



Talven aikana teiden pinnoille ja ympäristöön kerrostunut katupöly nousee keväällä ilmaan autojen ja ilmapirtausten seurauksena. Kuva: Mika Räisänen.

In winter, road dust is concentrated on road surfaces and their surroundings and raised into the air in spring by traffic and wind. Photo: Mika Räisänen.

Kuinka soveltava geologia ja mineralogia liittyvät autojen moottorivaurioihin Oulun seudulla

MIKA RÄISÄNEN, AKSELI TORPPA, JONNE UNTINEN, KAROLIINA JOKINEN,
PERTTU NISKANEN, SAMI KULOVUORI JA LARI KAUKONEN

Katupöly nousee otsikoihin ja ihmisten huolenaiheeksi aina keväisin, kun pöly sumentaa ilman ja aiheuttaa ongelmia varsinkin herkimmille ihmisryhmille (lapset, vanhukset ja sairaat). Suurimmat huolet liittyvät ihmisten terveyteen, mutta tänä keväänä katupölyongelma on saanut uuden ulottuvuuden: autojen jakopäiden kulumisia ja vakavia moottoririkkoja aiheuttavan ”Oulun taudin” syyksi on osoittautunut alueen katupölyssä esiintyvä ferrokromikuona.

Oulun taudiksi nimetyn ilmiön taustoja

2000-luvun alkupuolella huomattiin, että Oulun alueella (Oulu–Kemi–Tornio) autojen jakohihnat hajoavat epätavallisen usein aiheuttaen pahimmillaan jopa tuhansien eurojen moottoriremontin. Polttomoottorikäyttöisessä autossa jakohihnan tai hammashihnan tarkoitus on tahdistaa moottorin kampiakselin ja nokka-akselin pyöriminen. Jakopään (kuva 1) pääasiallinen tehtävä on käyttää polttomoottorin venttiilikoneistoa, jolla säädellään moottorin kaasunvaihtoa. Hammashihnan avulla toimiva jakopää tarvitsee jäähdytystä, mikä

on järjestetty jakopääkotelon läpi kulkevan ilmapirtauksen avulla. Samalla ilmassa mahdollisesti oleva pöly pääsee jakopääkoteloon. Jakohihna ja tarvittaessa siihen liittyviä osia vaihdetaan jakopäähuollossa säännöllisesti. Tyypillinen huoltoväli hammashihnajakopäille on 100 000–200 000 ajokilometriä. Oulussa jakopäähuollot joudutaan nykyään tekemään noin puolessa välissä tyypillistä jakohihnan vaihtoväliä, usein jopa aikaisemmin. Autohuoltamoilta ja maahantuojilta saadut tiedot osoittavat, että ilmiö ei ole automerkki- tai mallikohtainen. Vastaavaa ei myöskään ole raportoitu muualta maailmasta.



Kuva 1. Auton jakopää pääkauk-punkiseudulle tyypillisessä vähäpölyisessä autossa. Kuva: Mika Räisänen.

Figure 1. Relatively clean timing gear of a car from the capital region of Finland. Photo: Mika Räisänen.

Oulun taudiksi nimetyn jakopään kulumisen ja jakohihnan ennenaikaisen rikkoutumisen aiheuttajaa ja/tai katupölyn ominaisuuksia on selvitetty useissa tutkimuksissa sen jälkeen, kun ilmiö alkoi nousta yleiseen tietoisuuteen vuoden 2012 tienoilla (Sassi 2014; Makowska ym. 2015; Henriksson 2016; Väänänen 2017; Kuula & Pirinen 2018; Nieminen & Halonen 2019). Jakopäävaurioiden aiheuttaja ei ole aikaisemmissa tutkimuksissa selvinnyt, mutta syyksi on arveltu mm. tieliikenteen suojojen aiheuttaman korroosion ja moottoritilaan kehittyvän hankaavan pölyn yhteisvaikutusta. On myös pidetty mahdollisena, että paikallinen ilmasto ja/tai alueelliset geologiset tekijät, kuten happamat sulfaattimaat ja mustaliuskeet vaikuttavat asiaan. Lisäksi on esitetty, että Oulun alueen katupölyssä voisi olla jotain tavallista hiekkää kovempaa, teräväreunaista partikkelia, joka vaurioittaisi jakopääkoneistoja, ja eräissä tutkimuksissa onkin moottorien pölynäytteissä havaittu korundiksi tulkittua alumiinioksidia. Korundi on kuitenkin niin harvinainen mineraali, että sen esiintymistä ei voida pitää todennäköisenä merkittävässä määrin katupölyssä. On myös esitetty, että autojen jakopäiden hammaspyörät olisivat liian heikkoa epätasalaatuista materiaalia, minkä vuoksi ne kuluvat. Samanlaiset hammaspyörät kestävät kuitenkin muualla Suomessa, joten ongelma ei voi johtua heikkolaatuisista osista. Kaikissa aikaisemmissa tutkimuksissa on havaittu, että Oulun alueella autojen jakopääkoteloissa

tavataan poikkeuksellisen runsaasti punaista rautaoksidipölyä, jonka yhteyttä jakopäävaurioihin on pidetty todennäköisenä.

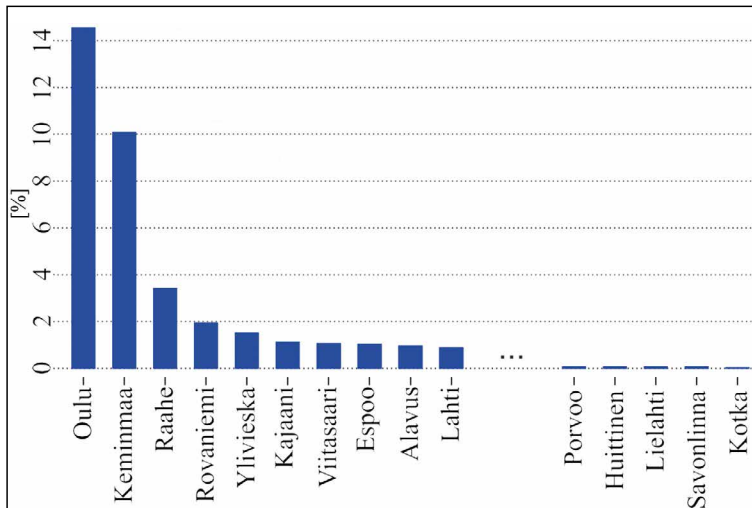
Syy on täytyy olla paikallinen ja jakopäiden kulumisen on abrasiivista

Tutkimuksemme alussa asetimme Oulun alueen moottorivaurioiden syy selvittämiseksi kaksi keskeistä reunaehtoa.

1. Ongelman syy on täytyy olla paikallinen, koska autoalalta saatujen tietojen ja takuukorjaustilastojen perusteella Oulun seudulla tapahtuu jakopäiden kulumista ja rikkoutumista autokantaan suhteutettuna moninkertaisesti enemmän kuin muualla Suomessa (kuva 2). Monet tekijät, kuten ilmasto, tie-suolaus tai alueellinen geologia ja näiden aiheuttama korroosio voitiin sulkea pois, koska ongelmaa ei ole havaittu laajasti muissa Itämeren rannikkokaupungeissa.

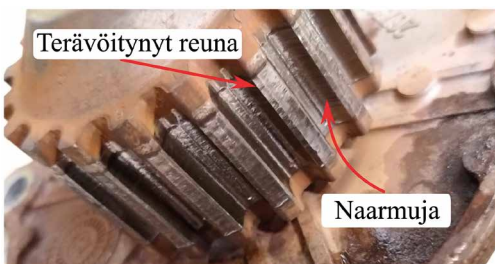
2. Jakopäävaurioihin liittyvä hammasrat-aiden kulumisen on abrasiivista, eikä esimerkiksi korroosiosta johtuvaa, koska jakopääkoneistot eivät ole Oulussa tavanomaista ruostuneempia ja hammasrattaissa voidaan havaita teräväksi kuluneita reunoja ja pienten hiovien partikkeleiden aiheuttamia kulumisjälkiä (kuva 3). Lisäksi olosuhteet eivät jakopääkoteloissa ole korroosiota edistäviä ajonaikaisen korkean lämpötilan ja tuulettumisen johdosta.

