

Tallinna Tehnikaülikooli Tartu Kolledž  
Keskkonnakaitse õpetool

**Teekattest ja rehvidest pärinevate peenosakeste mõõteseadme  
konstrueerimine ja katsetamine**  
Magistritöö tööstusökoloogia erialal

**Tarvo Arumäe**

Juhendaja: Marek Maasikmets, MSc  
Eesti Keskkonnauuringute Keskus

Tartu 2013

## **Autorideklaratsioon**

Deklareerin, et käesolev magistritöö, mis on minu iseseisva töö tulemus, on esitatud Tallinna Tehnikaülikooli magistrikraadi taotlemiseks ja et selle alusel ei ole varem taotletud akadeemilist kraadi.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

.....  
Kuupäev

.....  
Allkiri

## Sisukord

Sissejuhatus .....	4
1 Ülevaade varasematest uuringutest .....	8
1.1 Mathissen et al. (2012) uuring .....	8
1.2 Hussein et al. (2008) uuring .....	10
1.3 Pirjola et al. (2009) uuring .....	11
1.4 Paapsi et al. (2011) uuring .....	12
2 Mõõtmiste kirjeldus ja meetodika .....	14
2.1 REAL tehnilised andmed .....	16
2.2 Kasutatud analüsaatorite iseloomustus .....	20
3 Tulemused .....	23
3.1 Erinevate rehvitüüpide PM <sub>10</sub> eriheid ja peenosakeste emissiooni sõltuvus kiirusest ..	24
3.2 Erinevate rehvitüüpide peenosakeste arvu suurusjaotus .....	27
Arutelu .....	28
Kokkuvõtte .....	31
Summary .....	33
Tänuõnad .....	35
Kirjandus .....	36

## Joonised

Joonis 1. Saksa liikuvlabor (Mathissen et al., 2012) .....	8
Joonis 2. Optilise mõõteseadme paiknemine sõiduki katusel (Mathissen et al., 2012) .....	9
Joonis 3. EMMA skemaatiline joonis (Hussein et al., 2008) .....	11
Joonis 4. SNIFFER liikuvlabori ehitus (Pirjola et al., 2009) .....	12
Joonis 5. Paapsi (2011) mõõtesead .....	13
Joonis 6. REAL skemaatiline joonis (Maasikmets et al., 2013) .....	16
Joonis 7. Seadmete paiknemine REAL-is .....	17
Joonis 8. Proovivõtusondi ja temperatuurianduri paigutus tagarehvi juures .....	19
Joonis 9. Ventilaatorid REAL-is (vaade tagant) .....	19
Joonis 10. ELPI skemaatiline joonis (ELPI operating principle, 2013) .....	21
Joonis 11. OPS tööpõhimõtte skemaatiline joonis (Optical Particle Sizer, 2013) .....	22
Joonis 12. Erinevate rehvitüüpide PM <sub>10</sub> eriheid ja sõltuvus kiirusest .....	25
Joonis 13. Peenosakeste emissiooni sõltuvus kiirusest (suverehvidega) .....	26
Joonis 14. Erinevate rehvitüüpide peenosakeste suurusjaotus .....	27

## Tabelid

Tabel 1 Saasteainete piirväärtused välisõhus (RT I, 12.07.2011, 3) .....	6
Tabel 2 ELPI+ mõõtefraktsioonid (ELPI operating principle, 2013) .....	20

## Sissejuhatus

Välisõhk on üks keskkonna elutähtsatest komponentidest ning puhast õhku loetakse inimeste tervise ja heaolu elementaarseks nõudeks. Välisõhk sisaldab peale põhiliste koostisosade nagu lämmastik, hapnik, argoon ja süsinikdioksiid alati suuremal või vähemal määral mitmesuguseid lisandeid. Sõltuvalt lisandite kontsentratsioonist, rollist ja mõjust elusorganismidele loetakse osasid nendest lisanditest saasteaineteks ehk välisõhu saasteks. Sõltuvalt piirkonnast ja ajastust on saastunud välisõhk olnud küllaltki oluline inimeste tervist mõjutav komponent. Hoolimata kõikidest pingutustest on õhusaaste ka tänapäeval jätkuvalt inimeste tervisele ohuks terves maailmas. (WHO, 2006).

Peenosakeste (PM<sub>x</sub> – Particulate matter, inglise keeles x µm aerodünaamilise diameetriga aerosoolsed osakesed, mis läbivad vastava suurusega mõõduselektiivse ava 50 protsendil juhtudest) emissioonide vähendamine on oluline teema, kuna paljudes uuringutes on leitud, et PM<sub>x</sub> on võrreldes teiste saasteainetega tänu oma keerulisele füüsikalise-keemilisele omadustele suurimad tervisemõjurid ja mõjutavad inimeste tervist kahjulikult ka väga madalatel kontsentratsioonidel. Kuigi mõõtetulemused näitavad, et vaatamata kütteallikate arvu suurenemisele ning liiklustiheduse kasvule, on viimastel aastatel Euroopa välisõhu kvaliteet märgatavalt paranenud, on peenosakeste tervisemõju endiselt väga aktuaalne. Maailma Tervishoiuorganisatsiooni (WHO) 2003 aasta andmete kohaselt kaotatakse maailmas aastas osakeste pikaajalise õhusaaste tõttu kuni 6,4 miljonit eluaastat. Euroopas on sama näitaja 725 000 eluaastat, mis tähendab, et praegused osakeste tasemed vähendavad inimeste keskmist statistilist eluiga 1-2 aastat. (WHO, 2003; Ostro *et al.*, 2003).

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli esindusliku mõõtemetodi väljatöötamine maanteetranspordis rehvide, piduriklotside ja teekatte kulumisest tekkivate peenosakeste (PM<sub>x</sub>) emissiooni mõõtmiseks. Lisaks mõõtemetodile oli antud töö eesmärgiks katsetada antud meetodi ja mõõtevahendi sobivust Eesti tingimustes. Selleks teostati testmõõtmised, mille käigus muu hulgas hinnati PM<sub>x</sub> emissiooni sõltuvust erinevatest teguritest nagu sõiduki kiirus, rehvi- ja teekatte temperatuur, rehvitüüp (naast-, lamell- ja suverehv). Mõõtemetodi sobivuse korral on võimalik hinnata transpordisektori mitte-põlemisprotsessidest pärinevate peenosakeste emissioone. Antud emissioonide hindamine on oluline, kuna varasemate uuringute alusel on kindlaks tehtud, et antud sektorist pärinevad peenosakeste emissioonid mõjutavad linnaõhu kvaliteeti oluliselt (Bukowiecki *et al.*, 2010). Mitmete Euroopa linnade

uuringud on näidanud, et kogu peenosakeste heitkogustest ligikaudu poole moodustavad pindade kulumisprotsessidest pärinevad peenosakesed. Euroopa riikides, kus talvisel ajal kasutatakse libedusetõrjeks liivatamist, soolatamist ja naastrehve võib pindade kulumisprotsessist pärinevate peenosakeste PM10 osakaal kasvada 90%-ni. (Omstedt *et al.*, 2005; Forsberg *et al.*, 2005). Skandinaavias teostatud mõõtmistulemuste põhjal võib järeldada, et teekattest pärinevate osakeste osakaal on märkimisväärselt kõrgem talvistel ja varakevadistel mõõtmistel (Hussein *et al.*, 2008). Peamiseks põhjuseks peetakse libedusetõrjet ja naastrehvide poolt teekatte kulutamist. Uurimisteema on oluline, kuna Eestis ja mujal Euroopas on viimastel aastatel jätkuvalt aktuaalne peenosakeste probleem. Mõningate gaasiliste saasteainete (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>) välisõhu tasemed on langenud, samal ajal kui peenosakeste tasemed on tõusnud. (European Environment Agency, 2012).

Peenosakesed, eriti just väga peened osakesed, PM<sub>2,5</sub> ja väiksemad osakesed on inimese tervisele eriti ohtlikud, põhjustades erinevaid hingamisteede ja südameveresoonkonna haigusi ning isegi kopsuvähki (Delfino *et al.*, 2005; Pope *et al.*, 2002). Igapäevaselt puutubki inimene kõige rohkem peenosakestega kokku tööl olles või tänaval liigeldes, mistõttu on liiklusest tingitud peenosakeste emissioon ka uurimuse eesmärgiks. Samuti näitavad uurimused, et peenosakeste kontsentratsioonid on kõrgemad tänavate ääres, võrrelduna magalate ja segapiirkondadega (Saare *et al.*, 2012). Peenosakestele kehtivad välisõhu kvaliteedi piir- ja sihtväärtused (Tabel 1).

Teedelt pärinevate peenosakeste emissiooni ja mitte-toruotsa heiteid (inglise keeles *non-exhaust emission*) on varasemates uuringutes mõõdetud enamasti tee kõrval olevate statsionaarsete mõõteseadmetega (Norman, *et al.*, 2006; Bukowiecki *et al.*, 2010) ning laboritingimustes (Dahl *et al.*, 2006; Gustafsen *et al.*, 2008). Laboritingimustes läbiviidud katsete tulemusi on raske reaalsesse liiklustingimustesse rakendada, kuna selliste katsete puhul on tegemist kontrollitud tehlike tingimustega. Statsionaarsed seadmed mõõdavad lisaks tee kulumisest tingitud peenosakestele ka fooniõhku ja heitgaase auto sisepõlemismootorist. Liikuv mõõtmisviis annab võimaluse mõõta peenosakeste emissioone reaalses liiklustingimustes, kasutades reaalseid sõidukeid ning koormusi. Lisaks vähendab see võimalike segajate nagu heitgaaside, ilmastikutingimuste (õhuliikumine, inversioon) või piiratud õhuliikumisega piirkondade mõju. Reaalseid sõidukeid kasutades annab see võimaluse lisaks uurida erinevate rehvitüüpide (suve-, lamell- ja naastrehvid) mõju PM<sub>x</sub> tekkeprotsessis.

*Tabel 1 Saasteainete piirväärtused välisõhus (RT I, 12.07.2011, 3).*

Saasteaine	Keskmistamisaeg	Lubatud piirväärtus $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Lubatud ületamiste arv aastas
PM <sub>2,5</sub>	1 aasta	25	-
PM <sub>10</sub>	1 aasta	40	-
	24 tundi	50	35 päeva

Mõõteseadme planeerimise faasis keskenduti varasematele uuringute tulemustele (Mathissen *et al.*, 2012, Paapsi, 2011, Hussein *et al.*, 2008, Pirjola *et al.*, 2009) ning antud uuringute soovitudest ja tulemustest lähtuvalt konstrueeriti mobiilne mõõtesüsteem, mis võimaldab teostada teekatte ja rehvide kulumisest pärinevate peenosakeste mõõtmisi. Töö jagunes kahte põhilisse faasi:

1. Mõõteseadme planeerimine ja ehitus
2. Testmõõtmiste teostamine mõõteseadmega

Olulisteks aspektideks planeerimise ja ehitusfaasis olid:

1. Mõõteseadme peab olema ilmastikukindel ning võimaldama teostada mõõtmisi erinevatel aastaegadel ja erinevate ilmastikutingimustega;
2. Mõõteseadet peab saama kasutada peenosakeste emissiooni mõõtmisel erinevate sõidukite ja rehvitüüpidega (lamell-, naast- ja suverehv);
3. Mõõteseadme peab tagama peenosakeste ja muude parameetrite mõõtmiseks vajalike analüsaatorite autonoomse elektritoite;
4. Mõõteseadme peab võimaldama teostada PM<sub>x</sub> isokineetilisi mõõtmisi paralleelselt mõlema tagumise ratta tagant ning võimaldama määrata auto ees olevat PM<sub>x</sub> foonitaset vähemalt 1 Hz sagedusega;
  - a. Isokineetilise proovivõtu tagamiseks tuleb mõõteseadme varustada proovivõtusondidega, mille sees liikuva õhuproovi liikumise kiirust on võimalik muuta vastavalt sõiduki liikumise kiirusele;
  - b. Proovivõtusondide läbimõõt ja paigutus tuleb optimeerida selliselt, et sondides oleks tagatud minimaalne PM<sub>x</sub> kadu;

- c. PMx kadu sondides tuleb katseliselt sõiduki erinevate liikumiskiirustega hinnata;
  - d. Mõõteseadmes kasutatavad analüsaatorid peavad võimaldama PMx mõõtmisi vähemalt koagulatsiooni- ja jämedispersest fraktsioonist (10 nm kuni 10 µm).
5. Mõõteseadme peab võimaldama määrata sõidu ajal rehvi- ja teekatte temperatuuri vähemalt 1 Hz sagedusega;
  6. Sõiduki heitgaasid tuleb mõõtetulemuste võimaliku mõjutuste vältimiseks mõõteseadmest mööda juhtida.

