



3.3.2006

Nuuskijaprojekti
laatija Pasi Perhoniemi
täydentäjä Liisa Pirjola
kaaviokuva Tero Lähde

Dieselpartikkelien mittauskampanja MANin moottorilaboratoriossa Nürnbergissä Saksassa 6.-17.2.2006.

Mittauskampanja on Tekesin rahoittamaan LIPIKA hankkeeseen liittyvä yhteistyöprojekti MANin kuorma-autotehtaan moottorilaboratorion, Heidelbergin Max Planck Instituutin (MPI), Tampereen teknillisen yliopiston (TTY), Työterveyslaitoksen (TTL) ja Stadian välillä. Mittauskampanjan idea oli lähtöisin Nuuskijaprojektin vetäjän dosentti Liisa Pirjolan ja Max Planck Instituutin professori Franck Arnoldin yhteistyöstä ja se pohjautui keväällä 2005 Hyytiälässä tehtyihin esimitauksiin diesel-päästöjen rikkihappopitoisuuksista ja niiden vaikutuksista pakokaasujen pienhiukkasten muodostumiseen. Käsikirjoitus näistä esimitauksista saatiin valmiiksi tämän projektin aikana Heidelbergissa ja se lähetettiin julkaistavaksi Atmospheric Environment Journal:iin.

Nyt tehdyn mittauskampanjan suunnittelusta ja toteutuksesta vastasivat MANin osalta tutkimuspäällikkö Dieter Rothe (moottoritekniikka, mittauspaikka, moottoriparametrien hallinta ja mittaus), Max Planck Instituutin osalta professori Franck Arnold ja tutkija Tanja Schuck (mittausjärjestelyt, rikkihapon mittaus), TTY:n osalta professori Jorma Keskinen ja tutkija Topi Rönkkö (mittausjärjestelyt, pienhiukkasten näytteenotto ja jakauman mittaus), Työterveyslaitoksen osalta tutkija Tero Lähde (pienhiukkasten sähkövarausten ja kokonaispitoisuuden mittaus) ja Stadian osalta dosentti Liisa Pirjola (mittausjärjestelyt, mallinnus, koordinointi). Lisäksi mittauksiin osallistui MPI:sta Andreas Weller ja Ralf XX, Stadialta projekti-insinööri Pasi Perhoniemi (mittausjärjestelyt; pienhiukkasten, näytteen lämpötilan ja laimennuksen mittaus, laitteiston kuljetus mittauspaikalle ja takaisin) sekä MANilta moottoritekniikko. Nuuskija-auton tehtävä tässä mittauksessa oli mittalaitteiden kuljetus mittauspaikalle, tiettyjen autossa olevien mittalaitteiden käyttö laboratoriossa, sekä auton toiminnan esittely mittauksissa mukana olleille henkilöille mahdollisesti myöhemmin toteutettavia jahtausmittauksia ajatellen.

MANin Nürnbergin tehdas, jonka moottorilaboratorion yhdessä mittausolussa kampanja toteutettiin, on keskittynyt pelkästään moottorien valmistukseen. Tehtaalla on mm. oma valimo osien valmistukseen. Moottorilaboratorion koosta kertoo jotain se, että tehomittauspenkkejä on 100 kpl. Osa mittauspenkeistä on tuotekehityksen sekä tutkimuksen käytössä, osa tarkoitettu erikoisempien moottorien (esim. laivamoottorien) säätämiseen. Tutkimuksen ja tuotekehityksen käytössä on mm. yksisylinterisiä tutkimusmoottoreita esimerkiksi polttoainesuuttimien kehittämiseen. Myös pakokaasujen jälkikäsitteilylaitteiden kehitys on voimakasta ja juuri tässä osuudessa on tutkimuspäällikkö Rothella iso osuus. Tätä tutkimusta on vielä auttamassa laajat laboratoriotilat jälkikäsitteilylaitteiden ominaisuuksien tutkimiseksi mm. kemiallisella analyysillä.