Nämä reunaehdot ja aikaisempien tutkimusten tulokset huomioiden lähdimme selvit-



Kuva 2. Jakopäiden vaurioitumisesta johtuvien takuukorjausten yleisyys Suomessa vuosina 2008–2015 kolmen automerkin perusteella (paikkakuntaakohtainen %-osuus takuukorjauksista suhteutettuna alueen autokantaan). Oulussa ja Kemnmaalla autoihin tehtiin moninkertaisesti enemmän jakopääkorjauksia kuin muualla Suomessa. Muokattu lähteestä Väänänen 2017.

Figure 2. Regularity of car warranty repairs due to damaged timing gears in Finland in 2008–2015 based on data from three car brands (locality-specific percentage of warranty repairs in relation to the regional car amounts). In the Oulu and Kemnmaa regions, many times more warranty repairs were done than anywhere else in Finland. Modified from Väänänen 2017.



Kuva 3. Ferrokromikuonapartikkeleiden abrasivisen eli hiovan kulutuksen todisteita ovat naarmut ja hammasrattaiden teräviksi kuluneet reunat. Kuva: Jonne Untinen.

Figure 3. Timing belt pulleys with scratched (*naarmuja*) and sharpened teeth (*terävöitynyt reuna*) provide evidence of wear by abrasive particles. Photo: Jonne Untinen.

tämään laajan näytteenoton, mineraali- ja materiaalianalytiikan sekä jakopääkoneistojen mekaanisten rasiuskokeiden avulla, mikä autonmoottoreihin kertyvä hiova materiaali aiheuttaa niiden ennenaikaisen kulumisen ja rikkoutumisen Oulun alueella.

Yli 200 näytettä ja noin kolme miljoonaa analysispistettä

Tutkimuksen näytteet kerättiin autojen moottoreihin kertyneestä pölystä: 16 autosta Oulun alueelta sekä vertailunäytteitä neljästä autosta pääkaupunkiseudulta. Otimme moottoripölynäytteet valtuutettujen merkkihuoltamoiden tekemien jakopäähuoltojen yhteydessä eri jakopäätyypeillä varustetuista automerkeistä ja -malleista. Näytteenotossa harjattiin pölyä näytepurkkiin jakopääkotelon sisältä hammaspyörästä (A-näyte) sekä jakopääkotelon ulkopuolelta, venttiilikopan päältä (B-näyte).

Oulussa toteutettiin tutkimusprojektin yhteydessä vuosina 2020–2022 kolme katupölynäytteiden keräyskampanjaa, joissa näytteitä kerättiin kahdella eri menetelmällä samoilta tieosuuksilta: 1) painehuuhtelulla (*wet dust sampling*, WDS: Lundberg ym. 2019; Gustafsson ym. 2019) asfalttipäällysteen pinnalta (kuva 4) sekä 2) liikkuvalla näytteenkeräys-



Kuva 4. WDS-näytteenottoa (wet dust sampler), jossa kerätään tienpinnalle kertynyttä pölyä painehuuhtelun avulla. Kuvat: Mika Räisänen.

Figure 4. WDS sampling (wet dust sampler), where dust is collected from the road surface using pressure rinsing. Photos: Mika Räisänen.



Kuva 5. Metropolia Ammattikorkeakoulun Nuuskija-auto on liikennepäästöjä ja katupölypitoisuuksia mittaava mobiili mittaustalio. Kuvat: Mika Räisänen.

Figure 5. The Sniffer car is Metropolia University of Applied Sciences' mobile laboratory for measuring traffic emissions and road dust concentrations. Photos: Mika Räisänen.

ajoneuvolla (nk. Nuuskija-auto: Pirjola ym. 2009) takarenaan takaa ilmaan nousevasta pölystä (kuva 5). Katupölynäytteiden keräämisen suoritti Metropolia Ammattikorkeakoulu yhteistyössä Suomen ympäristökeskuksen kanssa. Nuuskija-auton keräämän, tavanomaisen $<10 \mu\text{m}$ pölyfraktion lisäksi tähän tutkimukseen kerättiin $10\text{--}100 \mu\text{m}$ fraktio, joka vastaa raekokojakaumaltaan autojen moottoreihin ilmavirran mukana kulkeutuvaa abrasiivista

katupölyä. Kerätyistä WDS-näytteistä seulottiin tutkimuksia varten $<250 \mu\text{m}$ fraktiot.

Tutkimuksen alkuvaiheessa tehtiin Oulun alueella lisäksi Geologian tutkimuskeskuksen (GTK) toimesta laajamittainen asfalttipäällysteiden kartoitus, jonka yhteydessä kerättiin edustava poranäytesarja alueen eri asfalttityypeistä. Poranäytteiden ottamisen toteutti West Coast Road Masters Oy yhteistyössä Väyläviraston kanssa. Laboratoriotutkimuksia

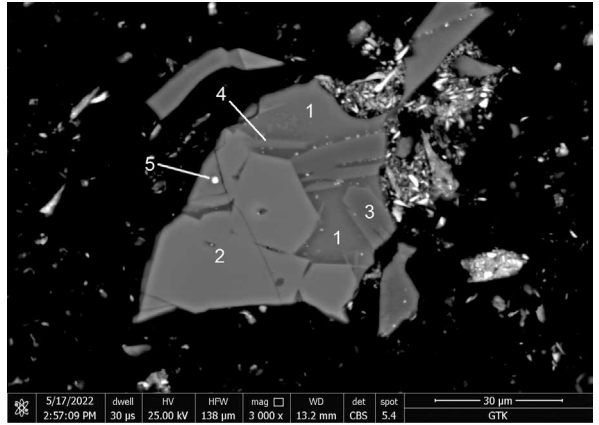
Taulukko 1. Ferrokromikuonan komponentit mitatuna viipalepintahieestä MLA-menetelmällä.

Table 1. Composition of ferrochrome slag measured by MLA from a vertical polished section presented as amount of area % (*määräosuus pinta-ala-%*) and number of measurement points (*mittauspisteiden lukumäärä*). In the table the components (*komponentti*) represent silica glass (*silikaattilasi*), enstatite (*enstatiitti*), forsterite (*forsteriitti*), Mg-Cr-Al spinel (*Mg-Cr-Al-spinelli*), Mg-Al-Cr spinel (*Mg-Al-Cr-spinelli*), Fe-Cr spinel (*Fe-Cr-spinelli*), Fe-Cr metal (*Fe-Cr-metalli*), silica (*piioksidi*), aluminum oxide (*alumiinioksidi*), and unclassified (*luokittelematon*).

Komponentti	Määräosuus (pinta-ala-%)	Mittauspisteiden lukumäärä
Silikaattilasi	49,0	22826
Enstatiitti	10,1	8820
Forsteriitti	7,8	4086
Mg-Cr-Al-spinelli	18,8	8823
Mg-Al-Cr-spinelli	9,2	5108
Mg-Al-spinelli	1,0	390
Fe-Cr-metalli	2,1	3475
Piiksidi	0,6	200
Alumiinioksidi	0,2	540
Luokittelematon	1,2	4640
Yhteensä	100,0	30107

varten asfalttinäytteistä poistettiin bitumi metyleeniliuotuksella. Jäljelle jäänyt kiviainesfraktio seulottiin >4 mm fraktioon ja homogenisoitiin Swing-myllyllä <250 µm fraktioon. Päälystekartoituksista saadun tiedon perusteella kerättiin kiviainesnäytteitä Oulun alueella sijaitsevilta murskelouhoksilta sekä OKTO-murskeen toimittajalta (kuvaus OKTO-murskeesta jäljempänä). Näitä asfalttikiviainesten tyyppinäytteitä (OKTO-murske, granodioriitti, kiilleliuske ja mafinen vulkaaniitti) käytettiin testipölyjen lähtömateriaalina Oulun yliopiston jakopäiden kulutustesteissä sekä yhtenä laboratoriotutkimusten vertailumateriaalityyppinä katu- ja moottoripölyjen lähdeainesanalyyseissä.

