrin asetuksissa pitää ottaa huomioon erinäiset vastusvoimat, kuten esimerkiksi vierintävastus, jotta jarrutusmomenttia voidaan vähentää häviöiden suhteessa.

Dynamometrin sisään tulevan jäähdytysilman lämpötila vaikuttaa voimakkaasti jarrun lämpötilaprofiiliin. Näin ollen tätä on valvottava tiukasti WLTP-jarrusyklin aikana. Myös sisään tulevan jäähdytysilman nopeus vaikuttaa voimakkaasti jarrun lämpötilaan, mikä on otettava huomioon, koska eri ajoneuvoissa on hyvinkin paljon toisistaan poikkeavia jarrukonstruktoita. Jarrujen lämpötilan on todettu olevan yksi tärkeimmistä hiukkaspäästöihin vaikuttavista asioista.

Jarrun lämpötila kunkin syklin alussa vaikuttaa lämpötilaan. Laboratorioiden on noudatettava tiukkaa protokollaa, jotta vältetään eroavaisuudet lämpötilassa. Testin alkulämpötilaa on tarkkailtava, kuten myös lämpötilaa testin osien välissä jarrulevyn alkulämpötila ei näytä kuitenkaan vaikuttavan jarrutuksen lopussa olevaan levyn lämpötilaan. Kaupunkiajoon liittyy suhteellisen alhainen jarrujen loppu- ja maksimilämpötila. Tämä viittaa mahdollisesti siihen, että hiukkaspäästöt (PN) ovat yleensä alhaisemmat kaupunkiympäristössä. Taajama-ajossa jarrujen keskimääräinen lämpötila on isompi, joten se johtaa korkeimpiin hiukkaspäästöihin. [11, s. 4–6.]

Erään valmistajan testeissä huomattiin [6, s. 6], että jarrusyklin aikana havaittiin useita hiukkspiikkejä, joista syklin 10. osio oli päästöjen kannalta merkittävin, sillä se aiheutti noin 90 prosenttia kokonaispäästöistä. Ilman virtausnopeuden ja näin ollen jarrulevyn lämpötilan vaikutus jarruhiukkaspäästöihin havaittiin olevan suuren. Pienimmällä virtausnopeudella havaittiin paljon enemmän päästöjä. Mitä suurempi oli jarrun pyörintänopeus lämpötilan pysyessä vakiona, sitä enemmän hiukkasia vapautui.

### 3.9.5 Kalibrointivaatimukset

GTR-menetelmäohjeissa on hyvin tarkat vaatimukset mittalaitteiston tarkkuuden ja kalibroinnin suhteen. Taulukossa 2 on eri laitteiden kalibrointien aikaintervallit.

Taulukko 2. Laitteiston kalibrointivaatimukset [10, s. 133].

Laite	Intervalli
Jarrudynamometri	Ensimmäisen asennuksen yhteydessä, vuosittain ja suurten huoltotöiden yhteydessä.
Vääntömomentin mittauslaite	Ensimmäisen asennuksen yhteydessä, vuosittain ja suurten huoltotöiden yhteydessä.
Jäähdytysilmavirran mittauslaite	Ensimmäisen asennuksen yhteydessä, vuosittain ja suurten huoltotöiden yhteydessä.
Jäähdytysilmavirran lämpötila-anturi	Vuosittain
Jäähdytysilmavirran ilmakan paineanturi	Vuosittain
Jäähdytysilman lämpötila-anturi	Vuosittain
Jäähdytysilman suhteellisen kosteuden anturi	Vuosittain
PM <sub>10</sub> Sykloninen erotin	Syklonin valmistaja toimittaa vaatimustenmukaisuustodistuksen ensimmäisen asennuksen yhteydessä.
PM <sub>2.5</sub> Sykloninen erotin	Syklonin valmistaja toimittaa vaatimustenmukaisuustodistuksen ensimmäisen asennuksen yhteydessä.
Mikrogramman tasapaino	Ensimmäisen asennuksen yhteydessä, vuosittain ja suurten huoltotöiden yhteydessä.
PM-näytteenoton virtausmittauslaite	Ensimmäisen asennuksen yhteydessä, vuosittain ja suurten huoltotöiden yhteydessä.
PM-näytteenottovirtauksen lämpötila-anturi	Vuosittain
PM-näytteenottovirtauksen paineanturi	Vuosittain
PN Sykloninen erotin	Syklonin valmistaja toimittaa vaatimustenmukaisuustodistuksen ensimmäisen asennuksen yhteydessä.
PN-näytteenottovirtauksen mittauslaite	13 kuukautta
PN näytteenottovirtauksen lämpötila-anturi	Vuosittain

PN näytteenottovirtauksen paineanturi	Vuosittain
Laimennusjärjestelmä TPN10:lle	6 kuukautta tai 13 kuukautta asetuksesta riippuen
Haihtuvien hiukkasten poistoaine SPN10:lle	6 kuukautta tai 13 kuukautta asetuksesta riippuen
Hiukkasten lukumäärän las-kuri	Ensimmäisen asennuksen yhteydessä, vuosittain ja suurten huoltotöiden yhteydessä.