Testmõõtmiste planeerimise faasis olid olulisteks aspektideks:

1. Testmõõtmistee käigus tuleb keskenduda erinevat tüüpi rehvide, piduriklotside ja teekatte kulumisest pärinevate peenosakeste mõõtmisele;
2. Mõõtmised teostada kuiva teekattega teelõikudel;
3. Sõiduki ees olev fooniõhku mõõtev analüsaator ja sõiduki tagarataste alt PMx mõõtvad analüsaatorid peavad võimaldama mõõtmisi PMx sarnastest fraktsioonidest ning kõigi analüsaatorite andmesalvestite kellaajad tuleb enne igat mõõtmist sünkroniseerida;
4. Proovivõtusondis liikuva õhu kiirust tuleb reguleerida vastavalt planeeritavale sõidukiirusele;
5. Sõiduki heitgaaside mõjud elimineerida heitgaaside möödajuhtimisega mõõtesüsteemist spetsiaalse pikendatud heitgaasi voolikuga;
6. Proovivõtusüsteemist tingitud jämedafraktsiooniliste peenosakeste kadu hinnata reaalsete mõõtmistega ning võtta kaod heitkoguste arvutamisel arvesse;
7. Mõõtmiste käigus mitme-astmelisele impaktorile kogutud PMx filtritelt teostada asjakohaste raskmetallide (Fe, Cu, Zn, Zr, Mo, Sn, Sb, Ba, Si, Ti, Cr, Mn), ionide (K, Ca, Cl) ja BC (black carbon) hilisem laboratoorne analüüs.

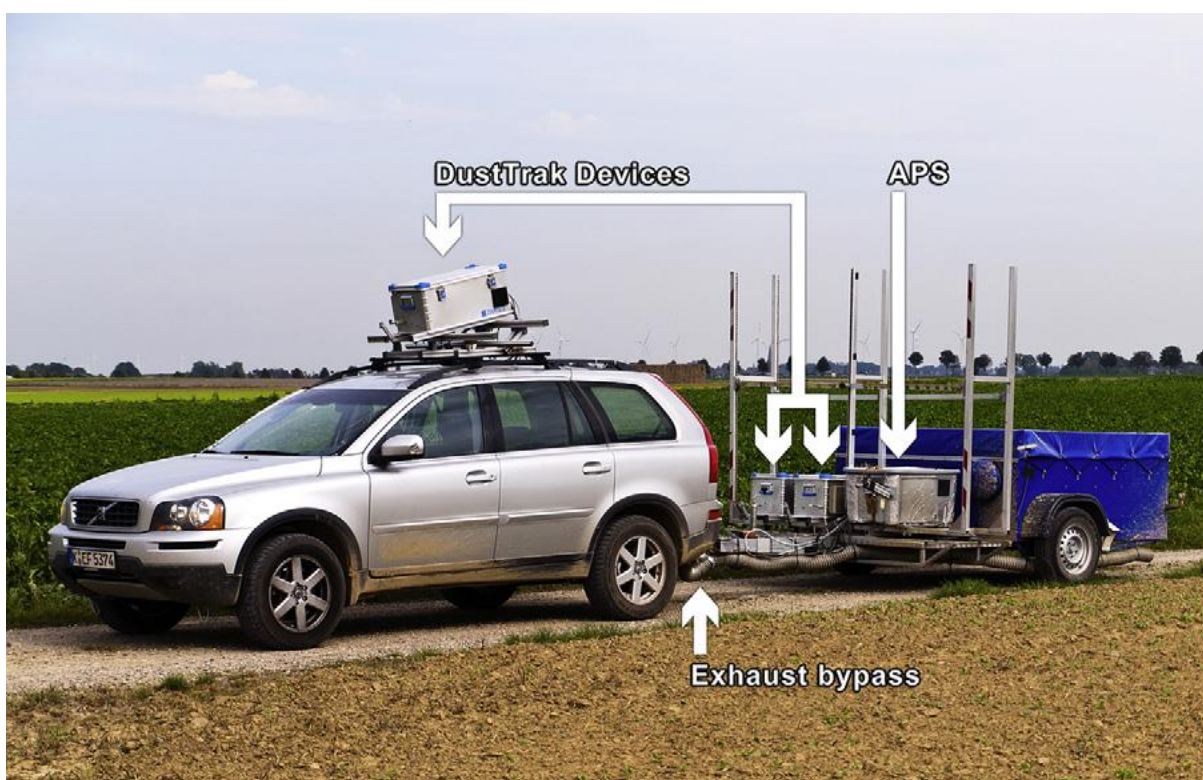
Mõõteseadme planeerimine teostati Eesti Keskkonnauuringute Keskuses ning mõõteseadme ehitus telliti metallitöid teostavalt firmalt Bestway OÜ. Mõõteseadmes kasutati Eesti Keskkonnauuringute Keskusele kuuluvaid analüsaatoreid.

# 1 Ülevaade varasematest uuringutest

Sarnaseid mõõtmisi spetsiaalsete liikuvlaboritega on varem teostatud näiteks Saksamaal (Mathissen *et al.*, 2012), Rootsis EMMA projekt, (Hussein *et al.*, 2008) Soomes SNIFFER projekt, (Pirjola *et al.*, 2009) ja Eestis (Paapsi, 2011). Alljärgnevalt on toodud antud uuringute lühikokkuvõtted.

## 1.1 Mathissen *et al.* (2012) uuring

Sõidukiks on Volvo crossover maastur, mille järel veeti kerghaagist, kuhu olid paigutatud analüsaatorid, akud ning muud lisaseadmed. Proovi rikkumise vältimiseks heitgaaside poolt olid heitgaasid juhitud sondidest mööda kuumuskindla voolikuga (Joonis 1)



Joonis 1. Saksa liikuvlabor (Mathissen *et al.*, 2012).

Erinevalt EMMA või SNIFFER liikuvlaboritest, kus proovivõtu sond paiknes ratta vahetus läheduses, mõõtsid sakslased peenosakeste emissiooni lihtsalt auto taga tekkivas õhuvoolus. Kontrollimaks oma meetodit, tegid nad Belgias, Lommeli linnas paikneval Fordile kuuluval testrajal katseid 10%-lise lämmastikoksiid (NO) gaasiga. Katse ajaks paigaldati haagisele vastavad seadmed NO gaasi mõõtmiseks. Eeldati, et etalongaas käitub analoogselt peenosakestega sõiduki taga olevas õhuvoolus. Katsega selgitati kui kaugemale sõiduki tagaosast



tuleb mõõtesondid paigutada ning kuidas tuleb paigutada mõõtesondid autorataste taga. Katse tulemusena arvatati emissioon sõiduki liikumiskiirustel 30-100 km/h. Sondid paiknesid 1,8 m kaugusel autost, 0,65 m kõrgusel pinnast ning 0,85 meetri kaugusele sõiduki vertikaalsest keskeljest. Analüsaatoriteks kasutati kolme optilist PM mõõteseadet (TSI DustTrak II mudel 8530). Iga mõõteseadet paigutati tagarataste taha ning kolmas mõõteseadet fooniõhu mõõtmiseks auto katusele (Joonis 2). Jooniselt 2 nähtuvt fooniõhuvoolud, mida auto katusele reaalsetes tingimustes mõõdetakse.

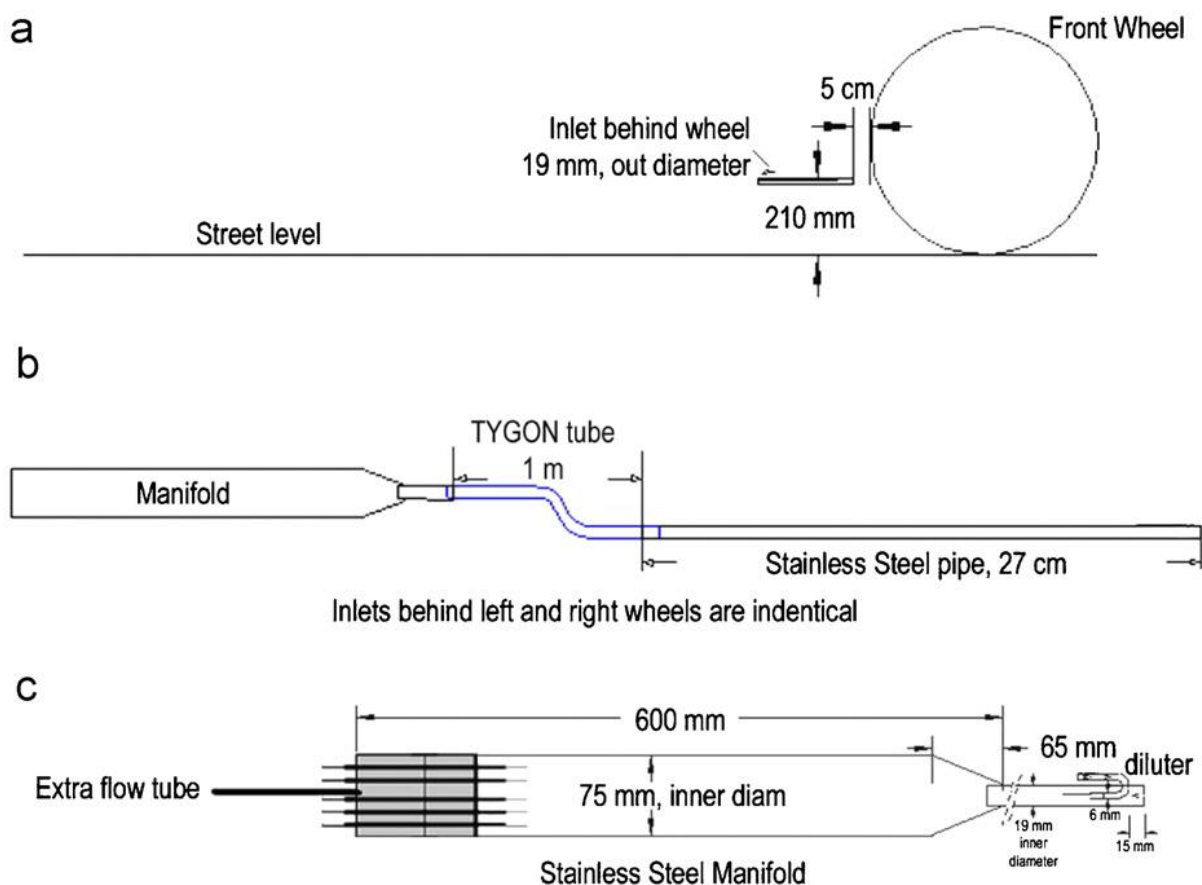


*Joonis 2. Optilise mõõteseadme paiknemine sõiduki katusel (Mathissen et al., 2012).*

Kuna Saksamaal pole naastrehvide kasutamine lubatud, siis kasutati mõõtmiste ajal lamellrehve. Sõideti erinevatel kiirustel ja teedel, sealhulgas kruusaga kaetud teel. Kõige madalamad peenosakeste kontsentratsioonid mõõdeti kõvakattega kiirteel suurtel kiirustel. Maanteel teostatud mõõtmiste põhjal saadi peenosakeste eriheitiks  $26 \pm 19$  mg/vkm (milligrammi sõidetud kilomeetri kohta). Suurimad peenosakeste kontsentratsioonid mõõdeti kruusateedel, kus need jäid vahemikku  $24\ 000 \pm 19\ 000$  mg/vkm kiirusel 30 km/h ning täheldati kontsentratsiooni tõusu kiiruse suurenedes (Mathissen et al., 2012).