Kerätyt pöly- ja kiviainesnäytteet tutkittiin GTK:n Rikastusmineralogian laboratoriossa Outokummussa. Mittaukset tehtiin FEI QUANTA 650 -merkkisellä kenttäemissio-pyyhkäisyelektronimikroskoopilla (*field emission scanning electron microscope*, FE-SEM), johon on liitetty kaksi energiadiispersiivistä röntgenfluoresenssispektrometriä (*energy-dispersive X-ray spectroscopy*, EDX) alkuaine-



Kuva 6. Ferrokromikuonan komponentit takaisin sironneiden elektronien muodostamassa kuvassa (*backscattered electron*, BSE): 1=silikaattilasi, 2=Mg-Cr-Al-spinelli, 3=forsteriitti, 4=enstatiitti, 5=Fe-Cr-metallisulkeuma. Mittakaavan pituus on 30 µm.

Figure 6. Components of ferrochrome slag. The backscattered electron image (BSE) shows a typical slag particle: 1=silicate glass, 2=Mg-Al-Cr spinel, 3=forsterite, 4=enstatite, 5=Fe-Cr metal inclusion. Length of the scale bar is 30 µm.

analyysejä varten sekä MLA-mittausohjelmisto (*Mineral Liberation Analyzer*). MLA-analyysi mahdollistaa suurten partikkelimäärien nopean (kymmeniä tuhansia partikkeleita tunnissa) automatisoidun laskennan ja karakterisoinnin. Mittaukset tehtiin pääasiassa kiilloteuista pinta- ja viipalepintahieistä (halkaisija 30 mm), joissa pölynäyte on kiinnitettynä epoksiin. Pintahieiden lisäksi kuvattiin ja analysoitiin jakohihnojen pinnoille tarttuneita partikkeleita sekä hiilikuituteipeille kiinnitettyjä topografisia pölynäytteitä. MLA-mittauksen tulokset on määräosuuksien osalta ilmoitettu tässä työssä pinta-alaan suhteutettuina %-osuuksina komponenttien tiheyksiin liittyvien epävarmuustekijöiden eliminoimiseksi. Elektronimikroskopian avulla mitattiin tutkimusta varten kerätyistä yli 200 näytteestä yhteensä noin kolme miljoonaa analyysipistettä.

Moottori- ja luonnonpölynäytteiden MLA-analytiikassa käytettävää vertailuaineistoa varten mitattiin tutkimuksen alussa ferrokromikuonan eri komponenttien määräosuudet edustavasta OKTO-murskenäytteestä (taulukko 1, kuva 6). Kuonan komponenttien

Taulukko 2. Autojen moottorien ja jakopääteistien pölynäytteistä tunnistetut mineraalit ja faasit (MLA-analyysin pohjalta). Näytteet autoista 1–4 on kerätty Oulun alueelta ja näyte 5 autosta pääkaupunkiseudulta. Ajokilometrit (sulkeissa) ovat tuhansia kilometrejä (tkm) edellisestä jakopäähuollosta. Näytetyypit: A= jakopääkoneistosta kerätty näyte, B= moottoritalasta kerätty näyte. Jakopääteistinäytteissä olivat ferrokromikuona, granodioriitti, kiilleliuske ja mafinen vulkaniitti.

Table 2. Mineral and phase compositions measured from dust samples from car engines and test rig (MLA analysis). The car samples (*auto*) 1–4 were collected from the Oulu area and the sample 5 from the capital region of Finland. Driving kilometers (in parentheses) are thousands of kilometers (tkm) since the last maintenance service. Sample types: A= sample collected inside the timing belt housing, B= sample collected from engine compartment. The test rig samples included ferrochrome slag (*ferrokromikuona*), granodiorite (*granodioriitti*), mica schist (*kiilleliuske*), and mafic volcanite (*mafinen vulkaniitti*). Different mineral and phase compositions are shown as surface area % and represent: iron oxide (*rautaoksidi*), plagioclase (*plagioklaasi*), quartz (*kvartsi*), K-feldspar (*kalimaasälpä*), Amphiboles (*amfibolit*), micas (*kiilleet*), carbonates (*karbonaatit*), total ferrochrome slag (*ferrokromikuona yhteensä*) with silicate glass slag (*kuona silikaattilasii*), spinel slag (*kuona spinelli*), enstatite slag (*kuona enstatiitti*), forsterite slag (*kuona forsteriitti*), Fe-Cr-metal slag (*kuona Fe-Cr-metalli*), as well as others (*muut*) and unclassified (*luokittelemattomat*). *Mittauspisteiden lukumäärä* represents the number of measurement points.

Autojen moottorien ja jakopääteistien pölynäytteistä mitatut faasikoostumukset (pinta-ala-%)	Auto 1 Oulu (92 tkm)		Auto 2 Oulu (61 tkm)		Auto 3 Oulu (143 tkm)		Auto 4 Oulu (55 tkm)		Auto 5 Pk-seutu (99 tkm)		Testi 1	Testi 2	Testi 3	Testi 4
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B				
Rautaoksidi	68	1	42	1	70	<0,5	66	1	6	1	62	1	1	<0,5
Plagioklaasi	7	31	13	27	8	32	8	28	29	33	-	40	30	19
Kvartsi	5	28	11	24	6	28	6	22	21	29	-	26	31	10
Kalimaasälpä	3	11	4	11	4	14	3	9	14	15	-	19	2	0
Amfibolit	2	6	5	7	2	6	6	7	8	9	-	1	0	39
Kiilleet	3	9	6	7	2	8	3	8	4	4	-	10	35	8
Karbonaatit	1	2	1	3	<0,5	<0,5	<0,5	1	2	2	-	<0,5	<0,5	10
Ferrokromikuona (yhteensä)	3	8	9	11	2	6	3	13	-	-	37	-	-	-
kuona (silikaattilasii)	1,7	4,3	3,3	5,4	1,3	3,2	1,6	6,8	-	-	15	-	-	-
kuona (spinelli)	1,0	2,4	3,0	3,4	0,5	2,1	0,7	3,8	-	-	10	-	-	-
kuona (enstatiitti)	0,4	0,8	1,4	0,8	0,1	0,5	0,2	1,4	-	-	7	-	-	-
kuona (forsteriitti)	0,2	0,7	1,0	1,1	<0,1	0,5	0,1	0,8	-	-	3	-	-	-
kuona (Fe-Cr-metalli)	<0,1	0,1	0,1	0,2	<0,1	0,1	<0,1	0,1	-	-	1	-	-	-
Muut	2	3	6	8	2	3	5	4	10	6	0	4	1	13
Luokittelemattomat	6	1	2	1	3	3	2	7	6	2	1	<0,5	<0,5	1
Mittauspisteiden lukumäärä	13044	29261	28499	9604	17253	29247	19519	31178	5562	9866	104121	27606	26488	21604

nimeäminen perustuu Makkosen ja Tanskasen (2005) käyttämään nimitykseen. Komponenttien määräosuus suhteen OKTO-murske (ilmajähdytteinen ferrokromikuona) poikkeaa kuitenkin heidän tutkimastaan vesijähdytteisestä kuonasta. Silikaattisen lasifaasin määräosuus mitattiin lisäksi röntgendiffraktiolla (*x-ray diffraction*, XRD) käyttäen standardimateriaaliin vertaamiseen perustuvaa amorfisen faasin mittausten menetelmää. Saatu tulos (noin 47 paino-%) vastaa virherajojensa puitteissa erittäin hyvin MLA-analyysin tulosta.

GTK:n Suomen Akatemian investointi-avustuksella hankittu Bruker Nano Analytics -merkkinen M4 Tornado AMICS -mikro-XRF-laitteisto soveltuu myös erityisen hyvin

soveltavan mineralogian analyysimenetelmien yhteensovittamiseen ja kehittämiseen. Laitteistoa hyödynnettiin projektissa jakohihna- ja asfaltinäytteiden kuvantamiseen sekä elektronimikroskooppitutkimusten kohdentamiseen ja niistä saatujen tulosten visualisoimiseen. Näytteiden käsittelyksi vaadittiin ainoastaan niiden leikkaaminen sopivan kokoisiksi (enintään 20 x 15 cm).