## 4 Jarrupäästöjen analysointi

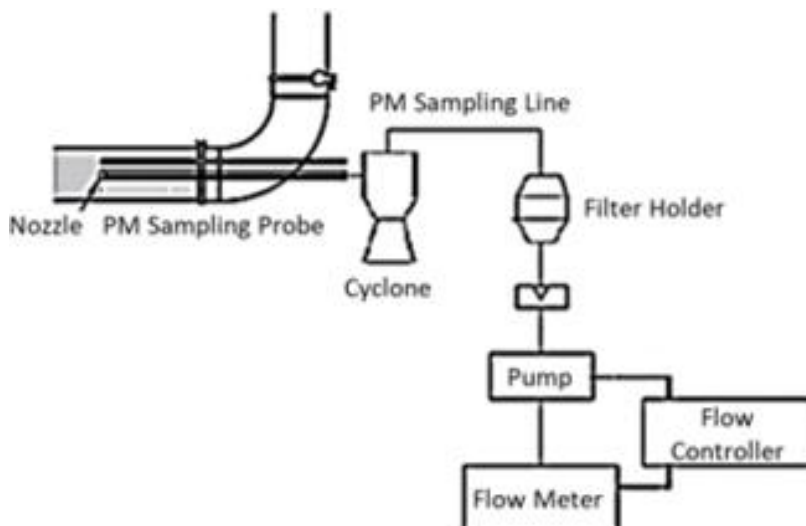
GTR-protokollasta [10] löytyvät seikkaperäiset ohjeet hiukkasten mittaamiselle. Alla olevassa kappaleessa muutamia poimintoja ohjeistuksesta.

WLTP jarrupäästötestin aikana mitataan hiukkasten massa (PM) ja hiukkasten lukumäärä (PN). Hiukkaspäästöjen ja testin parametrien perusteella saadaan testattavan jarrun päästökertoimet massana ja hiukkasten lukumääränä ajatun matkan yksikköä kohti. Testausjärjestelmän on mitattava jarrun PM<sub>10</sub>-päästöt, PM<sub>2,5</sub>-päästöt käyttäen erillisiä näytteenottojärjestelmiä kutakin läpimittaa (2,5 µm ja 10 µm) varten. Testausjärjestelmän on myös kyettävä mittaamaan hiukkasten kokonaislukumäärä PN (TPN10) ja kiinteiden hiukkasten lukumäärä PN (SPN10) hiukkasten nimelliskoolla, joka on noin 10 nm:n tai suurempi.

### 4.1 Hiukkasten massan (PM) mittaaminen

Testikanavassa on kaksi PM-näytteenottosondia kummallekin hiukkaskokoluokalle (2,5 µm ja 10 µm), joiden kärjessä on asianmukaiset näytteenottosuuttimet. Molemmissa linjoissa on syklonit, jotka näkyvät kuvassa 15. Näissä erotellaan mitattavana olevat hiukkaset suodattimiin kokoluokan mukaan. Näytteenottoputkien on oltava sähkökiillotettuja erittäin puhtaan ja erittäin hienon pinnan aikaansaamiseksi. Näytteenottosuuttimet pitää valita siten, että saavutetaan isokineettinen näytteenotto.





Kuva 15. Partikkelien massan mittauslaitteisto [10, s. 67].

Syklonien erottamat mitattavan kokoluokan hiukkaset kerätään suodattimiin, jotka punnitaan testin jälkeen. Suodattimet ovat joko fluorihilipinnoitettuja lasikuitusuodattimia tai fluorihilikalvosuodattimia. Ainoastaan suodattimien massa punnitaan ennen ja jälkeen testin, ei muiden osien, kuten pitimien. Punnitus tapahtuu erillisessä kontrolloidussa punnitushuoneessa mikrovaáalla.

Testauslaitoksen on ilmoitettava hiukkaspäästöt ajettua matkaa kohden kaavojen mukaan:

$$PM_{2,5}EF_0 = (Pe_{2,5} * 1000 * \frac{(\frac{NQ}{60})}{NQ_{PM2,5}}) / d$$

$$PM_{10}EF_0 = (Pe_{10} * 1000 * \frac{(\frac{NQ}{60})}{NQ_{PM10}}) / d$$

$PM_{2,5} EF_0$  on testatun jarrun hiukkaspäästökerroin<sub>2,5</sub> massa ajettua matkaa kohti mg/km:nä.

$PM_{10} EF_{10}$  on testatun jarrun hiukkaspäästökerroin<sub>10</sub> massa ajettua matkaa kohti mg/km:nä.