## **1.2 Hussein et al. (2008) uuring**

Sõidukiks kasutati Volkswageni kaubikut LT 35 (2002), kolmest roostevabast terasest torust kaks olid paigutatud esirataste taha ning kolmas viidud esipõrkeraua juurde ning kinnitatud selle alla fooniõhu mõõtmiseks. Mõlemad proovivõtuavad, mis asusid rataste taga, olid läbimõõduga 1,9 cm ning 230 cm pikkused, proovivõtu kiiruseks oli 75 l/min. Sondi ots paiknes 21 cm kõrgusel tee pinnast, 5 cm kaugusel rehvist ning 6,3 cm kaugusel tsentri poole rehvi välisküljest arvestatult (Joonis 3). Fooniõhu sondi diameeter oli 0,4 cm, pikkus 300 cm ja proovivõtu kiirus 1,7 l/min. Kõik 3 sondi viivad läbi kaubiku alusvankri, sõiduki kaubaruumi, kus paiknevad mõõteseadmed. Mõlemad sondid, mis paiknesid rataste taga koondusid 60 cm pikkusesse torpeedo kujulisse kollektorisse, mille sisediameeter oli 7,5 cm ja selles paikneb spetsiaalselt disainitud õhusegaja, mis kindlustas õhu ühtlase voolavuse ja segunemise kollektorit läbides (Joonis 3). Kollektorist sai proovi mõõta samaaegselt kuni 5 seadet. Antud uuringus kasutati peenosakeste mõõtmiseks kolme optilist mõõteseadet (TSI DustTrak II mudel 8529), üks mõlema ratta ja üks fooniõhu jaoks. Lisaks kasutati optilist peenosakeste loendurit (GRIMM Technologys'i Particulate size analyzer, mudel 1.109, 31 eri kanaliga peenosakeste spektromeeter). GRIMM kogus proovi parema esiratta juurest, selle kanalid jaotusid vastavalt 0,265 – 32 µm suuruste osakeste jaoks. Seadmed olid ühendatud kollektoriga TYGON tüüpi voolikuga. Sõiduki asukoht ja kiirus salvestati kogu mõõtettsükli käigus GPS'ga, mille salvestuse intervall oli 1 sekund (Hussein *et al.*, 2008).

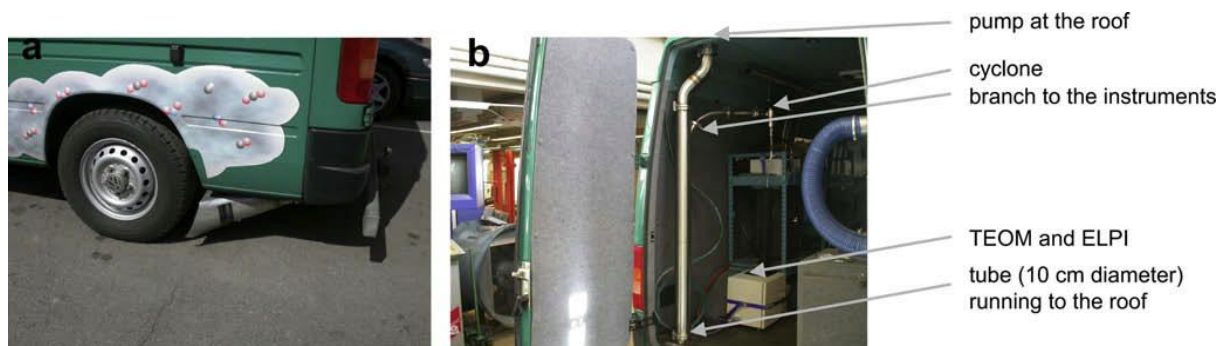


Joonis 3. EMMA skemaatiline joonis (Hussein et al., 2008).

### 1.3 Pirjola et. al (2009) uuring

Sarnaselt EMMA projektiga, kasutati antud uuringus mõõtevahendina Volkswageni LT 35 kaubikut. Proove koguti vasaku (juhipoolse) tagumise ratta juurest, koonilise sondiga, mille trapetsikujulise sisselaskeava suuruseks oli  $0,034 \text{ m}^2$ . Koonuse alumine serv paiknes 7 cm kõrgusel teepinnast (Joonis 4). Sealt edasi liikus õhuvoog vertikaalsesse torru, läbimõõduga 10 cm, mis oli juhitud läbi kaubiku tagaosa kaubiku katusele, kus paiknes elektrimootor, mis tagas torus voolukiiruse  $\sim 2000 \text{ l/min}$  (Joonis 4). Kaubikut läbiva sondi külge kinnitus lisatoru läbimõõduga 2,5 cm, mille ava oli allapoole kurviga ning paiknes suure sondi keskel, et säiliks isokineetiline proovivõtt. Lisatorust tagati seadmetele vajaminev proov. SNIFFER-is kasutati analüsaatoritena TEOM'i (Tapered Element Oscillating Microbalance, Series 1400A, Rupprecht & Patashnick) ning Dekati ELPI (Electrical Low Pressure Impactor). Proovivõtu torus oli õhu liikumiskiiruseks  $13 \text{ l/min}$ , millest  $10 \text{ l/min}$  oli ELPI-le ja ülejäänud  $3 \text{ l/min}$  TEOM-ile. ELPI proovivõtusondi ees asetseb tsüklon, (Dekati SAC-65), millega eraldati

õhuvoolust kõik osakesed suuremad kui 9,2 µm. (Joonis 4) Lisaks rehvalt tulevatele peenosakestele mõõtis üks ELPI fooniõhku auto ees olevast proovivõtu avast, mis paiknes 70 cm kõrgusel teepinnast auto esipõrkeraua küljes (Pirjola *et al.*, 2009).



Joonis 4. SNIFFER liikuvlabori ehitus (Pirjola *et al.*, 2009).

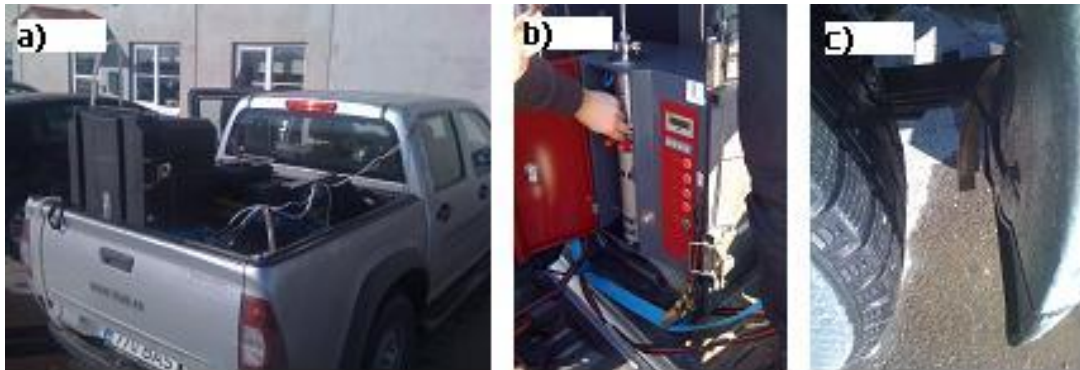
#### 1.4 Paapsi *et al.* (2011) uuring

Katsesõidukiks oli IZUZU, mille kasti olid elektrigeneraator ja ELPI. Antud uuringus kasutati ainult ühte peenosakeste analüsaatorit – ELPI. Liikuvlabor mõõtesond oli kinnitatud sõiduki vasakule (juhipoole) tagarattakoopase, proovi võeti rehvi vahetuslähedusest, otse rehvi tagant (Joonis 5). Antud uuringu põhjal leiti, et teekattelt eralduvate peenosakeste teatud fraktsioonide kontsentratsioon on otseselt sõltuvad sõiduki kiirusest. Proovimõõtmise ja saadud tulemuste analüüs näitas, et konstrueeritud liikuvlabor (Joonis 5) on teekattelt eralduvate peenosakeste kontsentratsiooni mõõtmise jaoks sobilik, juhul kui järgmistel mõõtmistel määratakse samaaegselt ka taustakontsentratsioone.

Kitsaskohana võib välja tuua ELPI seadmesse jõudvate peenosakeste allikate mitmekesisuse. Tulemusi mõjutavad kindlasti autode heitgaasidest pärinevad peenosakesed, taustõhu kvaliteet ja muu liiklusega kaasnev resuspensioon. Selleks, et saada teada ainult teekattelt pärinevaid heitkoguseid tuleks uuringute käigus jälgida ka taustõhu kvaliteeti ja võimalusel kasutada teelõike kus liikluskoormus on väike. Paremate prooviandmete saamiseks tuleks rattakoopas paikneva sisselaskeava külge komplekteerida koonuseline lehter. Lehtri lisamisega peaks ELPI-ni jõudvate peenosakeste hulk kasvama ning tulemus olema esinduslikum. Kuigi selliseid mõõtmisi viiakse läbi kuival teekattel esineb juhuseid, kus teepind võib olla märg-olgu tegu siis päikese käes tekkinud lumesulavee või mõne muu sellisega, tuleks vältida vee sattumist mõõtmisseadmetesse. Niiskuse kõrvalmõjude vältimiseks oleks tarvis paigutada ELPI-le soojendatav sond, mille tulemusena eemaldatakse proovist üleliigne niiskus. Oluline

oleks jälgida, et proovivõtusond paikneks rattakoopast vertikaalselt ELPI suunas vähemalt ühe meetri, kindlasti ei tohi ta olla horisontaalselt ega lohuga, kuhu niiskus saaks koguneda.

Lisaks oleks koonuse järele sisselaskeava ette mõistlik paigutada väike sõel, et takistada suurte osakeste nagu näiteks kivide sattumist ELPI-sse. Suuremad osakesed võivad ELPI ummistada. Teekattest eralduvate peenosakeste heitkoguste määramiseks on ELPI seade otstarbekas valik. (Paapsi, 2011).