Autojen moottoripölyjen koostumukset Oulun alueella

MLA-analyysien perusteella Oulun alueen autojen moottoritiloista kerätyt pölynäytteet eroavat pääkaupunkiseudulta kerätyistä vertailunäytteistä kahdella tavalla (taulukko 2).



Kuva 7. Asfaltin kiviaineksena käytettyä 11–16 mm fraktiokoon ferrokromikuonaa eli OKTO-mursketta. Kuonamurskeen kappaleilla on terävät reunat ja niissä on reikiä/huokosia (vasen kuva) – joista se on helppo tunnistaa. Oulun Lentokentätien asfaltin kiviaineksina on käytetty ferrokromikuonan lisäksi mafista vulkaniittia, granodioriittia ja graniittia (oikea kuva). Kuvat: Mika Räisänen.

Figure 7. Ferrochrome slag used as 11–16 mm asphalt aggregate. Crushed slag aggregate contains sharp-edged particles with holes/pores (photo on left) – from which it is easy to recognize. In addition to the ferrochrome slag (*ferrokromikuonaa*), mafic volcanite (*mafinen vulkaniitti*), granodiorite (*granodioriitti*), and granite (*graniitti*) have been used as aggregate for Lentokentätie asphalt pavement in Oulu (photo on right). Photos: Mika Räisänen.

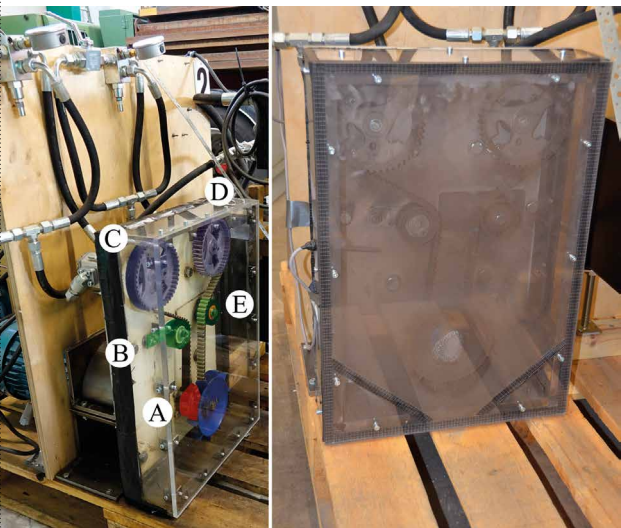
Taulukossa 2 esitettyjen tulosten perusteella voidaan määritellä seuraavat asiat:

1. Kaikissa tutkituissa Oulun autojen näytteissä esiintyy ferrokromikuonaa. Jakopääkotelön ulkopuolella ferrokromikuonapölyä on tyypillisesti noin 10 % ja jakopääkotelön sisällä 1–5 % kokonaispölymäärästä. Pääkaupunkiseudun autoissa ei yksittäisiä hiukkasia lukuun ottamatta esiinny ferrokromikuonapölyä.
2. Oulun alueella jakopääkoteloiden sisältä otetuissa näytteissä rautaoksidipölyä on tyypillisesti >40 % ja pääkaupunkiseudulla vastaava arvo on <10 %.

Muilta osin Oulusta ja pääkaupunkiseudulta kerätyt moottoreiden pölynäytteet ovat koostumukseltaan samankaltaisia. Ne sisältävät katupölyn tavanomaisten mineraalien lisäksi tyypillisesti pieniä määriä mm. lentotuhkaa sekä erilaisia koneosien kulumistuotteita kuten alumiinioksidia ja etenkin jakopääkotelön sisältä otetuissa näytteissä on myös jakohihnan säikeitä. Katupölylle tyypillisiä mineraaleja ovat maasälpä, kvartsin ja kiilteiden lisäksi mm. amfibolit, epidootti, kloriitti sekä karbonaattimineraalit.

Asfaltin kiviaineksen vaikutus katupölyn koostumukseen ja ominaisuuksiin

Suurin osa mineraaliperäisestä katupölystä muodostuu nastarenkaiden aiheuttaman asfaltin kiviaineksen kulumisen seurauksena (Kupiainen ym. 2003; Räisänen ym. 2003; Kupiainen ym. 2005; Räisänen ym. 2005; Terävähti ym. 2006; Kupiainen & Ritola 2013; Valli ym. 2018). Tämä korostuu korkeamman nopeuden väylillä, joiden liukkaudentorjunnassa ei käytetä hiekoitusta. Oulun alueen katupölyn koostumus ja ominaisuudet poikkeavat selvästi muun Suomen katupölyistä, koska siellä pääväylien asfaltin kiviaineksena (kuva 7) on käytetty merkittäviä määriä ferrokromikuonaa (>300 kaista-km). Katupölyn kuonapartikkeleiden määrään vaikuttaa kuona-asfaltin määrän ohella mm. kuonan määräosuus asfaltin kiviaineksesta, kuonan raekojakauma, tien ajonopeus, liikennemäärä ja talvikunnossapito sekä nastarenkaiden käyttö ja väylien puhdistaminen. Lisäksi Beddows ja Harrison (2021) sekä Low ja muut (2022) korostavat autojen massan merkitystä tien pintojen kulumiseen ja katupölyn muodostumi-



Kuva 8. Oulun yliopiston tutkijoiden suunnittelema ja rakentama testikaappi (vasen kuva). Kuvassa kampiakselin hammaspyörään on kiinnitetty puhallinsiipi sekoittamaan ilmaa ja pölyä kaapin sisällä (A), jousitoiminen epäkeskokiristin (B), kuormana laitteessa on kaksi nokka-akselin hammaspyörää (C/D) sekä kiinteä ohjainrulla (E). Koekaapin lämpötila testin aikana oli noin 70 °C. Kuva: Jonne Untinen. Testin aikana ferrokromikuona kuluttaa tehokkaasti hammasrattaita, jolloin muodostuu rautaoksidipölyä (oikea kuva). Kuva: Mika Räisänen.

Figure 8. A test rig designed and built by the researchers of the University of Oulu (photo on left). In photo a fan blade is attached to the crankshaft pulley to spread air and dust inside the cabinet (A), a spring tensioner (B), the test rig is loaded with two camshaft pulleys (C/D), and a fixed guide roller (E). The temperature of the test cabinet during the test was approximately 70 °C. Photo: Jonne Untinen. During the test, the ferrochrome slag effectively wears the gears, creating iron oxide dust (photo on right). Photo: Mika Räisänen.

seen. Tämän vuoksi polttomoottorikäyttöisiä autoja painavammat sähköautot aiheuttavat suurempaa tienpinnan kulumista. Nilssonin ja muiden (2020) mukaan ilmiö korostuu pohjoisilla leveysasteilla, missä autojen massan lisäksi nastarenkaiden käytöllä on merkittävä vaikutus päällysteen kulumiseen.

Oulusta ja sen lähialueilta ei ole saatavissa riittävästi luonnonkiviaineksia, joiden laatu täyttää moottoriteiden ja vilkkaasti liikennöityjen väylien kiviaineksille asetetut asfaltin kiviaineksen laatuvaatimukset (Asfalttinormit 2023). Ferrokromikuona tunnetaan kaupallisella nimellä OKTO-murske: nimi tulee yhdistelmästä Outokumpu–Tornio. Sitä muodostuu ruostumattoman teräksen valmistukseen liittyvän ferrokromin prosessoinnin sivutuotteena. Oulun ohella ferrokromikuonaa on käytetty paikoin Tornio–Kemin ja Vaasan alueilla sekä vähäisiä määriä muualla Pohjois-Suomessa. Lisäksi sitä on viety Viroon, missä paikalliset kiviainekset ovat kulutuskestävyydeltään erittäin heikkoja.