$P_{e2,5}$  on  $PM_{2,5}$ -suodattimen massakuormitus mg:na.

$P_{e10}$  on  $PM_{10}$  -suodattimen massakuormitus mg:na.

$NQ_{PM_{2,5}}$  on keskimääräinen normalisoitu ilmavirta  $PM_{2,5}$ -näytteenot-  
tосуuttimessa NI/min

$NQ_{PM_{10}}$  on keskimääräinen normalisoitu ilmavirta  $PM_{10}$ -näytteenot-  
tосуuttimessa NI/min

$d$  on WLTP-jarrusyklin aikana ajettu kokonaismatka kilometreinä.

Lopullinen tulos ilmoitetaan kitkajarrutuksen osakertoimen mukaan, jotka näky-  
vät kuvasta 16, eli onko mukana myös esim. sähkömoottorilla regenerointia.  
Pelkällä polttomoottorilla varustetulla autolla (ICE), kerroin on siis 1 ja täyssäh-  
köautolla (PEV) 0,15. [10, s. 67–76.]

<i>Brake type</i>	<i>Vehicle Type</i>	<i>Friction Braking Share Coefficient (c)</i>
<u>Full-friction braking</u>	<u>ICE</u>	<u>1.0</u>
<u>Non-friction braking</u>	<u>NOVC-HEV Cat.1</u>	<u>0.63</u>
	<u>NOVC-HEV Cat.2</u>	<u>0.40-0.45 (subject to change within the boundaries until 23.12)</u>
	<u>OVC-HEV</u>	<u>0.30</u>
	<u>PEV</u>	<u>0.15</u>

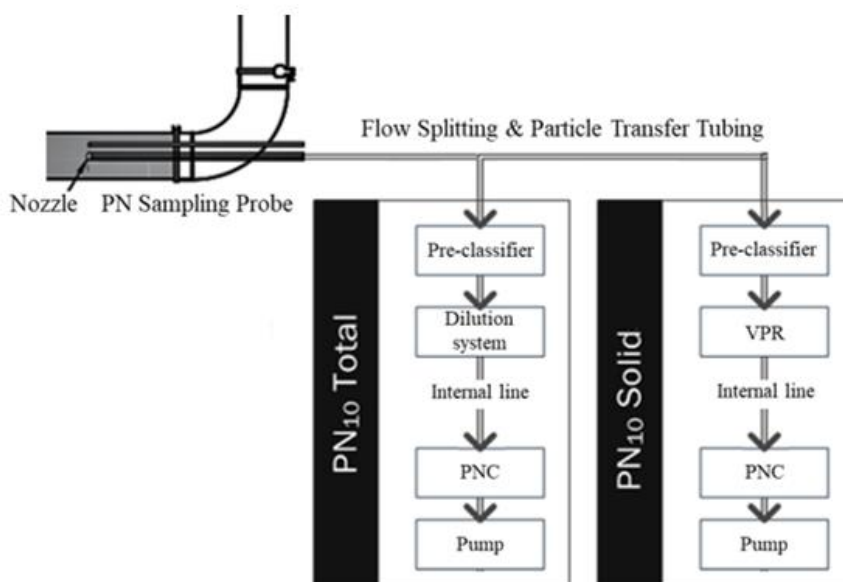
Kuva 16. Kitkajarrutuksen osuus eri ajoneuvotyypeille [10, s. 23].

#### 4.2 Hiukkasten lukumäärän (PN) mittaaminen

PN-näytteenotto- ja mittausjärjestelmät mahdollistavat hiukkasmäärän määritte-  
lyn jarrutestin aikana. Kun PN-päästöt mitataan yhdessä testin parametrien  
kanssa, saadaan testattavan jarrun päästökertoimet, jotka ilmaistaan hiukkas-  
ten lukumääränä ajomatkan yksikköä kohti. Mittausjärjestelmän on kyettävä mit-  
taamaan kokonaishiukkasten määrä (TPN10) ja kiinteän hiukkasten osuus

(SPN10) hiukkasten nimelliskoolla, joka on noin 10 nanometrin sähköisen liikkuvuuden halkaisija tai suurempi.

Kuvassa 17 esitetään PN-näytteenotto- ja mittausjärjestelyt. Mittauskanavaan asennetaan näytteenottosondi ja sopiva suutin siihen.



Kuva 17. Hiukkasten määrän mittausjärjestelyt [10, s. 78].

Kokonaishiukkasmäärän (TPM10) mittauksessa näyte kulkee PN-esijaottelijasyklonin läpi, johon jää suurimmat hiukkaset. Sitten näyte laimennetaan ja se menee hiukkaslukumittariin (PNC), joka mittaa TPM10-pitoisuutta.

Kiinteiden SPN10-hiukkasten mittauksessa on myös PN-esijaottelija, johon jää isoimmat hiukkaset. Näyte kulkee seuraavaksi haihtuvien hiukkasten poistolaitteen (VPR) läpi ja jäljelle jää kiinteät hiukkaset. PNC mittaa SPN10-pitoisuuden.