*Joonis 5. Paapsi (2011) mõõtesead*

## 2 Mõõtmiste kirjeldus ja meetoodika

Eestis oli varem teostatud Paapsi (2011) poolt pilootprojekt, mille tulemusel leiti mitmeid tegureid, kuidas oleks võimalik esinduslikumalt teedelt tulevat peenosakesi mõõta. Paapsi (2011) ja teistest uuringutulemustest (Mathissen *et al.*, 2012, Hussein *et al.*, 2008, Pirjola *et al.*, 2009) lähtuvalt konstrueeriti mobiilne mõõteseade REAL (*Road Emission Aerosal Laboratory*), millega on võimalik mõõta sõidukite rehvide, piduriklotside ja teekatte kulumisest pärinevaid PM<sub>x</sub> emissioone. REAL mõõtesüsteemiga on võimalik mõõta ka sõidukite heitgaase sõiduki reaalsel liikumisel välistingimustes, kuid antud uuringus selleteemalisi katseid ei sooritatud. REAL-i ehitamisel ja projekteerimise eeltingimused ja olulised aspektid on toodud töö sissejuhatavas osas.

Vältimaks niiskuse ja veepritsmete sattumist mõõtesüsteemi, kus see mõjutab peenosakeste koaguleerumist, saab antud seadmega katseid teostada vaid kuiva ilma ning teekatte puhul. Muud ilmastikutingimused – tuule kiirus ja temperatuur - mõjutavad mõõtmisi vähe, seni kuni proovi kogutakse rehvi keskelt ja mitte kaugemalt kui 10 cm rehvi pinnast (Etyemezian *et al.*, 2003).

Mõõteseade REAL vastab järgmistele tingimustele:

1. Mõõteseade on ilmastikukindel ning võimaldab teostada mõõtmisi erinevatel aastaagadel ja erinevate ilmastikutingimustega, välja arvatud mõõtmisi niiske teekatte korral. Testmõõtmised teostati vaid kuiva teekattega teelõikudel;
2. Mõõteseadet saab kasutada peenosakeste emissiooni mõõtmisel erinevate sõidukite ja rehvitüüpidega (lamell-, naast- ja suverehv). Testmõõtmistee käigus keskenduti erinevat tüüpi rehvide, piduriklotside ja teekatte kulumisest pärinevate peenosakeste mõõtmisele;
3. Mõõteseade on varustatud peenosakeste ja muude parameetrite mõõtmiseks vajalike analüsaatorite autonoomse elektritoitega;
4. Mõõteseade võimaldab teostada PM<sub>x</sub> isokineetilisi mõõtmisi paralleelselt mõlema tagumise ratta tagant ning võimaldab määrata auto ees olevat PM<sub>x</sub> foonitaset vähemalt 1 Hz sagedusega;
  - a. Sõiduki ees olev fooniõhku mõõtev analüsaator ja sõiduki tagarataste alt PM<sub>x</sub> mõõtvad analüsaatorid seadistati enne testmõõtmisi PM<sub>x</sub> sarnastele

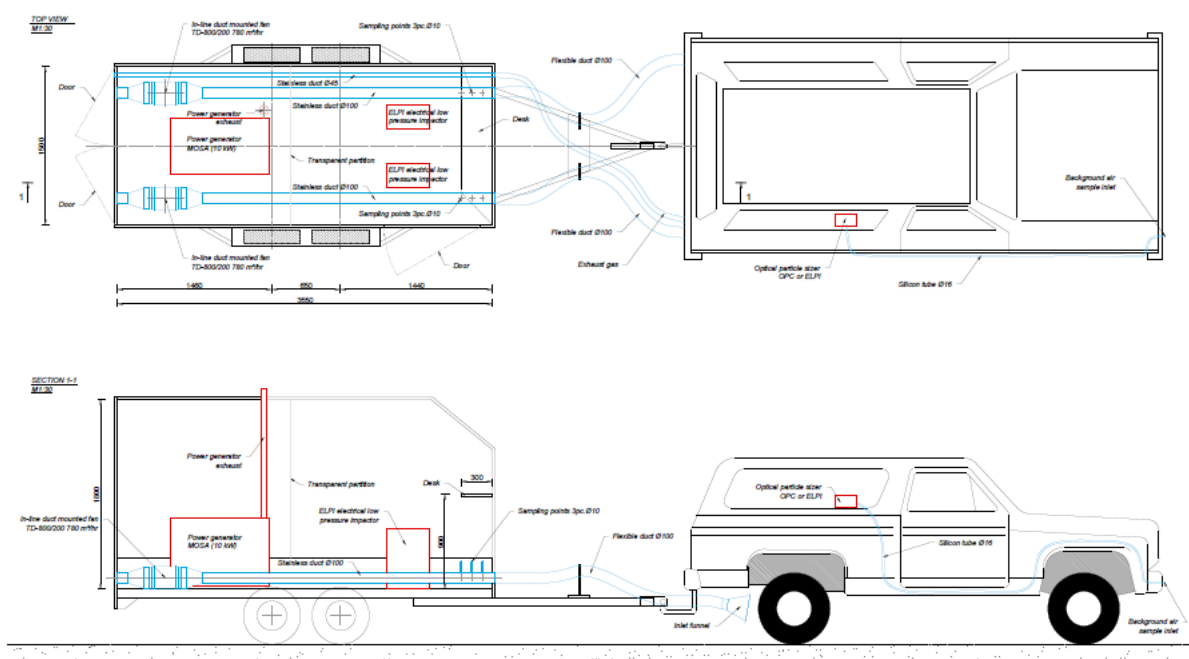
fraktsioonivahemikele ning kõigi analüsaatorite logerite kellaajad sünkroniseeriti enne igat mõõtmist;

- b. Isokineetilise proovivõtu tagamiseks on mõõteseade varustatud proovivõtusondidega, mille sees liikuva õhuproovi liikumise kiirust muudeti vastavalt sõiduki liikumise kiirusele;
  - c. Proovivõtusondide läbimõõt ja paigutus on optimeeritud selliselt, et sondides on tagatud minimaalne PM<sub>x</sub> kadu;
  - d. PM<sub>x</sub> kadu sondides määrati katseliselt sõiduki erinevate liikumiskiirustel;
  - e. Mõõteseadmes kasutatavad analüsaatorid võimaldavad PM<sub>x</sub> mõõtmisi vähemalt koagulatsiooni- ja jämedispersest moodist (10 nm kuni 10 µm).
5. Mõõteseade võimaldab määrata sõidu ajal rehvi- ja teekatte temperatuuri vähemalt 1 Hz sagedusega;
6. Sõiduki heitgaasid olid mõõtetulemuste võimaliku mõjutuste vältimiseks mõõteseadmest mööda juhitud.
7. Proovivõtusüsteemist tingitud jämedafraktsiooniliste peenosakeste kadu hinnati reaalsete mõõtmistega ning kadudega arvestati PM<sub>x</sub> eriheidete arvutamisel.

Katsed naast- ja lamellrehvidega viidi läbi 2013 aprillikuus (kokku 4 katset), kui talverehvide kasutamine oli Eestis lubatud. Sõiduki tagateljelele paigutati samaaegselt naast- ning lamellrehv ning mõõdeti mõlema rehvi mõju samaaegselt. Katsed suverehvidega viidi läbi 2013 aasta suvel (kokku 4 katset).

## 2.1 REAL tehnilised andmed

Testmõõtmiste ajal oli sõidukiks Toyota Hilux (2006) 2,5 TDI, (turbodiisel) mootori võimsuseks 88 kW (118 hobujõudu). Sõiduki mõõtmed: pikkus 5255 mm, laius 1760 mm, kõrgus 1810 mm, registrimass 2760 kg. Tagumise telje koormus, kus paikneb sond, oli 1510 kg. Testmõõtmiste ajal kasutati rehvidena Michelin Latitude cross suvrehve, mõõtudega 265/70 R15. Naastrehvidena kasutati Cooper Discoverer 265/70 R15 M+S ja lamellrehvidena Bridgestone Blizzak 265/70 R15 M+S. Sõiduki taga paiknes mõõtmisteks ümberehitatud järelveetav haagis, kus paiknesid analüsaatorid koos muude vajalike lisaseadmetega. Haagise mõõtmed olid: kogupikkus 5140 mm, laius 1920 mm ja kõrgus 2334 mm, registrimass 1700 kg (Joonis 6).



Joonis 6. REAL skemaatiline joonis (Maasikmets et al., 2013).

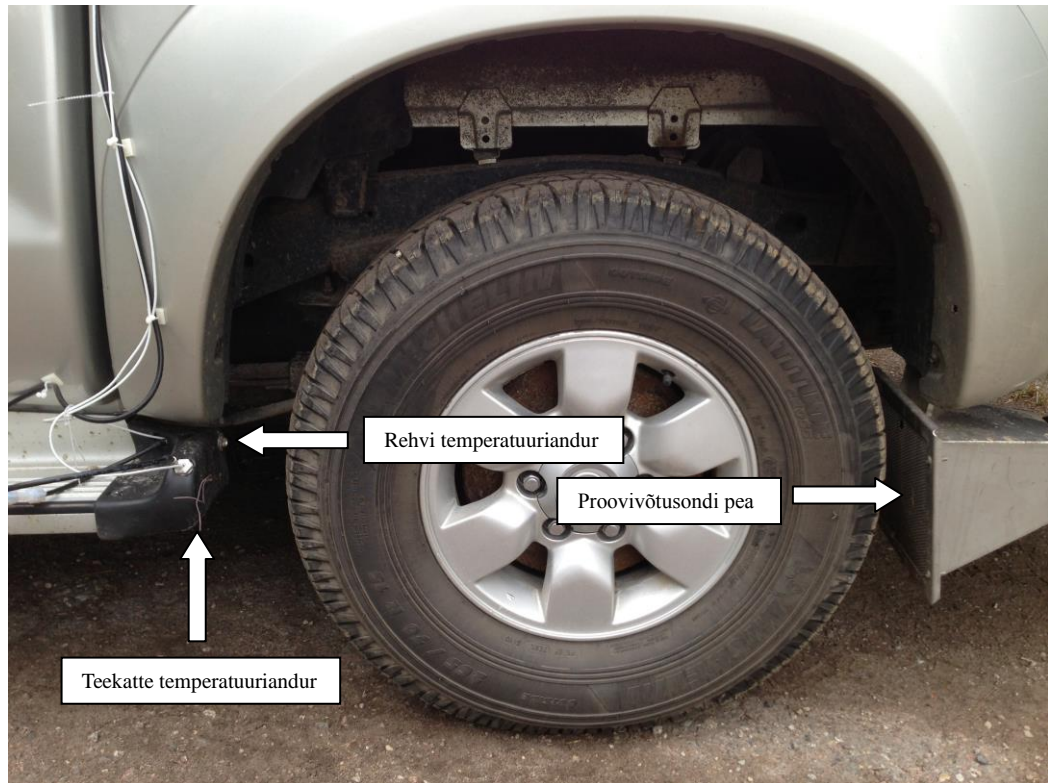
Sõidukil kasutati mõõtmiste ajal tagasillavedu. Haagises paiknesid osakeste analüsaator Dekati ELPI+<sup>TM</sup> (Electrical Low Pressure Impactor), selle pump, osakeste optiline analüsaator OPS (Optical Particle Sizer 3330, TSI), temperatuuriandurite puhastamiseks mõeldud suruõhu kompressor (GIS, SIL AIR 50/9, maksimaalne jõudlus 8 bar) ning muud seadmed (elektrigeneraator, proovivõtusondid koos reguleeritavate ventilaatoritega, juhtarvuti, temperatuuriandurite logerid, katkematu voolutoite allikas, elektrikilp) (Joonis 7).





sõiduki heitgaaside sond diameetriga 50 mm, mille väljapuhe asus haagise tagumises osas, tagades sellega sõiduki heitgaaside eemalejuhtimise proovivõtukoolest. Vajadusel on võimalik teostada ka sõiduki heitgaaside mõõtmisi reaalsetes sõidutingimustes. Isokineetilise proovivõtu tagamiseks oli proovivõtusondide lõppu paigutatud reguleeritavad tõmbeventilaatorid (TD-800/200, maksimaalne väljapuhe  $2 \times 1100 \text{ m}^3/\text{h}$ ) (Joonis 9). Proovivõtusondides liikuva õhu kiirust mõõdeti pisteliselt rõhuerinevuste kaudu automaatanalüsaatoriga Testo 400 (Testo AG). Isokineetilise proovivõtu tagamiseks oleks vajalik paigutada mõõtesondi statsionaarne anemomeeter ja ventilaatori jõudlust vastavalt anemomeetri näidule reguleerida.