Vallin ja muiden (2018) mukaan Oulun alueella altistutaan vilkkaasti liikennöityjen väylien katupölylle asutusalueilla, jotka sijaitsevat alle 45 metrin etäisyydellä tiestä. Näillä alueilla katupöly muodostuu talvikaudella nastarenkaiden aiheuttamasta asfaltin kulumisesta sekä kevätpölykaudella tienpinnalta nousevasta resuspensiopäästästä. Katupölyn

koostumusta ja raekokojakaumaa ovat tutkineet mm. Kupiainen ja muut (2005): näillä ominaisuuksilla on suuri merkitys pölyn haitallisten terveysvaikutusten kannalta.

Edellä esitettyjen tutkimustulosten yhteenvedona voidaan todeta, että ferrokromikuonapölyä esiintyy koko Oulun alueella. Suurimmat katupölyn (WDS-näytteet) kuonapitoisuudet ovat noin 20 % mittauspisteissä, joissa asfaltin OKTO-murskeen pitoisuus on suuri (>75 %). Tämä kertoo siitä, että paikallislähteen lisäksi ympäristöstä tulevalle hajapölyllä on merkittävä vaikutus katupölyn koostumukseen, sillä pölyä kulkeutuu mm. autojen renkaiden ja ilman välityksellä. Tutkimuksemme osoittaa, että kuonapölyä esiintyy koko Oulun alueella muutamia prosentteja myös paikoissa, missä asfaltti ei sisällä OKTO-mursketta.

Jakopäiden kulutustestit kertovat yksiselitteisesti ferrokromikuonapölyn abrasiivisuudesta

Jakopäiden kulumista pölyaltistuksessa tutkittiin Oulun yliopiston Auto- ja työkonetekni-

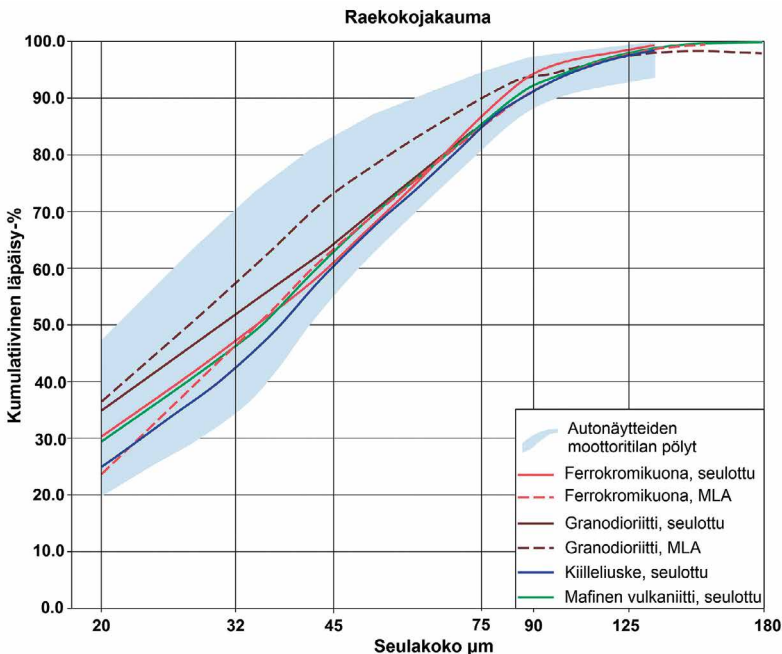
kan tutkimusryhmässä tähän tutkimukseen suunnitelluilla ja rakennetuilla testilaitteilla (kuva 8). Jakopäätestejä varten valmistettiin GTK:n Prosessilaboratoriossa testipölyjä, joiden raekokojakaumat vastasivat MLA-määrittysten perusteella autojen moottoreista ja jakopääkotelon ulkopuolelta analysoituja katupölyjä (kuvat 9 ja 10). Testipölyt valmistettiin ferrokromikuonasta, granodioriitista, mafisesta vulkaniitista ja kiilleliuskeesta, jotka ovat Oulun alueella käytettyjä asfaltin kiviaineksia. Testipölyjen tiheydet mitattiin valmistuksen jälkeen tarkkuuspyknometrilla, minkä perusteella testeihin voitiin annostella toisiaan vastaavat partikkelimäärät eri testipölyjä.

Testilaitteessa (kuva 8) jakopää on suljettu tiiviisti polykarbonaattilevyillä ja jakopään osat on asennettu teräslevyyn. Kampiakselin hammaspyörää pyöritetään sähkömoottorilla, ja kaksi nokka-akselin pyörää pyörittävät hydraulikkapumppuja. Hammashihnaa ohjataan kiinteällä rullalla ja jousitoimisella kiristinrullalla. Kampiakselin hammaspyörässä on



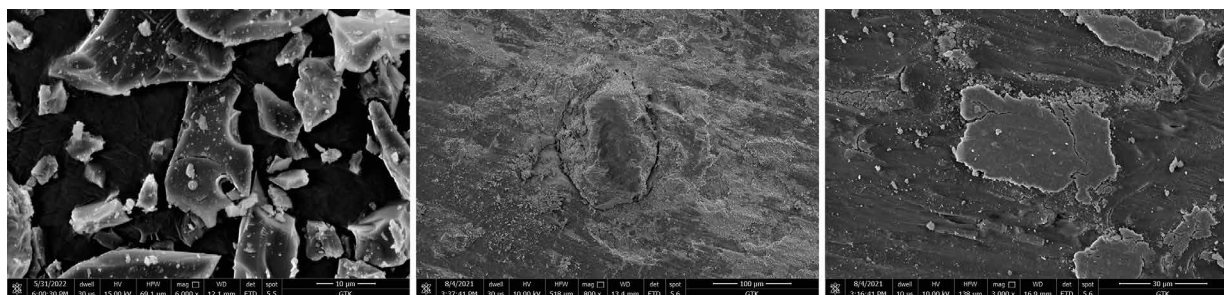
Kuva 9. Testipölyjen valmistusta GTK:n Prosessilaboratoriossa Outokummussa. Kuva: Akseli Torppa.

Figure 9. Preparation of test-dust in GTK's Process Laboratory in Outokumpu, Finland. Photo: Akseli Torppa.



Kuva 10. Testipölyjen raekokojakaumat määritettynä seulomalla (yhtenäiset viivat) ja vertailuksi MLA- menetelmällä (katkoviivat) sekä autojen moottoritilan pölyjen raekokojakaumien tyyppialue (vaaleansininen alue) määritettynä MLA-määrittysten avulla.

Figure 10. Grain size distributions of the test dusts determined by screening (solid lines) and, for comparing, by MLA analyses (dashed lines), and the range of grain size distributions of car engine dusts (blue area, *autonäytteiden moottoritilan pölyt*) determined by MLA analyses. In the Figure colours of the lines represent: red for ferrochrome slag (*ferrokromikuona*), brown for granodiorite (*granodioriitti*), blue for mica schist (*kiilleliuske*), and green for mafic volcanite (*mafinen vulkaniitti*).



Kuva 11. Pyyhkäisyelektronimikroskooppikuvia: kuonapartikkeleiden teräväsärmäisiä sirpalemaisia pinnanmuotoja (vasen), verrattain iso kuonapartikkeli tarttuneena jakohihnnaan (keskimmäinen) ja rautaoksidipölyn esiintyminen hienojakoisena erittäin runsaana pölynä hammasrattaiden kulumistuotteena (oikea). Kuvien mittakaavat vasemmalta oikealle: 10 µm, 100 µm ja 30 µm. Kuvat: Akseli Torppa.

Figure 11. Scanning electron microscope images: Sharp-edged ferrochrome slag particles (left), a relatively large slag particle attached to a timing belt (middle), and abundant fine-grained iron oxide dust on the surface of a timing belt (right). Scale bars in the images from left to right: 10 µm, 100 µm, and 30 µm. Photos: Akseli Torppa.

puhaltimen siipi liikuttamassa ilmaa kaapin sisällä. Testipölyt lisätään kaappiin tulpalla tiivistetyn reiän kautta.