Testauslaitoksen on ilmoitettava PN-päästöt hiukkasten lukumääränä ajettua matkaa kohti. Testatun jarrun TPM10- ja SPN10-päästökertoimien ( $EF_0$ ) laskennassa noudatetaan seuraavia yhtälöitä:

$$TPN10 EF_0 = 10^6 * (TPN_{10\#} * NQ) / V$$

$$SPN_{10} EF_0 = 10^6 * (SPN_{10\#} * NQ) / V$$

TPN<sub>10</sub> EF<sub>0</sub> on testatun jarrun TPN<sub>10</sub> määrä ajettua matkaa kohti kpl/km:nä.

SPN<sub>10</sub> EF<sub>10</sub> on testatun jarrun SPN<sub>10</sub> määrä ajettua matkaa kohti kpl/km:nä.

TPN<sub>10#</sub> on keskimääräinen normalisoitu ja PCRf-korjattu TPN<sub>10</sub>-päästö (kpl/Ncm<sup>3</sup>).

SPN<sub>10#</sub> on keskimääräinen normalisoitu ja PCRf-korjattu SPN<sub>10</sub>-päästö (kpl/Ncm<sup>3</sup>).

NQ on näytteenottotunnelin keskimääräinen normalisoitu ilmavirta Nm<sup>3</sup>/h.

V on WLTP-jarrusyklin keskimääräinen todellinen nopeus km/h.

Lopullinen tulos ilmoitetaan kitkajarrutuksen osakertoimen mukaan kuten hiukasten massan mittauksessakin. [10, s. 77–86.]

### 4.3 Massahäviön mittaaminen

Jarrujen massahäviön mittaaminen on tärkeä osa testiprosessia, sillä se antaa merkityksellistä tietoa testauksen toistettavuudesta ja oikeellisuudesta. Massahäviö voi toimia indikaattorina mahdollisista ongelmista jarrujen päästötestin aikana. Ennen ja jälkeen testauksen jarruasetelman alku- ja loppumassat on punnittava. Jos samoja osia käytetään jäähdytysilman säätöön, sisäänajoon ja päästöjen mittauksiin, aloitusmassa vastaa massaa, joka mitataan ennen jäähdytysilman säädön aloittamista. Jos taas jäähdytysilman säädön jälkeen käytetään uusia osia, aloitusmassa vastaa massaa, joka mitattiin ennen sisäänajon suorittamista. Lopullinen massa vastaa päästöjen mittausjakson jälkeen mitattua massaa.

Massahäviömittaukset on tehtävä seuraavan menettelyn mukaisesti: [10, s. 86–87.]

- Imuroidaan osat ennen mittausten suorittamista mahdollisten epäpuhtauksien poistamiseksi.
- Kaikki jarruosat tarkastetaan halkeamien, tyhjien kohtien tai irtoamisten varalta ja kirjataan havaitut ongelmat ylös. Jos ongelmia ei löydy, jatketaan alkumittauksia.
- Punnitaan jokainen osa erikseen termoparin asennuksen jälkeen ja irrotetaan termoparin liitin (levyjarrujen ja -rumpujen osalta). Kirjataan alkuperäinen massa massamittaustiedostoon.
- Punnitaan jarrukitka-aine, joka sisältää värinänestolevyt, jarrupalojen ja -levyjien jouset sekä muut osat, kun ne ovat osa tuotekokoonpanoa. Kirjataan alkuperäiset massat massamittaustiedostoon.
- Käytetään vaakaa, jonka resoluutio on vähintään 0,1 g tai parempi, kun punnitaan alle 20 kg:n kokonaispainoisia osia. Varmistetaan vaakaa ja toiminnan moitteettomuus kuukausittain käyttämällä varmennettuja kalibrointipainoja. Suositus on, että vaaka asennetaan huoneeseen, jossa on valvotut ilma- ja kosteusolosuhteet ( $22 \pm 2$  °C ja  $(45 \pm 8)$  % RH).
- Kun jarrupäästöttesti on valmis, varmistetaan, että jarrun osat jäädytetään 30 °C:seen tai sitä alhaisempaan lämpötilaan ja varastoidaan enintään 24 tunnin ajan huoneessa, jossa on valvotut ilma- ja kosteusolosuhteet.
- Kun jarruosat ovat jäähtyneet, ne puhdistetaan rasvasta tai epäpuhtauksista ennen lopullisten massamittausten suorittamista.
- Punnitaan jarrulevy tai -rumpu ja jarrupalat tai -kengät. Kirjataan lopulliset massat massamittaustiedostoon.