Fooniõhu mõõtmiseks oli sõiduki esiossa esipõrkeraua külge paigutatud silikoonist proovivõtusond, mille kaudu imeti proov sõiduki salongi, kus paiknes osakeste optiline analüsaator OPS.



*Joonis 8. Proovivõtusondi ja temperatuurianduri paigutus tagarehvi juures.*



*Joonis 9. Ventilaatorid REAL-is (vaade tagant).*

## 2.2 Kasutatud analüsaatorite iseloomustus

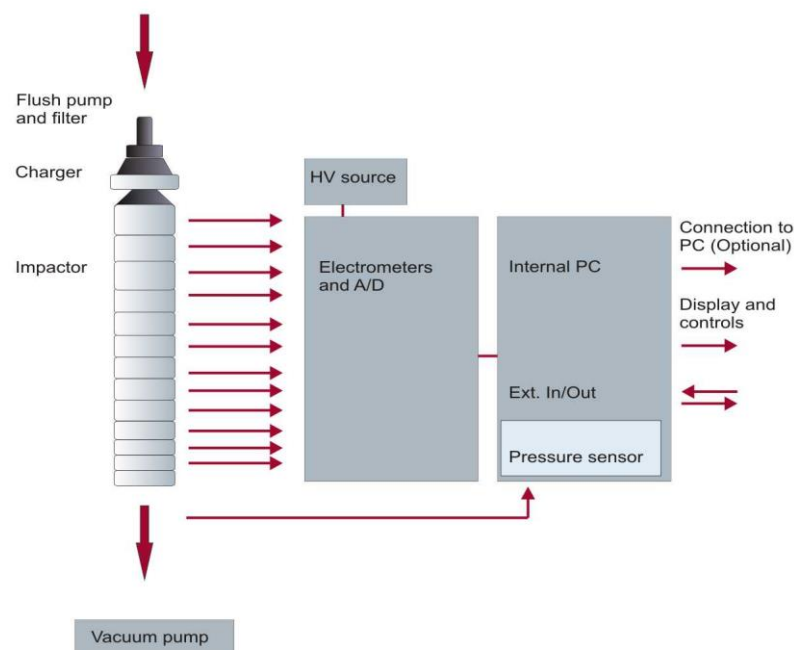
Peenosakeste mõõtmiseks kasutati Dekati ELPI+ (Electrical Low Pressure Impactor) elektrilist madalarõhulist impaktorit. ELPI+ mõõteprintsipi võib jagada kolme põhifaasi:

1. Esmalt laetakse analüsaatorisse sisenevate osakesed koroonalahenduse abil (3,5 kV±1 kV). Seejärel suunatakse laetud osakesed pingele löksu (trap voltage), mis toimib kui väike elektrifilter ning kus eemaldatakse laetud molekulide grupid;
2. Seejärel liiguvad osakesed impaktorsüsteemi, kus need sadestuvad vastavalt oma diameetrile;
3. Sadestumise hetkel kannavad osakesed oma laengud edasi vastavale impaktorplaadile, kus see registreeritakse tundliku elektromeetri poolt ning antud laengud teisendatakse vastavalt pingele osakeste arvkontsentratsiooniks (Joonis 10).

ELPI+ mõõtekambris on tekitatud stabiilne vaakum - 40mbar. Pump imeb 10 liitrit minutis, mille kaudu on võimalik hiljem tulemusi esitada number- või massikontsentratsiooni kuupmeetri kohta. ELPI+ võimaldab mõõta peenosakeste 14 erinevas fraktsioonis (0,01 – 10 µm) reaajas kuni 1 Hz sagedusega (Tabel 2) (ELPI operating principle, 2013).

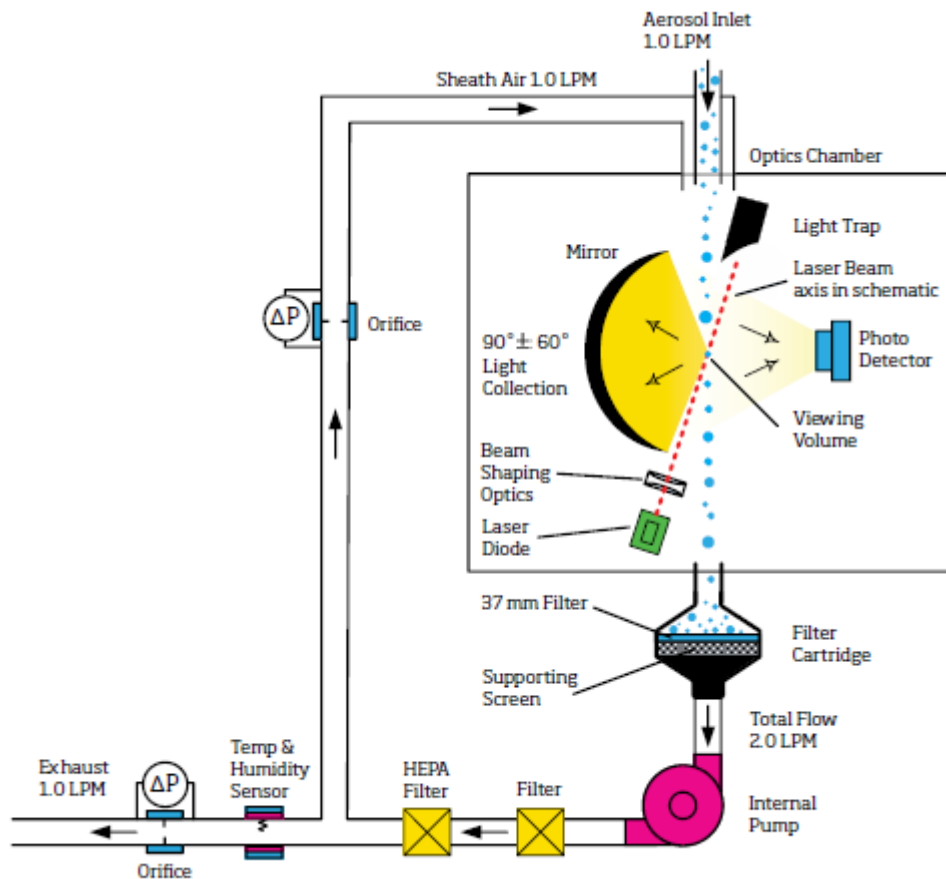
*Tabel 2 ELPI+ mõõtefraktsioonid (ELPI operating principle, 2013).*

Fraktsioon, µm	D50% [µm]
14	6.8
13	4.4
12	2.5
11	1.6
10	1.0
9	0.64
8	0.40
7	0.26
6	0.17
5	0.108
4	0.060
3	0.030
2	0.017
1	0.006



*Joonis 10. ELPI skemaatiline joonis (ELPI operating principle, 2013).*

Lisaks kasutati peenosakeste mõõtmiseks optilist analüsaatorit OPS (Optical Particle Sizer 3330, TSI). Osakesed liiguvad läbi OPS mõõtekambri, konstantsel kiirusel, kus osakesed läbivad laserkiire. Tekitatud valgusimpulss registreeritakse tundlikul valgusdiodil, mis loeb ja arvutab osakeste suuruse vastavalt impulsile (Joonis 11). OPS võimaldab peenosakesi mõõta suurusvahemikus 0,3 – 10  $\mu\text{m}$ . Antud suurusjaotust saab liigitada vastavate protokollide abil 5 - 16 vahemikuks. (Optical Particle Sizer 3330, 2013). Testmõõtmistel kasutatud fraktsioonide jaotus vastas ELPI+ fraktsioonide ülemisele otsale (alates 300 nm).



Joonis 11. OPS tööpõhimõtte skemaatiline joonis (Optical Particle Sizer, 2013).

Sõiduki rehvi ja teekatte temperatuuri mõõtmiseks kasutati Optris CT LT infrapuna andureid (Compact infrared temperature sensor, Optris CT LT). Tegemist on infrapuna sensoriga, mis mõõdab reaalajas, kuni millisekundilise resolutsiooniga valitud pinna temperatuuri. Antud juhul rehvi ja teekatte temperatuuri sekundilise intervalliga. Kuna mõõtmiste ajal satub paratamatult tolmu anduri läätsedele, puhutakse järelhaagises asuva kompressori abil konstantselt suruõhku üle läätsede pinna madalal kiirusel - 1-2 l/min. See tekitab läätsede pinnale õhupadja, mis ei lase tolmul sadestuda ja sellega temperatuuri näitu mõjutada (Optris infrared thermometers, 2013).

### 3 Tulemused

REAL testmõõtmiste käigus koguti andmeid rehvi- ja teekatte temperatuuri, fooniõhu peenosakeste kontsentratsiooni, sõiduki asukoha ja kiiruse ning rehvide, piduriklotside ja teekatte kulumisest tekkivate peenosakeste emissiooni kohta. Tulemustest lahutati peenosakeste taustakontsentratsioonid ning kontsentratsioonipiigid, mis olid põhjustatud mööduvatest sõidukitest või tee kõrval olevatest keskkonnateguritest (tolmav põllumajandustehnika, katteta kõrvalteed jms).

Naast- ja lamellrehvidega teostati testmõõtmised aprillis 2013. a. Suverehvidega teostati testmõõtmised juuni-august 2013. a. Sond paiknes mõõtmistel vasaku (juhipoolse) tagumise rattakoopa juures.

Lisaks hinnati mõõtesondides jämedafraktsiooniliste peenosakeste (PM10) kadu. Selleks teostati paralleelmõõtmised kahe OPS seadmega. Selle tarbeks paigutati ühe OPS analüsaatori mõõtesond vahetult tagaratta taga paikneva proovivõtuotsiku ette ning teise OPS analüsaatoriga mõõdeti tavapärasest mõõtekohast mõõteseadmes paiknevas proovivõtukohas. Antud katses tuvastati, et PM<sub>10</sub> fraktsiooni puhul jääb proovi kaoks mõõtesüsteemi sondis alla 10%. Antud kadudega arvestati eriheidete arvutamisel. Tulevikus võiks teostada peenosakeste erinevate fraktsioonide kadude hindamiseks uued mõõtmised, kasutades selleks aerosooligeneraatorit. Antud meetodi puhul genereeritakse kindla suuruse ja kontsentratsiooniga peenosakesi, mis injekeeritakse proovivõtusondi ning samaaegselt teostatakse peenosakeste proovivõtt proovivõtusüsteemist. Taolise meetodiga saaks efektiivselt hinnata erinevate peenosakeste fraktsioonide kadusid proovivõtusondis.