Yksittäinen testitapahtuma kesti noin viisi vuorokautta. Testin aikana mitattiin, kuinka paljon eri pölyt, niiden seokset sekä määrät kuluttivat jakopäiden metallisia hammasrattaita. Hammasrattaat punnittiin ennen ja jälkeen testien, ja testitulos ilmoitettiin kulumisnopeutena milligrammaa tunnissa (mg/h). Lisäksi testikaappeihin kertyneiden pölyjen koostumukset ja partikkeleiden muoto-ominaisuudet tutkittiin testien jälkeen MLA-analyyseissä.

Testitulokset osoittivat yksiselitteisesti ferrokromikuonapölyn voimakkaan abrasiivisen kulutuksen verrattuna tavanomaisista luonnonkiviaineksista valmistettuihin mineraalipölyihin. Hammasrattaiden kulumisnopeudet ferrokromikuonapölytesteissä olivat keskimäärin noin 25-kertaiset verrattuna muihin testattuihin pölyihin (taulukko 3). Kuonapölyn aiheuttaman hammasrattaiden kulumisen seurauksena testikaappeihin myös muodostui runsaasti punaista rautaoksidipölyä (kuva 11), samaan tapaan kuin on havaittu tapahtuneen Oulun alueen autoissa jakopäiden kulumisen yhteydessä (taulukko 2).

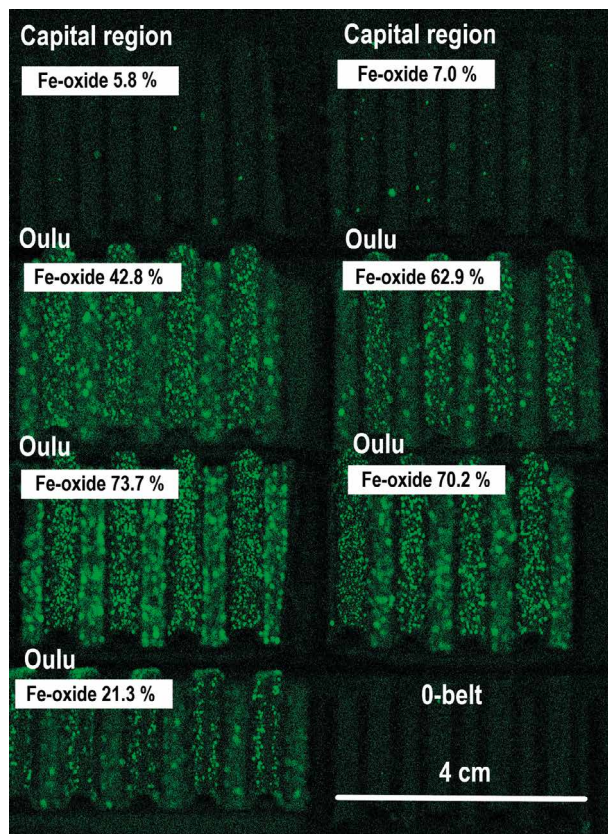
Taulukko 3. Oulun yliopiston toteuttamien jakopäiden kulutustestien neljän testipölyn (ferrokromikuona, granodioriitti, kiilleliuske, mafinen vulkaniitti) keskiarvot esitettynä hammaspyörien kulumisen arvoina (mg/h). Tulokset julkaistaan myöhemmin kattavammin Oulun yliopiston toimesta vertausarvioidussa tiedelehdessä.

Table 3. Average values from the wear tests of timing gear test rigs carried out by the University of Oulu with four test dusts ferrochrome slag (*ferrokromikuona*), granodiorite (*granodioriitti*), mica schist (*kiilleliuske*), and mafic volcanite (*mafinen vulkaniitti*). Values are presented as wear of timing belt pulleys in mg/h (*hammaspyörien kuluminen*, mg/h). The results will be published comprehensively in a peer-reviewed scientific journal by the University of Oulu.

	Ferrokromikuona	Granodioriitti	Kiilleliuske	Mafinen vulkaniitti
Hammaspyörien kuluminen (mg/h)	128,1	6,3	5,3	4,0

Kuva 12. Kromin (Cr) alkuainekartta autojen jakohihnoista pääkaupunkiseudulta (*Capital region*) ja Oulun alueelta analysoituina mikro-XRF-laitteistolla. Kirkkaan vihreät pisteet ovat kromipitoisia partikkeleita jakohihnan pinnalla (pääosin ferrokromikuonaa). Kuonapartikkeleiden kovuuden sekä terävien ja sirpalemaisten pinnanmuotojen vuoksi kuonapöly tarttuu kiinni jakohihnaan muodostaen eräänlaisen hiomanauhan. Rautaoksidin määrä kuvissa on määritetty MLA-menetelmällä samojen autojen jakopääkotelon sisältä otetuista pölynäytteistä huollon yhteydessä. Oikealla alhaalla vertailuksi käyttämätön jakohihna (0-belt). Kuva: Ester Jolis.

Figure 12. Elemental map of chromium (Cr) on car timing belts from the Oulu and Capital regions in Finland analyzed with micro-XRF equipment. The bright green spots are Cr-rich particles on the surfaces of the timing belts (mainly ferrochrome slag). Due to the hardness and sharp-edged surfaces of the slag particles, the slag dust is attached to the timing belt, forming a kind of sanding belt. The amount of iron oxide was analyzed with an MLA method from dust samples collected from inside the timing-belt housings of the cars during maintenance. For comparison, in the right lower corner is an unused timing belt (0-belt). Photo: Ester Jolis.



Ferrokromikuonan yhteys moottoreiden kulumiseen ja rautaoksidipölyn muodostumiseen

Tutkimustulosten perusteella ferrokromikuonapöly on erityisen voimakkaasti hiovaa eli abrasivista kulutusta aiheuttavaa materiaalia kovuutensa ja teräväsärmäisten partikkeleidensa sirpalemaisten pinnanmuotojen vuoksi (kuva 11). Nämä särmikkäät ja kuluttavat pinnanmuodot ovat seurausta materiaalin kovuudesta, alhaisesta kiteytymisasteesta (lasia ja mikrokiteisiä mineraaleja) sekä kaasukuplista, joita pitkin materiaali halkeaa. Havaintojemme mukaan kuonapöly säilyttää sirpalemaiset, teräväsärmäiset piirteensä vielä <5 µm partikkelikoossa (kansikuva).

Tutkimustulostemme perusteella rautaoksidipölyä (kuva 11) muodostuu jakopään hammasrattaiden kulumisen seurauksena,

kun jakohihnan ja hammasrattaiden välissä oleva teräväsärmäinen kuonapöly kuluttaa hammasrattaita. Tulkintamme mukaan tämä hienorakeinen rautapöly ruostuu nopeasti hapettavissa olosuhteissa punaiseksi pölyksi, koska pölypartikkeleilla on runsaasti reaktiivista pintaa erittäin pienen partikkelikokonsa vuoksi. Kuonapartikkeleiden kovuuden ja särmikkäiden sekä sirpalemaisten pinnanmuotojen vuoksi kuonapöly (kuvat 11 ja 12) tarttuu kiinni jakohihnaan muodostaen eräänlaisen hiomanauhan. Yleisimpien katupölyn mineraalipartikkeleiden kuten kvartsin, maasälpjen, amfibolien ja kiilteiden pienemmän kovuuden sekä vähemmän särmikkäiden pinnanmuotojen vuoksi ne kuluttavat hammasrattaita huomattavasti vähemmän.

Määritimme mikro-XRF-laitteella asfaltinäytteistä kiviainesfragmenttien prosentuaalisia määraosuuksia, rakeisuuksia ja pinnanmuo-

toja. Menetelmä osoittautui erityisen käyttökelpoiseksi asfalttinäytteiden kuonapitoisuuden määrittämisessä. Toinen käyttösovelluksemme oli jakohihnaan kiinnittyneiden kuonapartikkeleiden kuvantaminen kromipitoisuuden perusteella (kuva 12). Tuloksena saatuja alkuainekarttoja hyödynnettiin mm. FE-SEM-mittausten kohdentamisessa jakohihnojen pinnoilla, ja niillä oli lisäksi keskeinen merkitys projektin yhtenä johtopäätöksensä syntyneen kulumismekanismin määrittelyssä.