- Lasketaan levyn tai rummun ja jarrupalojen tai -kenkien massahäviö vähentämällä lopullinen massa alkuperäisestä kokonaismassasta. Ilmoitetaan kunkin osan massahäviö.
- Lasketaan testattavan jarrun kokonaismassahäviö laskemalla yhteen kaikki lasketut yksittäisten osien massahäviöarvot. Ilmoitetaan kokonaismassahäviö.
- Lasketaan keskimääräinen massahäviön päästökerroin jakamalla kokonaismassahäviö jarrupäästötestin aikana ajetulla kokonaismatkalla huomioiden kaikki osat. Jos samoja osia käytetään sekä jäähdytysilman säätökokeessa että jarrupäästökokeessa, sisällytetään kaikki jäähdytysilman säätökokeen iteraatiot kokonaismatkaan.

## 5 Jarrujen päästöjen vähennyskeinot

Autokannan sähköistymisen lisääntyessä voidaan yhä suurempi osa jarrutustapahtumista tehdä sähköisesti energian talteenotolla. GTR-mukainen jarrutesti ottaa tämän huomioon lopullisissa tuloslaskelmissa, kuten luvussa 4 selvitetään. Asiaa on tutkittu ja esimerkiksi Institute of German Aerospace Centerin [13, s.11] tutkimuksessa huomattiin, että regeneroivan jarrutuksen ansiosta jarrujen hiukkaspäästöt vähenevät merkittävästi. Tämä johtuu suoraan mekaanisten jarrutusten määrän vähentymisestä. Vaikka jarrutustapahtumien suhteellinen väheneminen oli samanlainen kaikissa ajosykleissä, päästövähennyksen voimakkuus riippui voimakkaasti ajosyklistä. Suurin vähennys voidaan havaita kuvan 18 taulukosta, jossa ajettaessa nk. todellista ajosykliä (perustuu oikeaan reittiin Stuttgartin ympäristössä) ultrapienien hiukkasten päästöt vähenivät 89,8 prosenttia. WLTP-jarrutustestissä päästöjen vähentyminen oli vähäistä tai sitä ei havaittu lainkaan mitatuilla ajoneuvoilla. Tämä johtui mahdollisesti jarrupalojen nollausmekanismin puutteesta, mikä voi aiheuttaa jarrupalojen laahaamista ajon aikana ja siten lisäkulumista. Optimaalisissa olosuhteissa regeneroiva jarrutus kuitenkin johtaa merkittävään ympäristön hiukkaspitoisuuden vähenemiseen.

Driving Cycle	Reduction in Braking Events [%]	PN Emissions from One Rear-Axle Brake [# /km]		Reduction in PN Emissions Due to Recuperation [%]	
		4-3 $\mu\text{m}$	300-10 $\mu\text{m}$	4-3 $\mu\text{m}$	300-10 $\mu\text{m}$
WLTC Class 3b	95.8	$1.63 \times 10^8$	$1.29 \times 10^8$	65.4	67.9
WLTC Brake Part 10	88.5	$5.11 \times 10^8$	$4.27 \times 10^8$	4.3	-15.2
real driving cycle	87.7	$4.10 \times 10^8$	$3.45 \times 10^8$	89.8	34.6

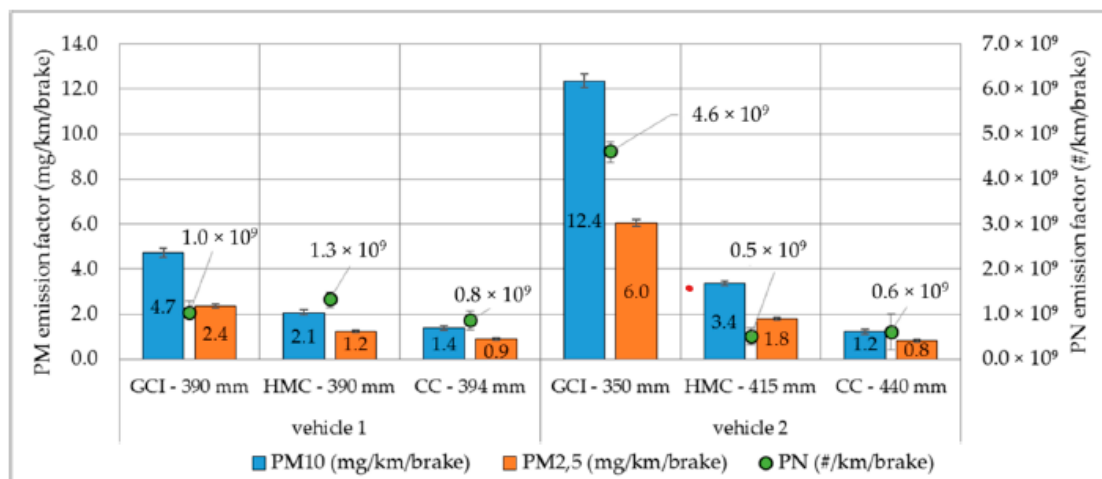
Kuva 18. Jarrujen hiukkaspäästöjen vähentyminen sähköisellä energian talteenotolla [13, s. 11].