### 3.1 Erinevate rehvitüüpide PM<sub>10</sub> eriheidet ja peenosakeste emissiooni sõltuvus kiirusest

REAL-i sobivuse hindamiseks püstitatud eesmärkide täitmisel, teostati testmõõtmised. Testmõõtmiste käigus hinnati erinevate rehvitüüpide ning sõiduki kiiruse mõju tekkivate PM<sub>x</sub> emissioonide osas. Katsed naast- ja lamellrehvidega viidi läbi 2013 aprillis (kokku 4 katset), kui talverehvide kasutamine oli Eestis lubatud. Sõiduki tagateljele paigutati samaaegselt naast- ning lamellrehv ning mõõdeti mõlema rehvi mõju samaaegselt. Katsed suverehvidega viidi läbi 2013 aasta suvel (kokku 4 katset). Mõõdetud kontsentratsioonide põhjal on võimalik arvutada uuritava saasteaine hetkeline heitkogus (milligrammi sekundis, mg/s) kui ka uuritava saasteaine eriheidet (milligrammi sõiduki sõidukilomeetri kohta, mg/vkm).

Eriheidet arvutamiseks kasutati alljärgnevat valemeid (Mathissen *et al.*, 2012)

$$E = \sum_t c_{av} \cdot A \cdot v_{sõiduk} \quad \text{Valem 1}$$

$$EF = \frac{E_{Total}}{d} \pm \frac{Stdev}{d} \quad \text{Valem 2}$$

kus:

E on hetkeline heitkogus (mg/s);

EF on eriheidet (mg/vkm);

C<sub>av</sub> on PM<sub>10</sub> massikontsentratsioon, millest on taustakontsentratsioon lahutatud (mg/m<sup>3</sup>);

A on autoalune pindala (10 m<sup>2</sup>);

V<sub>sõiduk</sub> sõiduki kiirus (m/s);

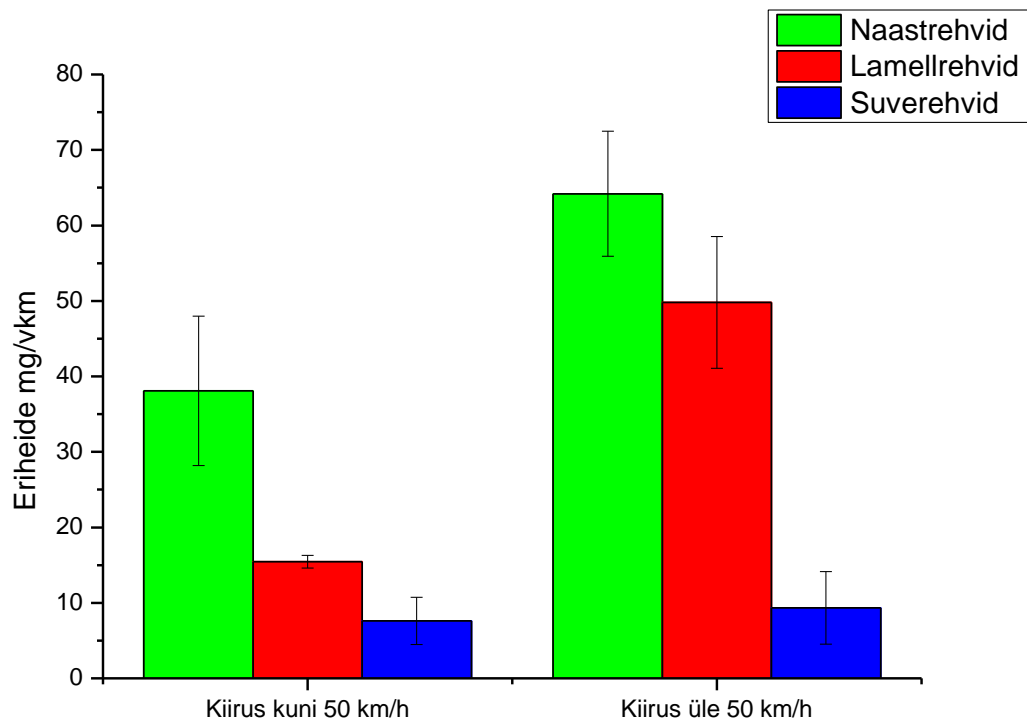
d on läbitud vahemaa

Stdev on hetkelise heitkoguse standardhälve.

Tulemustest (Joonis 12) nähtub, et kõige suurem PM<sub>10</sub> eriheidet on naastrehvide kasutamisel, seda nii alla 50 km/h kui üle 50 km/h kiirustel. Peamine põhjus seisneb selles, et naastrehvide naastud kulutavad kokkupuutel teega intensiivsemalt teekatet ja naastud kuluvad ise ka selle käigus tekitades täiendavaid osakesi. Lamellrehvide kõrge eriheidet on tingitud eelkõige sellest, et lamellrehv on võrreldes suverehviga oluliselt pehmem ning tänu sellele kulub



kiiremini. Rehvi kulumisest pärineva kummi osakaalu hindamiseks PM<sub>x</sub> proovides on üheks võimaluseks teostada filtrite hilisem analüüs ning üheks rehvikulumise markeraineks on pakutud 24MbOT-d (2-(4-Morpholinyl) benzothiazole) ja NCBA-d (N-cyclohexyl-2-benzothiazolamine (Pan *et al.*, 2012). Lisaks on antud perioodil oluline roll teekattelt resuspensiooniga õhku paisataval peenosakeste emissioonil, kuna antud perioodil on teekattel märkimisväärsel hulgal kevad-talvisest perioodist (liiklus + muud allikad) pärit peenosakesi, mis sõidukite poolt uuesti õhku paisatakse. Talvisel perioodil naastrehevde poolt kulutatud teekatte osakesed jäävad tänu kõrgele niiskusele enamasti teekattele ning külmumise käigus seotakse osad teekatte pinnaga. Temperatuuri tõustes sulavad varem sadenenud osakesed teekatte pinnalt lahti ning paisatakse sõiduki rehvide poolt uuesti õhku. Suverehvid on oma olemuselt tugevama koostisega ning suvisel perioodil on teekatted reeglina puhtamad.

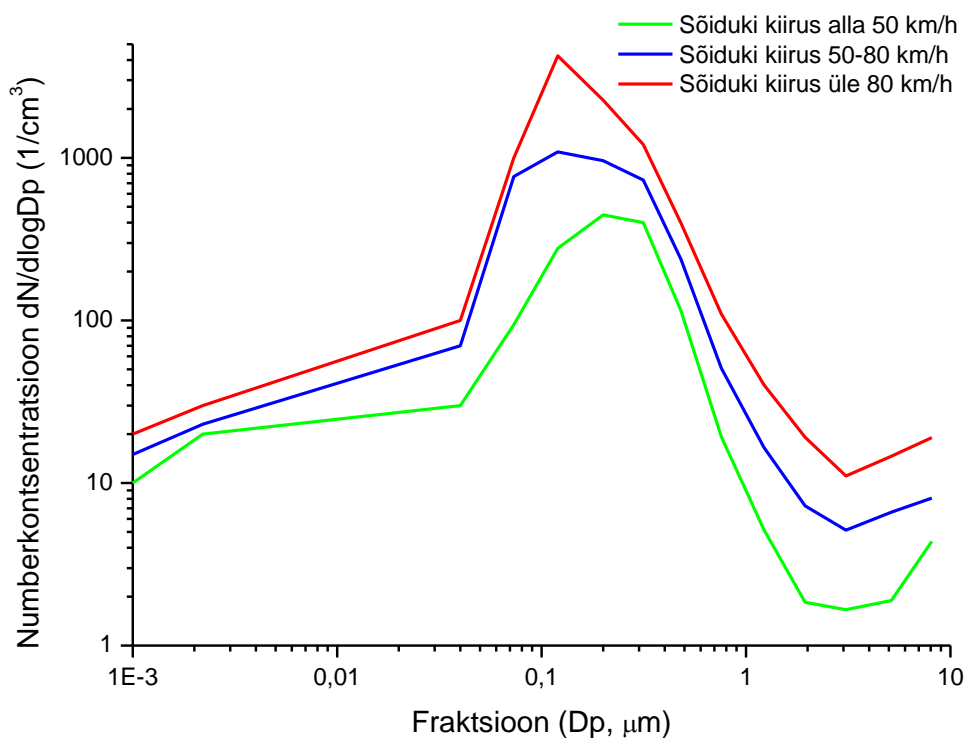


*Joonis 12. Erinevate rehvitüüpide PM<sub>10</sub> eriheited ja sõltuvus kiirusest.*

Lamellrehvide mõnevõrra suurem eriheide, võrreldes suverehvidega, on tingitud lamellrehvi pehmemast koostisest ja sügavamast mustri-  
 strist, mis teega kontakteerudes tekitab teega kontakteerudes tugevama vaakumi ja sellega kaasneva peenosakeste intensiivsema õhkupaiskamise.

REAL süsteemiga mõõdetud eriheitel lamellrehvide puhul on  $49,8 \pm 8,72$  mg/vkm, mis on võrreldavad kirjanduses leiduvate eriheidetega  $26 \pm 19$  mg/vkm (Mathissen *et al.*, 2012) ja  $30 \pm 14$  mg/vkm (Bukowiecki *et al.*, 2010).

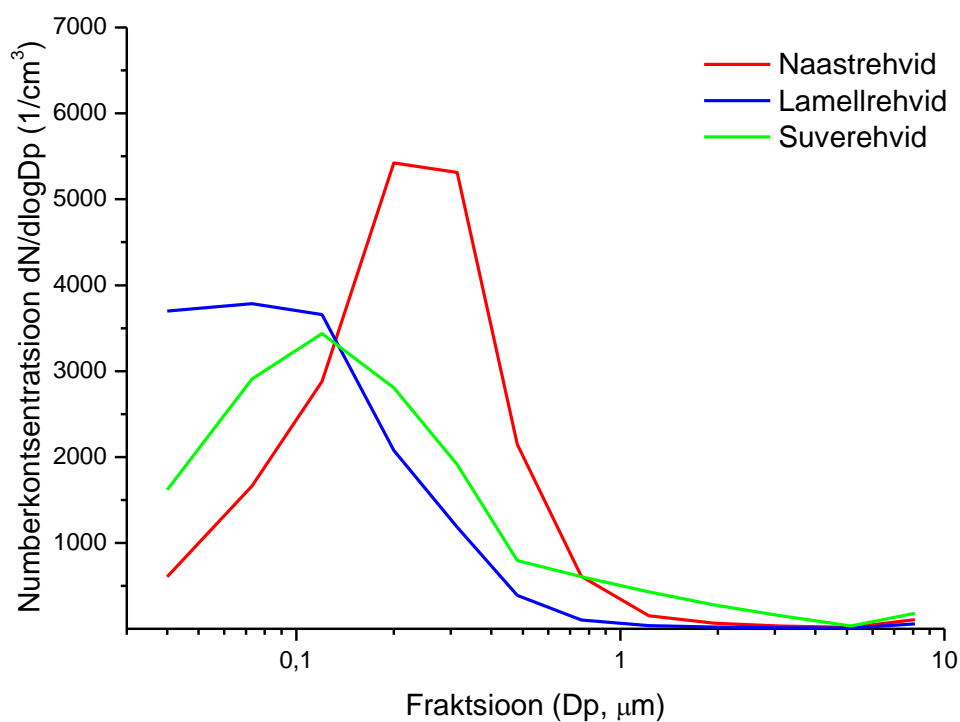
Joonis 13 põhjal nähtub suvrehvidega teostatud katse osakeste arvu sõltuvus sõiduki kiirusest. Seda tendentsi kinnitavad ka teised varasemad uuringud (Pirjola *et al.*, 2010; Mathissen *et al.*, 2012). Enim tekib 0,1 – 0,5  $\mu\text{m}$  suurusega osakesi. Kõrgem peenosakeste emissioon suurematel kiirustel on tingitud rehvi ja tee vahelisest intensiivsemast kontaktist, mis kulutab nii teekatet kui ka rehvi rohkem. Samuti tekitab suurem kiirus tugevama õhu turbulentsi sõiduki alla, mis omakorda tõstab teekattelt rohkem osakesi üles.