Projektimme auto- ja työkonetekniikan tutkijat Oulun yliopistosta kuvaavat jakopäiden vauriomekanismin vaiheet seuraavalla tavalla. Jakopää tarvitsee jäähtymistä, joka toteutetaan sen läpi kulkevan ilmapirtauksen avulla. Samalla ferrokromikuonapitoinen pöly kulkeutuu jakopääkoteloon. Jakohihna liikkuu ja liukuu edestakaisin suhteessa hammaspyörään, jolloin abrasiivinen kuluminen tapahtuu kuonapölyn toimiessa hioma-aineena jakohihnan ja hammaspyörien välissä. Hammaspyörien kuluessa niiden halkaisija pienenee, jolloin hihnan kiireys laskee ja hampaiden nurkat terävöityvät. Tämän seurauksena hihnan hampaiden juureen muodostuu jännityspiikki, jonka vaikutuksesta hihnan hampaat leikkautuvat lopulta irti aiheuttaen moottorin venttiilikoneiston ajoituksen vääristymisen. Ajoituksen vääristymisen seurauksena venttiilit ja männät törmäävät ja aiheuttavat merkittävän moottorivaurion.

Johtopäätökset

Oulun alueen autojen jakopäiden ennenaikaiset kulumiset ja rikkoutumiset aiheutuvat kuona-asfalttien kulumisesta peräisin olevan erittäin abrasiivisen eli hiovan kuonapitoisen katupölyn kuluttaessa auton jakopäähän hammasrattaita. Tulokset on varmennettu Oulun yliopiston Auto- ja työkonetekniikan tutkimusryhmän toimesta jakopäiden kulumistutkimuksiin valmistetuilla testilaitteilla.

Oulun taudin yhtenä oireena kuvattu punainen pöly on rautaoksidia, jota muodostuu

teräväsrämäisten kuonapölypartikkeleiden kuluttaessa jakopäähän hammasrattaita. Tämä hienorakeinen rautapöly ruostuu nopeasti hapettavissa oloissa saaden punaruskean värin.

Ferrokromikuonaa esiintyy katupölyssä koko Oulun alueella. Suurimmat pitoisuudet mitattiin tieosuuksilla, joilla OKTO-murskeen osuus asfaltin kiviaineksessa on suuri. Kuonapölyä esiintyy muutamia prosentteja myös niissä mittauspisteissä, missä asfaltissa ei ole käytetty OKTO-mursketta.

Tutkimuksemme osoittaa, kuinka tärkeää on kehittää tieteidenvälisiä tutkimusmenetelmiä ja kasvattaa soveltavan mineralogian selvitysten osuutta, kun arvioidaan kiertotalouden mineraaliperäisten materiaalien pitkäaikaiskestävyyttä ja laatua loppukäyttökohteissa.

Aikaisemmista tutkimuksista poiketen tämän projektin tutkimusryhmä koottiin monitieteellisestä lähtökohdasta auto- ja konetekniikan, soveltavan mineralogian, katupöly- ja kiviainestutkimuksen ja ympäristötieteiden asiantuntijoista. Aikaisemmissa selvityksissä on ollut selkeitä puutteita niin tutkimusresurssien kuin soveltavan mineralogian ja autotekniikan osaamisalueiden osalta.

Julkaisemme tutkimustulokset myöhemmin vertausarvioituissa kansainvälisissä tiedelehdissä. Tutkimusaineistomme on kerättyjen ja analysoitujen pölynäytteiden osalta jo nyt kansainvälisesti katsottuna poikkeuksellisen suuri. Täydennämme sitä kuitenkin vielä keväällä 2023 näytesarjalla, jota voidaan hyödyntää mm. jakopäiden kulutustutkimuksiin ja alustaviin hiukkasten terveysvaikutustutkimuksiin liittyen pölypartikkeleiden koostumukseen, kovuuteen, raekokoon, pinnan muotoihin sekä lohkopintojen tuoreuteen.

Kuona-asfalttien mineraloginen koostumus sekä niiden sijainnit nykyisissä asfalttipäällysteissä on syytä inventoida ja rekisteröidä nykyistä kattavammin kuona-asfalttien kokonaiskuvan selkeyttämiseksi. Tämä tieto on erityisen tärkeä tienpitäjille, kunnille, ympäristöalalle sekä alueiden asukkaille.

Tutkimuksestamme on laadittu video Oulun yliopiston toimesta: <https://www.youtube.com/watch?v=vL-dChLWBs8g>



Kiitokset tieteiden välisestä yhteistyöstä: AutoOsaLiike-projekti

Tämä projekti toteutettiin kolmivuotisella Euroopan Unionin aluekehitysrahaston (EAKR) rahoituksella sekä osallistuvien tahojen ja autoalan rahoituksella Oulun autoalan osaamiskeskittymän kehittämiseksi. Projektin yhtenä osaamisen kehittämiskohteena oli jakopääongelman selvittäminen Oulun seudulla. Rahoitus myönnettiin konsortiolle, jonka muodostivat Oulun yliopiston auto- ja työkonetekniikan sekä materiaalitekniikan tutkimusryhmät, Geologian tutkimuskeskus, Suomen ympäristökeskus, Metropolia Ammattikorkeakoulu ja Lapin ammattikorkeakoulu. Projektityön lisäksi GTK on toteuttanut runsaasti omaraahoitteisia lisäselvityksiä kiertotalouden materiaalien tutkimuksen edistämiseksi.

FT MIKA RÄISÄNEN

(mika.raisanen@gtk.fi)
Geologian tutkimuskeskus
Vuorimiehentie 5
02151 Espoo

FM AKSELI TORPPA

(akseli.torppa@gtk.fi)
Geologian tutkimuskeskus
Viestikatu 7 A
70211 Kuopio

DI JONNE UNTINEN

(jonne.untinen@oulu.fi)
Auto- ja työkonetekniikka
Oulun yliopisto

TKT KAROLIINA JOKINEN

(karoliina.jokinen@oulu.fi)
Auto- ja työkonetekniikka
Oulun yliopisto

DI PERTTU NISKANEN

(perttu.niskanen@oulu.fi)
Auto- ja työkonetekniikka
Oulun yliopisto
Pentti Kaiteran katu 1
90570 Oulu

INSINÖÖRI (AMK) SAMI KULOVUORI

(sami.kulovuori@metropolia.fi)
Metropolia
Ajoneuvo- ja konetekniikka
Leiritie 1
01600 Vantaa

FM LARI KAUKONEN

(lari.kaukonen@syke.fi)
Suomen ympäristökeskus
Laboratoriokeskus
Mustialankatu 3
00790 Helsinki

Mika Räisänen työskentelee GTK:lla erikoisasian-tuntijana monitieteellisissä projekteissa tutkimusaloinaan soveltava geologia ja mineralogia, kiviainekset ja rakennuskivet sekä katupölytutkimus ja kiertotalous. Akseli Torppa työskentelee GTK:lla erikois-asantuntijana mineraalitalouden kansainvälisessä projektitoiminnassa ja prosessimineralogian, materiaalianalytiikan sekä soveltavan geologian ja mineralogian tutkimushankkeissa. Jonne Untinen työskentelee Oulun yliopistolla projektitutkijana tutkimusalueina ajoneuvotekniikka, rengastutkimus sekä raideliikenteen kalusto. Karoliina Jokinen työskentelee Oulun yliopistolla auto- ja työkonetekniikan tutkimusryhmässä tutkijana, projektipäällikkönä ja vastuullisena johtajana erityisenä mielenkiintona kestävä kehitys ja poikkitieteellisyys. Perttu Niskanen työskentelee Oulun yliopistolla yliopisto-opettajana. Opetustehtävien ja projektijohtotehtävien lisäksi tutkimuspainotukset kevyen ja raskaan kaluston ajoneuvoteknisissä asioissa. Sami Kulovuori työskentelee Metropolialla ajoneuvo- ja konetekniikan osaamisalueella projektipäällikkönä, vastuunaan Nuuskija-auton hanke- ja operatiivinen toiminta. Lari Kaukonen työskentelee Suomen ympäristökeskuksessa tutkijana tutkimusaloinaan metrologia, kenttämittaukset ja uusien kenttätutkimusmenetelmien validointi, sekä tässä projektissa katupölyn ja päällysteiden alkuaineanalytiikka.