Jarrulevyn pinnoitteita on myös tutkittu viime aikoina runsaasti, varsinkin jarrupäästöjen vähentämisen suhteen. German Aerospace Centerin tutkimuksessa [13, s. 12] oli myös tutkittu pinnoitetun jarrulevyn vaikutusta päästöihin. Tulokseksi saatiin, että vaikka jarrutusten vähäisestä määrästä regeneroivan jarrutuksen takia, niin jarrulevyn pinnoite voi johtaa edelleen jopa 80 %:n ilmassa kulkeutuvien hiukkaspäästöjen vähenemiseen kuten kuvasta 19 nähdään. Porsche ilmoittaa jopa 90 %:n hiukkaspäästöjen vähentymisen PCCB-levyjen käytöllä. PCCB-levyt ovat pinnoitettu erittäin kovalla volframikarbidilla. Jarrulevyn pinnoitustapoja ja -materiaaleja on useita erilaisia, kuten laserpinnoitus, terminen ruiskutus, kovakromaus, plasmaelektrolyyttinen aluminointi (PEA) ja plasmaelektrolyyttinen hapettaminen (PEO)

Driving Cycle	PN Emissions from One Rear-Axle Brake [# /km]		Reduction in PN Emissions Due to Coating [%]	
	4-3 $\mu\text{m}$	300-10 $\mu\text{m}$	4-3 $\mu\text{m}$	300-10 $\mu\text{m}$
WLTC Class 3b	$1.33 \times 10^8$	$8.50 \times 10^7$	18.5	33.9
WLTC Brake Part 10	$1.45 \times 10^8$	$9.38 \times 10^7$	71.7	78
Real Driving Cycle	$8.64 \times 10^7$	$5.85 \times 10^7$	78.9	83

Kuva 19. Pinnoitetun jarrulevyn hiukkaspäästöjen vähentyminen [13, s. 12].

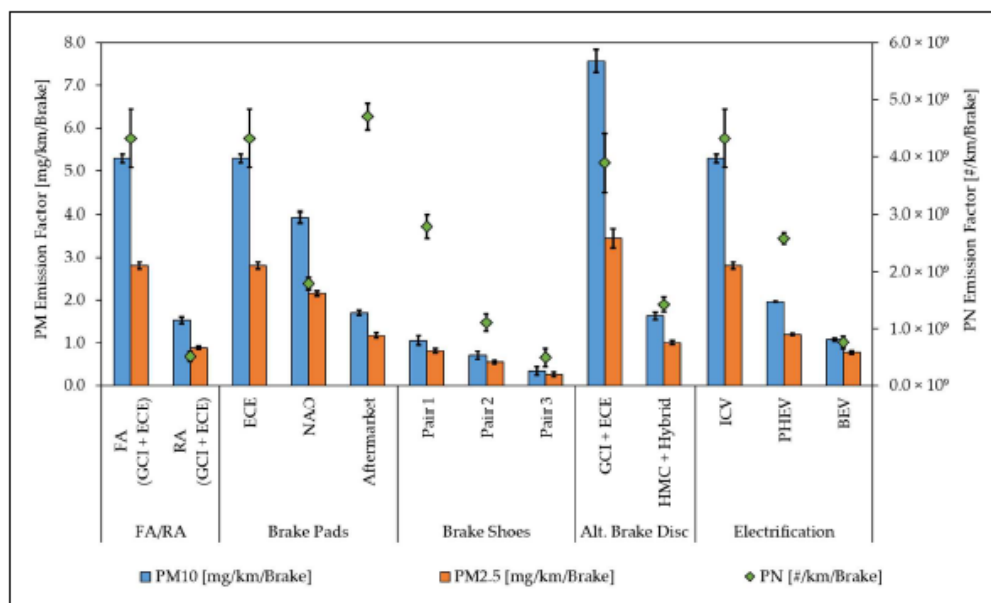
Hiilikuitukeraamiset jarrut tuottavat vielä vähemmän jarrupäästöjä [14, s. 14] kuin pinnoitetut jarrut. Kuvassa 20 on kahden eri ajoneuvon jarrujen hiukkaspäästöt valurautajarrulevyillä (GCI), kovapinnoitetuilla jarrulevyillä (HMC) ja hiilikuitukeraamisilla jarrulevyillä (CC). Hiilikuitukeraamisten jarrujen yleistymistä estää niiden korkea hinta.



Kuva 20. Eri jarrulevymateriaalien vaikutus hiukkaspäästöille [14, s. 14].