Joonis 13. Peenosakeste emissiooni sõltuvus kiirusest (suvrehvidega).

### 3.2 Erinevate rehvitüüpide peenosakeste arvu suurusjaotus

Suurim peenosakeste arvkontsentratsioon tekib väiksemate osakeste fraktsioonis, olles olenevalt kasutatud rehvitüübist mõnevõrra erinev. Naastrehvid tekitavad võrreldes lamell- ja suverehvidega mõnevõrra jämedafraktsioonilisemaid ( $0,5 \mu\text{m}$ ) peenosakesi, samas kui lamell- ja naastrehvide puhul on täheldatav maksimaalne arvkontsentratsioon  $0,1 \mu\text{m}$  juures (Joonis 14). Naastrehvide mõnevõrra erinevat jaotust lamell- ja suverehvist võib mõjutada naastude eripära. Väiksemate osakeste domineerimist peenosakeste emissioonis võib seletada teekatete ja rehvide materjali eripära ning kulumise omadustega. Ühest kindlat seletust, miks just väiksem fraktsioon sõiduki poolt tekitatud peenosakeste emissioonis domineerib pole. Antud aspekt võiks olla järgnevate uuringute eesmärk.



Joonis 14. Erinevate rehvitüüpide peenosakeste suurusjaotus.

## Arutelu

Esialgsete katsed tõestasid REAL-i sobivust teekatte ja sõiduki kuludetailide kulumisest tingitud peenosakeste emissiooni mõõtmiseks. REAL-i eelis võrreldes SNIFFER ja EMMA mõõtesüsteemidega on peamiselt selles, et REAL on kasutatav erinevate sõidukitega ning mõõtesüsteem on varustatud autonoomse elektritoitega, mis omakorda võimaldab kasutada erinevaid mõõteseadmeid. Samaaegselt teekattelt ja sõiduki kuludetailidest pärinevate PMx mõõtmisega on võimalik antud süsteemiga mõõta ka sõiduki heitgaaside koostist reaalsetes sõidutingimustes. Seega on võimalik mõõta reaalsetes sõidutingimustes sõiduki olulisemaid PMx emissioone. REAL võimaldab teostada PMx resuspensiooni mõõtmisi paralleelselt sõiduki mõlema ratta tagant. See omakorda annab võimaluse tulevikus uurida, kas PMx emissioon sõltub proovi võtmise asukohast (tee keskelt või tee äärest) ning kasutada mõõtmiste käigus paralleelselt erinevaid rehvitüüpe. Uuendusena on REAL-is kasutusel sõiduki rehvitemperatuuri ja teekatte temperatuuri reaalajas mõõtmine. Taoline lahendus võimaldab mõõtmiste käigus hinnata temperatuuri olulisust PMx emissioonide tekkimisel. Seni on temperatuuri seos PMx tekkimise osas leidnud kinnitust vaid laboratoorsetes tingimustes teostatud katsete puhul (Dahl *et al.*, 2006). Antud uuringus leiti, et sõiduki kiirus mõjutab otseselt rehvi temperatuuri, kõrgenenud temperatuur mõjutab omakorda lenduvate ühendite (rehvi täite- ja pehmendusmaterjal) emissiooni, mis muu hulgas põhjustab sekundaarsete PMx teket.

Oluline aspekt mida REAL-i puhul peab edasi arendama on PMx kadude ja isokineetilise proovivõtu kontrollsüsteemi väljatöötamine. Isokineetilise proovivõtu tagamiseks paigutatakse proovivõtusondi reaalajas õhukiirust mõõtev anemomeeter, mille kaudu on võimalik pidevalt hinnata kas PMx proovivõtul on isokineetiliselt tagatud. Proovivõtusondis liikuva õhu kiirust on võimalik reguleerida proovivõtusüsteemis asuvate ventilaatorite kaudu.

Testmõõtmiste käigus teostatud mõõtmistel leiti, et PM10 kadu kogu mõõtesüsteemis on alla 10%. Antud juhul teostati kadude mõõtmine kahe OPS-i reaalsetes sõidutingimustes saadud mõõtetulemuste võrdlemisel. Thorpe *et al.* (2008) on samuti viidanud, et taoliste mõõtmiste puhul jäävad jämedamate PMx fraktsioonide kaod enamasti alla 10%. Siiski tuleb pikkade proovivõtusondide olemasolu korral arvestada PMx kadudega mõõtesüsteemis. Seega võiks kadude hindamisel kasutada lisaks ka meetodit, mille käigus injekteeritakse proovivõtusondi kindla fraktsiooni ja kontsentratsiooniga peenosakesi ning mõõdetakse samaaegselt PMx kontsentratsioone proovivõtusondist. Antud meetodi eeliseks on asjaolu, et proovivõtusondi

sisenevate osakeste diameeter ja kontsentratsioon on tekitatud kontrollitud tingimustes. Samas tuleb ka taolise meetodi kasutamise korral arvestada fooniõhus sisalduvate peenosakestega. Taolise meetodi kasutamise sobivus reaalsetes sõidutingimustes vajab katsetamist ning edasist uurimist.

REAL-i võiks tulevikus varustada teekatte niiskuse mõõtmise anduritega, kuna niiskus võib mõjutada peenosakeste teket ja lendumist (Bukowiecki *et al.*, 2010). Seni on takistanud niiskuseanduri paigaldamist sobiva anduri puudumine, kuna töö autoril pole õnnestunud tuvastada sobivat andurit, mis oleks võimeline teostama niiskuse mõõtmist teekatte pinnalt reaalajas ning uuritava pinnaga kontakti omamata.

Mõõtetulemuste võrreldavuse teeb mõnevõrra keeruliseks ka asjaolu, et puudub ühtne standard mõõdetavate PM<sub>x</sub> suurusjaotuse ja kasutatava mõõtemetodi osas. Paljud sarnased mõõtmised on teostatud optiliste analüsaatoritega, mille PM<sub>x</sub> suurusjaotuse alumine ots on 300 nm kandis, samas kui näiteks ELPI ja SMPS analüsaatorid võimaldavad mõõta oluliselt peenemaid peenosakeste fraktsioone. Standardmeetodi olemasolul saaks taoliste erinevuste tekkimist vältida.

Antud teema on kindlasti jätkuvalt aktuaalne kuna majanduse elavnemisega kasutavad inimesed järjest rohkem transpordivahendeid ning isegi kui sõidukite heitgaaside emissioonid on regulatsioonide kaudu piiratud, siis teekattelt resuspensiooni käigus emiteeritavate saasteainete heitkogused on valdavalt reguleerimata. Osakesed pole ainult kahjulikud füüsiliselt, vaid enamasti on peenosakesed teiste kahjulike ühendite kandjad (raskmetallid, PAH-id). Seega tuleks edasistes uuringutes keskenduda ka peenosakeste erinevate fraktsioonide keemilisele analüüsile.

Uurimuses selgus, et sõidukiga liigeldes tekib enim eriti peeneid osakesi, mille aerodünaamiline diameeter on vahemikus 100 kuni 500 nanomeetrit. Erinevates tervisemõju uuringutes (Delfino *et al.*, 2005, WHO, 2005) on tõdetud, et enim mõjutavad inimese tervist just osakeste peenemad fraktsioonid, kuna väiksemad osakesed on võimelised tungima sügavale kopsu alveoolidesse ning nende kaudu võivad osakesed kanduda otse inimese verre. Sellest tulenevalt peaks pöörama enim tähelepanu just osakeste peenema fraktsiooni eriheidete uurimisele.

Vaja on täpsustada rehvi kulumisest pärinevate PM<sub>x</sub> osakaal. Üheks võimaluseks on seda teostada markerühendite mõõtmise kaudu. Rehvi kulumisest pärineva kummi osakaalu hindamiseks PM<sub>x</sub> proovides on üheks võimaluseks teostada filtrite hilisem analüüs ning

ühiks rehvikulumise markeraineks on pakutud 24MbOT-d (2-(4-Morpholinyyl) benzothiazole) ja NCBA-d (N-cyclohexyl-2-benzothiazolamine) (Pan *et al.*, 2012).

Teekatte tüüp ja seisukord vajab enne igat mõõtmist põhjalikku uurimist ning kirjeldamist, kuna teekatte tüüp ja seisukord võivad mõjutada PMx teket (Blomqvist *et al.*, 2013).

Tulemustest selgub, et kiiremini liikuv sõiduk tekitab rohkem nõ mitte-toruotsa heiteid. Sõiduki kasutatavast rehvitüübist sõltub ka peenosakeste eriheited, talverehvid tekitavad rohkem peenosakesi. Antud tulemused on kooskõlas varasemate uuringutega (Mathissen *et al.*, 2012, Pirjola *et al.*, 2009, Hussein *et al.*, 2008), mis omakorda tõestab REAL-i sobivust taoliste mõõtmiste läbiviimisel.

## Kokkuvõtte

REAL testmõõtmiste käigus koguti andmeid rehvi- ja teekatte temperatuuri, fooniõhu peenosakeste kontsentratsiooni, sõiduki asukoha ja kiiruse ning rehvide, piduriklotside ja teekatte kulumisest tekkivate peenosakeste emissiooni kohta. Tulemustest eemaldati peenosakeste taustakontsentratsioonid ning kontsentratsioonipiigid, mis olid põhjustatud mööduvatest sõidukitest või teekõrval olevatest keskkonnateguritest (tolmav põllumajandustehnika, katteta kõrvalteed jms).

Naast- ja lamellrehvidega teostati testmõõtmised aprillis 2013. a. Suverehvidega teostati testmõõtmised juuni-august 2013. a.

Testmõõtmiste käigus tuvastati, et  $PM_{10}$  fraktsiooni puhul jääb proovi kaoks mõõtesüsteemi sondis alla 10%. Antud kadudega arvestati eriheidete arvutamisel. Tulevikus võiks teostada peenosakeste erinevate fraktsioonide kadude hindamiseks uued mõõtmised, kasutades selleks aerosooligeneraatorit. Antud meetodi puhul genereeritakse kindla suuruse ja kontsentratsiooniga peenosakesi, mis injekteeritakse proovivõtusondi ning samaaegselt teostatakse peenosakeste proovivõtt proovivõtusüsteemist. Taolise meetodiga saaks efektiivselt hinnata erinevate peenosakeste fraktsioonide kadusid proovivõtusondis.

Isokineetlise proovivõtu pidevaks jälgimiseks oleks vajalik paigutada mõõtesondi statsionaarne anemomeeter.

Antud uurimuses saadud tulemuste põhjal võib väita, et välja töötatud mõõteseadme REAL sobib sõiduki rehvide, piduriklotside ja teekatte kulumisest tekkivate peenosakeste emissiooni mõõtmiseks. Katsete käigus saadud tulemused on võrreldavad kirjanduses leiduvate ja sarnaste liikuvlaboritega mõõdetud tulemustega.