Summary

How applied geology and mineralogy are associated with car engine damages in the Oulu region, Finland

This article presents the results of a study on the causes of accelerated wear of timing pulleys in vehicles in the Oulu region. The partners of this project were Vehicle and Mobile Machinery Engineering, University of Oulu, Geological Survey of Finland, Metropolia University of Applied Sciences, Finnish Environment Institute and Lapland University of Applied Sciences.

At the beginning of the study, we set two conditions for finding out the cause of the wear of the timing belt pulleys and engine damages in the Oulu region:

1. The cause of the timing belt issue must be local, because according to car warranty repair statistics (Fig. 2), wearing of the timing belt pulleys and related engine breakages occur in the Oulu region many times more frequently than in the rest of Finland. General factors such as climate, road salting, or regional geology, and related corrosion could be ruled out, as the issue has not been widely observed in other coastal cities of the Baltic Sea.
2. The wearing of the timing belt pulleys is abrasive, and not caused by, *e.g.*, corrosion, because the timing belt pulleys are not more rusted than usual, and the pulleys show clear signs of abrasive wear: edges of the teeth are sharpened, and wear marks caused by small abrasive particles are visible as scratches on the surfaces of the timing belt pulleys (Fig. 3). In addition, the conditions inside the timing belt housing are generally not corrosive due to the high temperature and ventilation during driving.

Based on our research, the wearing of timing belt pulleys is caused by ferrochrome slag used as asphalt aggregate (Fig. 7). Asphalt pavements are worn by studded tires and as

a result road dust is formed. Ferrochrome slag dust is composed of hard particles with sharp-edged surfaces (Fig. 11). Because of the particle properties, it is highly abrasive and wears out car timing belt pulleys, when it gets in a vehicle's timing belt housing (Fig. 12).

Ferrochrome slag is a common constituent of road dust in the entire Oulu Region. The highest concentrations were measured from dust samples collected in the roads that are paved with ferrochrome asphalt. Up to several per cent of slag in the dust is, however, typically observed also in the places where slag has not been used as an asphalt aggregate.

During the wearing process of timing belt pulleys, very fine iron particles are produced (Fig. 11), which due to their fine grain size oxidize quickly, getting the red-brown color characteristic of iron oxide, *i.e.*, rust. This so-called red dust has received a lot of attention in the public and media, because it is thought to have caused timing belt problems. However, its occurrence is therefore a consequence of the wear problem, not the cause.

The results have been verified with practical tests by the Vehicle and Mobile Machinery Engineering research group of the University of Oulu, using testing equipment designed for studying the wear of timing belt pulleys (Fig. 8).

The study proves how important it is in circular economy to develop new interdisciplinary research methods and to increase the use of applied mineralogy in evaluating the long-term sustainability and quality of circular economy materials.

Lähdeluetelo

- Asfalttinnormit, 2023. Päälystealan Neuvottelukunta PANK ry, 127 s.
- Beddows, D. C. S. & Harrison, R. M., 2021. PM₁₀ and PM_{2.5} emission factors for non-exhaust particles from road vehicles: Dependence upon vehicle mass and implications for battery electric vehicles. *Atmospheric Environment* 244, 117886. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117886>

- Gustafsson, M., Blomqvist, G., Järleskog, I., Lundberg, J., Janhäll, S., ym., 2019. Road dust load dynamics and influencing factors for six winter seasons in Stockholm, Sweden. *Atmospheric Environment: X* 2, 100014. <https://doi.org/10.1016/j.aea.2019.100014>
- Henriksson, A., 2016. Jakohihnan ennenaikainen kuluminen. Opinnäytetyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu, 39 s.
- Kupiainen, K., Tervahattu, H. & Räisänen, M., 2003. Experimental studies about the impact of traction sand on urban road dust composition. *The Science of the Total Environment* 308, 175–184. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(02\)00674-5](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00674-5)
- Kupiainen, K. J., Tervahattu, H., Räisänen, M., Mäkelä, T., Aurela, M. & Hillamo, R., 2005. Size and composition of airborne particles from pavement wear, tires, and traction sanding. *Environmental Science & Technology* 39, 699–706. <https://doi.org/10.1021/es035419e>
- Kupiainen, K. & Ritola, R., 2013. Nastarengas ja hengittävä pöly – kirjallisuuskatsaus. Helsingin kaupungin ympäristökeskuksen julkaisuja 6/2013, 51 s.
- Kuula, P. & Pirinen, J., 2018. Päälysteen pinnalle kertyvän hienorakeisen materiaalin ominaisuuksia: Tapaustutkimus Pohjois-Suomesta. Liikennevirasto, Helsinki, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 62/2018, 52 s.
- Low, J. M., Haszeldine, R. S. & Harrison, G. P., 2022. The hidden cost of road maintenance due to the increased weight of battery and hydrogen trucks and buses—a perspective. *Clean Technologies and Environmental Policy*. <https://doi.org/10.1007/s10098-022-02433-8>
- Lundberg, J., Blomqvist, G., Gustafsson, M., Janhäll, S. & Järleskog, I., 2019. Wet Dust Sampler – a Sampling Method for Road Dust Quantification and Analyses. *Water Air, & Soil Pollution* 230, 180. <https://doi.org/10.1007/s11270-019-4226-6>
- Makkonen, H. & Tanskanen, P., 2005. Outokumpu Chrome oy:n ferrokromikuonan mineralogia ja liukoisuusominaisuudet. Prosessi- ja ympäristötekniikan osasto, Oulun yliopisto, Report 313, Oulu, 26 s.
- Makowska, M., Leveinen, J., Pellinen, T. & Marjamaa, R., 2015. Composition of abraded dust from asphalt pavement produced using ferrochromium smelter slag (OKTO-aggregate). *Yhdyskunta- ja ympäristötekniikan laitos, Aalto-yliopisto*, 46 s.
- Nieminen, E. & Halonen, J., 2019. Katupölymittaukset. Insinöörityö. Metropolia Ammattikorkeakoulu, 26 s.
- Nilsson, J.-E., Svensson K. & Haraldsson, M., 2020. Estimating the marginal costs of road wear. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 139, 455–471. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.07.013>
- Pirjola, L., Kupiainen, K. J., Perhoniemi, P., Tervahattu, H. & Vesala, H., 2009. Non-exhaust emission measurement system of the mobile laboratory SNIFFER. *Atmospheric Environment* 43, 4703–4713. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.08.024>
- Räisänen, M., Kupiainen, K. & Tervahattu, H., 2003. The effect of mineralogy, texture and mechanical properties of anti-skid and asphalt aggregates on urban dust. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 62, 359–368. <https://doi.org/10.1007/s10064-003-0200-y>
- Räisänen, M., Kupiainen, K. & Tervahattu, H., 2005. The effect of mineralogy, texture and mechanical properties of anti-skid and asphalt aggregates on urban dust, Stages II and III. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 64, 247–256. <https://doi.org/10.1007/s10064-004-0267-0>
- Sassi, J., 2014. Tutkimus autojen hammashihnavälitteisen jakopään kestävyysongelmista. Opinnäytetyö. Lapin Ammattikorkeakoulu, 44 s.
- Tervahattu, H., Kupiainen, K. J., Räisänen, M., Mäkelä, T. & Hillamo R., 2006. Generation of urban road dust from anti-skid and asphalt concrete aggregates. *Journal of Hazardous Materials* 132, 39–46. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.11.084>
- Valli, R., Laine, V., Koukkula, M., Parviainen, S. & Kokkonen, J., 2018. Pölyvien maanteiden ongelmat taajamissa. Liikennevirasto, Helsinki, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 48/2018, 50 s. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-317-613-3>
- Väänänen, V., 2017. Jakopäiden ennenaikaisen kulumisen alueellinen esiintyminen ja mahdolliset syyt. Insinöörityö. Metropolia Ammattikorkeakoulu, 22 s.