Jarrun rakenne vaikuttaa myös jarrutuksessa syntyviin hiukkaspäästöihin ja siihen, miten hiukkaset pääsevät siirtymään pois jarruista ympäristöön. Rumpujarru kerää jarrupölyn tehokkaasti jarrun sisään, kuten kuvassa 21 esitetään [8, s. 8]. Kuvasta nähdään myös, että etujarrut tuottavat enemmän hiukkasia kuin takajarrut jarruvoiman jaon takia. Jos rumpujarruja käytetään, niin ne on sijoitettu kuitenkin taka-akselille, jonka päästöt ovat muutenkin pienemmät. Taka-rumpujarrut tullee yleistymään EURO 7 -määräysten myötä. Myös erilaisia jarrupölyn kerääjiä on tutkittu vaihtelevalla menestyksellä.





Kuva 21. Eri jarrutyypin hiukkaspäästöt [8, s. 8].

## 6 Yhteenveto

Tiukentuneiden pakokaasupäästöjen ja vaihtoehtoisten voimansiirtojärjestelmien käytön yleistettyä muiden kuin pakokaasupäästöjen merkitys on kasvanut. Muut kuin pakokaasupäästöt muodostavat nykyään jo yli 90 % liikenteen PM<sub>10</sub>- ja yli 85 % PM<sub>2,5</sub>-hiukkaspäästöistä. Tulevassa Euro 7 -päästöstandardissa on otettu mukaan jarrujen hiukkaspäästöjen mittaamisen.

Karkeat hiukkaset laskeutuvat ylempiin hengitysteihin, kun taas ultrapienet hiukkaset tunkeutuvat syvälle keuhkoihin ja voivat siirtyä verenkiertoon ja muihin kudoksiin, mikä aiheuttaa huolta niiden mahdollisista terveysvaikutuksista. Jarrukulutuksen hiukkaset ovat halkaisijaltaan usein alle 100 nm, mikä lisää huolta mahdollisista haitallisista vaikutuksista. Hengitettävien hiukkasten altistuminen voi johtaa sydän- ja verisuonitautien, hengityselinten sairauksien ja keuhkosyövän lisääntyneeseen esiintymiseen ja kuolleisuuteen. Vaikka kattavia tutkimuksia ei ole juuri jarrujen kulumisen aiheuttamien hiukkasten vaikutuksista ihmisten terveyteen, niitä on syytä pitää huolenaiheena.

UNECE:n Particle Measurement Program (PMP) kehittää parhaillaan standardeitua GTR-testiprotokollia jarrujen kulumispäästöjen mittaamiseksi tulevaa sääntelyä varten. PMP on epävirallinen työryhmä Yhdistyneiden kansakuntien saastumista ja energiaa käsittelevässä työryhmässä (GRPE). Tavoitteena on kehittää testausmenetelmiä ja WLTP-jarrusykliä eri jarrujärjestelmien vertailua varten. Tulevassa Euro 7 -päästömittauksessa käytetään tätä GTR-protokollan mukaista jarrumittausmenetelmää. Euro 7:ssä sallitaan jarruille hiukkaspäästöiksi 7 mg/km.

Tämän työn pääasiallinen tavoite oli tutkia vuonna 2025 tulevien Euro 7 -päästöstandardien mukaisia teknisiä vaatimuksia jarrujen päästömittaukselle tyyppi- hyväksynnän yhteydessä. Mittausprotokolla perustuu UNECE:n laatimaan GTR-ohjeistukseen. Työssä keskityttiin käytännön vaatimukseen jarrudynamometritesissä, joka kattaa WLTP-jarrusyklin, jossa ajetaan kokonaisella jarruasetelmalla ja mitataan ajon aikana syntyvät hiukkaspäästöt.

UNECE:n GTR:n mukainen jarrupäästömittausprotokolla on vielä ehdotelma tätä työtä kirjoitettaessa, eli siihen voi vielä tulla jotain pieniä muutoksia, ennen kuin se otetaan virallisesti käyttöön EURO 7 -mittauksissa.

WLTP-jarrusykli koostuu 10 eri osiosta. Yhden syklin kesto on 15826 sekuntia ja siinä ajetaan yhteensä 192 km. Jarrujen hiukkasten päästömittaus sisältää eri vaiheita jarrudynamometrillä. Ensimmäisessä vaiheessa säädetään jarruasetelmalle jäähdytysilman parametrit. Parametreihin vaikuttavat itse jarruasetelman rakenne ja tyyppi. Tavoiteltu jarrun lämpötila eri syklin vaiheissa riippuu esimerkiksi levyn massasta verrattuna ajoneuvo kohtaiseen pyöräkuormaan. Seuraavassa vaiheessa suoritetaan jarrujen sisäänajo uusilla osilla. Sisäänajossa ajetaan viisi täydellistä WLTP-jarrusykliä peräkkäin. Viimeisessä vaiheessa suoritetaan itse hiukkasten mittaus. Mittausosiossa ajetaan yksi WLTP-jarrusykli, jonka aikana mitataan syntyneiden hiukkasten massa ( $PM_{2,5}$  ja  $PM_{10}$ ) sekä hiukkasten lukumäärä (SPN10 ja TPN10). Lopullisista tuloksista vähennetään eri ajoneuvojen sähköisen jarrutuksen osuus.