Mõõteseadme REAL testmõõtmiste käigus selgus, et sellega on võimalik adekvaatselt hinnata  $PM_x$  emissiooni kasutades selleks erinevaid rehve. Testmõõtmiste käigus tuvastati oluline seos sõiduki kiiruse, rehvitüübi ja peenosakeste emissiooni vahel, mis on kooskõlas varasemate uuringutega (Mathissen *et al.*, 2012, Pirjola *et al.*, 2009, Hussein *et al.*, 2008). Tulemustest (Joonis 12) nähtub, et kõige suurem  $PM_{10}$  eriheide on naastrehvide kasutamisel, seda nii alla 50 km/h kui üle 50 km/h kiirustel. Peamine põhjus seisneb selles, et naastrehvide naastud kulutavad kokkupuutel teega intensiivsemalt teekatet ja naastud kuluvad ise ka selle käigus tekitades täiendavaid osakesi. Lamellrehvide kõrge eriheide on tingitud eelkõige sellest, et lamellrehv on võrreldes suverehviga oluliselt pehmem ning tänu sellele kulub

kiiremini. Rehvi kulumisest pärineva kummi osakaalu hindamiseks PMx proovides on üheks võimaluseks teostada filtrite hilisem analüüs ning üheks rehvikulumise markeraineks on pakutud 24MbOT-d (2-(4-Morpholinyl) benzothiazole) ja NCBA-d (N-cyclohexyl-2-benzothiazolamine) (Pan *et al.*, 2012).

Töös püstitatud eesmärgid said täidetud. Võib väita, et mõteseadmega REAL on võimalik mõõta liikluses tekkinud peenosakeste emissiooni ning seda kasutada tulevaste uuringute läbiviimisel. REAL-i võiks tulevikus paigldada võimaliku teekatte niiskuse mõõtmise aparatuuri, et uurida kas ja kuidas mõjutab teekatte niiskus peenosakeste teket. Samuti tuleks edasi arendada võimalusi kuidas peenosakesi täpsemalt mõõta ja keskenduda järgnevates uuringutes just eriti peentele osakestele ning nende võimalikule keemilisele koostisele. Lisaks võiks uurida peenosakeste emissiooni katteta teedel ning üldiselt keskenduda Eestis olevatele teekatte tüüpidele ja nende potentsiaalsetele mõjudele peenosakeste emissioonile.

Antud uuringu tulemusi esitleti Euroopa Aerosooli konverentsil 2013 (EAC 2013) Prahas.



## Summary

During the REAL tests data for tire and road temperature, background PM<sub>x</sub> concentrations, vehicle location, vehicle speed and non-exhaust emissions were measured. Background PM<sub>x</sub> concentrations and concentration peaks, caused from other nearby vehicles and roadside effects (dust from agricultural vehicles, unpaved roads, etc.) were removed.

The studies for studded and non-studded (friction) tires were carried out in 2013 April. Summer tire studies were carried out in June and August 2013.

The studies confirmed that the loss for PM<sub>10</sub> concentration in the sampling line was fewer than 10%. The losses were taken into account when calculating the emission factors. In the future more accurate loss studies should be made using an aerosol generator. In this method aerosols of certain size and concentration are generated and injected into the sampling line at the same time as measurements are done. With this method PM<sub>x</sub> emission fraction losses can be more effectively measured.

For isokinetic monitoring a stationary anemometer should be installed in the sampling line.

The results from this study indicate that the constructed mobile PM<sub>x</sub> laboratory REAL can be used for non-exhaust studies from road traffic. REAL test results are comparable with results in literature and studies with similar mobile PM<sub>x</sub> laboratories.

Mobile PM<sub>x</sub> laboratory REAL showed that it can adequately evaluate PM<sub>x</sub> emissions from different tire types. REAL tests established a strong relationship between vehicle speed, tire type and non-exhaust emissions. Results (Joonis 12) show that emission factors for PM<sub>10</sub> are highest with studded tires for speeds under and over 50 km/h. Main reason for this is that the studs on studded tires expend more intensely road surface and studs degrade itself generating more PM<sub>x</sub> emissions. Non-studded tire high emission factor is caused foremost from a softer rubber content compared to the summer tire and therefore the non-studded tire degrades faster. For evaluating the rubber content in PM<sub>x</sub> emissions from tiers is possible to analyse the filters for marker compounds like 24MbOT (2-(4-Morpholinyl) benzothiazole) and NCBA (N-cyclohexyl-2-benzothiazolamine) (Pan *et al.*, 2012).

Objectives hypothesized in this study were achieved. It can be stated that it is possible to measure non-exhaust emissions with the mobile PM<sub>x</sub> laboratory REAL and it can be used for future studies. Road moisture measuring device should be installed on REAL to studie how does road surface wetness affect non-exhaust emissions. Also to develop more accurate ways

to measure fine particles and concentrate on ultrafine particles and their chemical composition. Also PM<sub>x</sub> emissions from unpaved should be studied and concentrate more on road types used in Estonia and their potential effect on non-exhaust emissions.

Results of this study were presented in the European Aerosol Conference 2013 (EAC 2013) Prague.

## Tänuõnad

Töö autor sooviks tänada oma juhendajat Marek Maasikmetsa, kes nõuannetega oli suureks abiks töö koostamisel.

Eesti Keskkonnauuringute Keskust, mis varustas liikuvlabori vastavate seadmetega ning aitas liikuvlabori kontseptsiooni väljatöötamisel.

## Kirjandus

**Blomqvist, G., Gustafsson, M., Lundberg, T.** 2013. Road surface dust load is dependent on road surface macro texture. In: Digital Handbook EAC 2013, Prague: European Aerosol Conference 2013, 2013.

**Bukowiecki, N., Lienemann, P., Hill, M., Furger, M., Richard, A., Amato, F., Prévot, A.S.H., Baltensperger, U., Buchmann, B., Gehrig, R.** 2010. PM10 emission factors for non-exhaust particles generated by road traffic in an urban street canyon and along a freeway in Switzerland. Atmospheric Environment 40. 2330-2340 lk.

**Dahl, A., Gharibi, A., Swietlicki, E., Gudmundsson, A., Bohgard, M., Ljungman, A., Blomqvist, G., Gustafsson, M.** 2006. Traffic-generated emissions of ultrafine particles from pavement-tyre interface. Atmospheric Environment 40. 1314-1323 lk.

**Delfino, J. R., Sioutas, C., Malik, S.** 2005. Potential role of ultrafine particles in associations between airborne particle mass and cardiovascular health. Environmental Health Perspectives 113. 934-946 lk.

**ECC.** Winter tiers within Europe, in Iceland and Norway. 2010. [http://www.konsumenteuropa.se/PageFiles/141596/Vinterd%C3%A4ck\\_inom\\_EU.pdf](http://www.konsumenteuropa.se/PageFiles/141596/Vinterd%C3%A4ck_inom_EU.pdf) (28.08.2013)

**ELPI Operating Principle.** 2013. <http://dekati.com/cms/elpiplus/operation> (14.08.2013)

**Etyemezian, V., Kuhns, H., Gillies, J., Green, M., Pitchford, M., Watson, J.** 2003 Vehicle-Based Road Dust Emission Measurement: I. Methods and Calibration. Atmospheric Environment 37. 4559-4571 lk.

**European Environment Agency.** Air quality in Europa - 2012 report. 2012. Kopenhaagen.

**Forsberg, B., Hansson, HC., Johansson, C., Areskoug, H., Persson, K., Jarvholm, B.** 2005. Comparative health impact assessment of local and regional particulate air pollutants in Scandinavia. *Ambio*. 34. lk. 11–19.

**Gustafsson, M., Blomqvist, G., Gudmundsson, A., Dahl, A., Swietlicki, E., Bohgard, M., Lindbom, J., Ljungman, A.** 2008. Properties and toxicological effects of particles from the interaction between tyres, road pavement and winter traction material. *Science of the Total Environment* 393. 226-240 lk.

**Hussein, T., Johansson, C., Karlsson, H., Hansson, H.-C.** 2008. Factors Affecting Non-Tailpipe Aerosol Particle Emissions from Paved Roads: On-Road Measurements in Stockholm, Sweden. *Atmospheric Environment* 42. 688-702 lk.

**Maasikmets, M.; Teinmaa, E.; Arumäe, T.; Kimmel, V.** (2013). Non-exhaust PM<sub>x</sub> emissions from road traffic. In: *Digital Handbook EAC 2013*, Prague: European Aerosol Conference 2013, 2013.

**Mathissen, M., Scheer, V., Kirchner, U., Vogt, R., Benter, T.** 2012. Non-exhaust PM emission measurements of a light duty vehicle with a mobile trailer. *Atmospheric Environment* 59. 232-242 lk.

**Norman, M., Johansson, C.** 2006. Studies of some measures to reduce road dust emissions from paved roads in Scandinavia. *Atmospheric Environment* 40. 6154-6164 lk.

**Omstedt, G., Bringfelt, B., Johansson, C.** 2005. A model for vehicle-induced non-tailpipe emissions of particles along Swedish roads. *Atmospheric Environment*. 39. lk. 6088–6097.

**Optical Particle Sizer 3330.** 2013. <http://www.tsi.com/Optical-Particle-Sizer-3330/>  
(14.08.2013)

**Optris infrared thermometers.** 2013 <http://pdf.directindustry.com/pdf/optris/ctfast/27292-271455.html> - open (14.08.2013)

**Ostro, B., Prüss-Üstün, A., Cambell-Lendrum, D., Corvalan, C., Woodward, A.** 2004  
Out-door air pollution Assessing the environmental burden of disease at national and local  
levels, Environmental Burden of Disease Series 5, 54 lk.

**Paapsi, K.** Teekattelt eralduvate peenosakeste kontsentratsiooni määramine. 2011. Tartu.

**Pan, S., Sun, Y., Zhang, Gan., Li, Jun., Xie, Q., Chakraborty, P.** Assessment of 2-(4-morpholinyl) benzothiazole (24MoBT) and N-cyclohexyl-2-benzothiazolamine (NCBA) as traffic tracers in metropolitan cities of China and India, Atmospheric Environment, Volume 56, September 2012, Pages 246-249, ISSN 1352-2310,  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.03.029>.

**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 lk.

**Pirjola, L., Johansson, C., Kupiainen, K., Stojiljkovic, A., Karlsson, H., Hussein, T.** 2010. Road Dust Emissions from Paved Roads Measured Using Different Mobile Systems. Air & Waste Management Association 60. 1422-1433 lk.

**Pope III, C.A., Burnett, R.T., Thun, M.J., Calle, E.E., Krewski, D., Ito, K., Thurnston, G.D.** 2002. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. American Medical Association 287. 1132-1140 lk.

**RT I, 16.06.2011, 8.** Mootorsõiduki ja haagise tehnonõuded ning nõuded varustusele. 2011.  
<https://www.riigiteataja.ee/akt/116062011008> (25.08.13)

**RT I, 12.07.2011, 3.** Välisõhu saastatuse taseme piir- ja sihtväärtused, saasteaine sisalduse muud piirnormid ning nende saavutamise tähtjad. 2011.  
<https://www.riigiteataja.ee/akt/112072011003> (25.08.13)

**Saare, K., Maasikmets, M., Teinema, E.** Välisõhu seire linnades 2012. Riiklik keskkonnaseire alamprogramm. 2013. Tallinn.

**Thorpe, A., Harrison, R.M.** 2008. Sources and properties of non-exhaust particulate matter from road traffic: A review. Science of the total Environment. 400. lk. 270-282

**WHO.** Air Quality Guidelines Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide, Global Update 2005, Copenhagen, WHO Regional Office for Europe, 2006, 484 lk.

**WHO.** Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide, World Health Organization, Bonn, 2003, 94 lk.