Syntyneisiin hiukkasmääriin vaikuttaa vahvasti mitattavan jarrun lämpötila. Mitä kuumempaa jarru käy, sen enemmän hiukkasia syntyy. Tämän takia mittauksen jarrujen jäähdytyksen säätöosio on erittäin tärkeässä roolissa. Ajoneuvon massa lisää myös jarrujen hiukkaspäästöjä, mutta taas esimerkiksi täyssähköauton sähköisellä energian talteenotolla voidaan suorittaa jopa 85 % jarrutuksista. Rumpujarrut keräävät jarrupölyä ja siten estävät hiukkasten päätymistä ulkoilmaan. Rumpujarrut saattavat tämän takia tulevaisuudessa lisääntyä varsinkin taka-akselilla. Jarrujen hiukkaspäästöjen merkittäviä vähennyskeinoja ovat myös erilaiset jarrulevyjen kovapinnoitteet ja vaihtoehtoiset levy materiaalit.

## Lähteet

1. Garg, B.D; Cadle, S.H.; Mulawa, P.A.; Groblicki, P.J.; Laroo, C. & Parr, G.A. 2000. Brake Wear Particulate Matter. Emissions Environmental Science and Technology Vol. 34, s. 4463–4469.
2. Kwon, Hyouk-Soo; Hyung Ryu, Min & Carlsten, Christopher. 2020. Ultrafine particles: Unique physicochemical properties relevant to health and disease. Experimental & Molecular Medicine Vol. 52, s. 318–328.
3. Timmers, Victor & Achten, Peter. 2016. Non-exhaust PM emissions from electric vehicles. Atmospheric Environment Vol. 134, s. 10–17.
4. Selley, L.; Schuster, L.; Marbach, H.; Forsthuber, T.; Forbes, B.; Gant, T.W.; Sandström, T.; Camiña, N.; Athersuch, T.J. & Mudway, I. 2020. Brake dust exposure exacerbates inflammation and transiently compromises phagocytosis in macrophages. Metallomics Vol. 12, s. 371–386.
5. Glišović, Jasna; Pešić, Radivoje; Lukić, Jovanka & Milora-dović, Danijela. Airborne wear particles from automotive brake systems: Environmental and health issues. International conference on Quality of Life. 2016 s. 291.
6. Perricone, Guido; Alemani, Mattia; Metinöz, Ibrahim; Matějka, Vlastimil, Wahlström, Jens & Olofsson, Ulf. 2016. Towards the ranking of airborne particle emissions from car brakes – a system approach. Sage Journals Vol. 231, s. 4.
7. Grigoratos, Theodoros & Martini, Giorgio. 2015. Brake wear particle emissions: a review. Environmental Science and Pollution Research 22, s. 2491–2504.
8. Storch, Lukas; Hamatschek, Christopher; Hesse, David; Feist, Felix; Bachmann, Thomas & Eichler, Philipp. 2023. Comprehensive Analysis of Current Primary Measures to Mitigate Brake Wear Particle Emissions from Light-Duty Vehicles. Atmosphere Vol. 14, s. 4.

9. Ghouri, Ishmaeel; Barker, Richard; Brooks, Peter & Kosari, Shahriar. 2022. The Effects of Corrosion on Particle Emissions from a Grey Cast Iron Brake Disc. Brake Colloquium & Exhibition - Conference Paper, s. 6.
10. Proposal for a new UN GTR on Laboratory Measurement of Brake Emissions for Light-Duty Vehicles. ECE/TRANS/WP.29/GRPE/2023/4. United Nations Economic and Social Council.
11. Huber, Michael; Mamakos, Athanasios; Hofbauer, Michael; Fischer, Klug, Peter & Steiner, Gerald. 2022. Real Driving Emissions Sampling System for Brake Wear Particle Measurement. Euro Brake Conference paper EB2022-EBS-010.
12. Gramstat, Sebastian; Gramstat, Thilo; Waninger, Robert & Lugovyy, Dmytro. 2020. Impacts on Brake Particle Emission Testing. Atmosphere Vol. 11, s. 5.
13. Bondorf, Linda; Köhler, Lennart; Grein, Tobias; Epple, Fabius; Philipps, Franz; Aigner, Manfred & Schripp, Tobias. 2023. Airborne Brake Wear Emissions from a Battery Electric Vehicle. Atmosphere Vol. 14, s. 11.
14. Hesse, David; Hamatschek, Christopher; Augsburg, Klaus; Weigelt, Thomas; Prahst, Alexander & Gramstat, Sebastian. 2021. Testing of Alternative Disc Brakes and Friction Materials Regarding Brake Wear Particle Emissions and Temperature Behavior. Atmosphere Vol. 12, s. 14.