Dieselläkäyttöisten moottoreiden tuotekehityksen lisäksi MANilla tutkitaan ja kehitetään vaihtoehtoisia polttoaineita käyttäviä moottoreita. Näistä maakaasumoottoreiden (CNG (Compressed Natural Gas ja LNG (Liquid Natural Gas)) tuotekehitys on tehtaalla voimakasta ja tuotannossa jo pidemmän aikaa ollut. Tästä esimerkkinä vaikka vuoden vaihteessa Helsingissä käyttöönotetut parikymmentä uutta MANin valmistamaa maakaasubussia. Ehdottomasti mielekiintoisin kaikista laboratorioista oli kuitenkin omassa rakennuksessa toimiva kahden mittausolun kokoinen vetymoottoreiden tuotekehitysosasto. Toisessa huoneessa oli vapaastihengittävä imusarjasuihkutteinen kuusisylinterinen koemoottori, joka toimi yhden ilmasuhteella ja sen tehoksi ilmoitettiin 150 kW kierrosnopeudella 2000 1/min. Moottoria oltiin juuri laittamassa käymään, mutta jostain syystä johtuen käynnistyminen tuntui olevan vaikeaa. Toisessa huoneessa oli suorasuihkutteinen turboahdettu kuusisylinterinen vetymoottori, jonka ilmakertoimen kerrottiin olevan kaksi. Tässä protomoottorissa oli suunnitteluongelmia suihkutussuuttimien kanssa, joten se ei ollut juuri käyntikuntoisena. Molemmat moottorit olivat bussimoottoreita ja ne olivat kyljelleen asennettavaa eli mahurimallia. Jos olen ymmärtänyt oikein, tällä hetkellä pitäisi olla kaksi moottoria koekäytössä jollain lentokentällä terminaalibusseissa ja turbomalli pitäisi olla käytössä kenttäkokeissa (ei lentokentällä?) 1,5 vuoden päästä.

Käyntiosoite:
Stadia
Helsingin AMK
Autolaboratorio /Nuuskijaprojekti
Kalevankatu 43

Postiosoite:
PL 4021
00099 HELSINGIN KAUPUNKI

Puhelin:
+ 358 9 310 81395
+ 358 40 5313095
+ 358 50 3439591

Telefax:
+ 358 9 310 83500



Mittauskamppanajassa mitattu turboahdettu raskaan kaluston moottori oli tyyppimerkinnältään MAN D2066 LF31 ja se oli varustettu common rail -ruiskutuksella sekä Euro 4 normin pakokaasupäästö määräykset täyttävällä moottorinohjauksella. Suoritusarvot olivat 2100 Nm/ 1100 1/min ja 324 kW/ 1900 1/min. Moottori oli kytketty vesijarruun ja tehtaan puolesta moottorista oli mitattavissa 180 eri mittaparametriä tarvittaessa jopa 100 Hz:n taajuudella. Tällöin tosin tallennettu datamäärä kasvaa jo valtavaksi viikon mittaisessa kamppanajassa, joten sitä tallennustaajuutta ei käytetty. Nuuskijassakin käytettyä datamäärää hillitsevää 1 Hz:n tallennustaajuutta moottoritietojen tallentamiseen käytettiin vain viimeisessä mittauspisteessä, muuten tallennettiin vain satunnaisia pisteitä eri kuormilta (30 sekunnin mittauskeskiarvoja), mikä mittauksen tulosten tulkinnan kannalta ei ollut paras mahdollinen vaihtoehto. Näin, koska Rothen mielestä datamäärä olisi ollut näinkin liian suuri. Tosin oletuksena oli, että kun mitattiin staattisia kuormapisteitä, ei parametrien pitäisi muuttua mittauksen aikana kuin tietyissä rajoissa, joka olisi nähtävissä viimeisestä mittauksesta.

Mittalaitteet sekä mittajat (Rönkkö, Lähde ja Perhoniemi) siirtyivät Nuuskija-autolla Suomesta Saksaan Hangan ja Rostockin välillä kulkevalla Superfast IX -laivalla sunnuntaina 5.2. Tämä tarkoitti sitä, että TTY:n TTL:n ja Stadian mittalaitteet olivat jo edellisen viikon aikana pakattu Nuuskijan kyytiin. Juurikaan enempää ei Nuuskijalla voida tavaraa kuljettaa, koska kantavuus ja tilat tulee vastaan (vrt. kuva). Peräkärryn avulla voidaan tätäkin asiaa korjata, mutta isompi kärry (yli 750 kg) vaatii jo kuljettajalta vähintään C1E-luokan ajokortin (joka Perhoniemeltä vielä puuttuu), koska Nuuskija-auto on N2-luokan kevytkuorma-autoksi rekisteröity. Rostockista siirtyminen Nürnbergiin tapahtui maanantain 6.2. aikana siten, että tavarat saatiin vielä purettua kyydistä moottorilaboratorion tiloihin ennen siirtymistä hotellille. Nuuskijan parkkeerausongelma myös ratkesi loistavasti, kun se parkkeerattiin suljetulle tehdasalueelle ja liikkuminen tehtaan ja hotellin välillä tehtiin metrolla. Välimatkaa hotelliin ja tehtaan välillä oli noin kolme kilometriä.



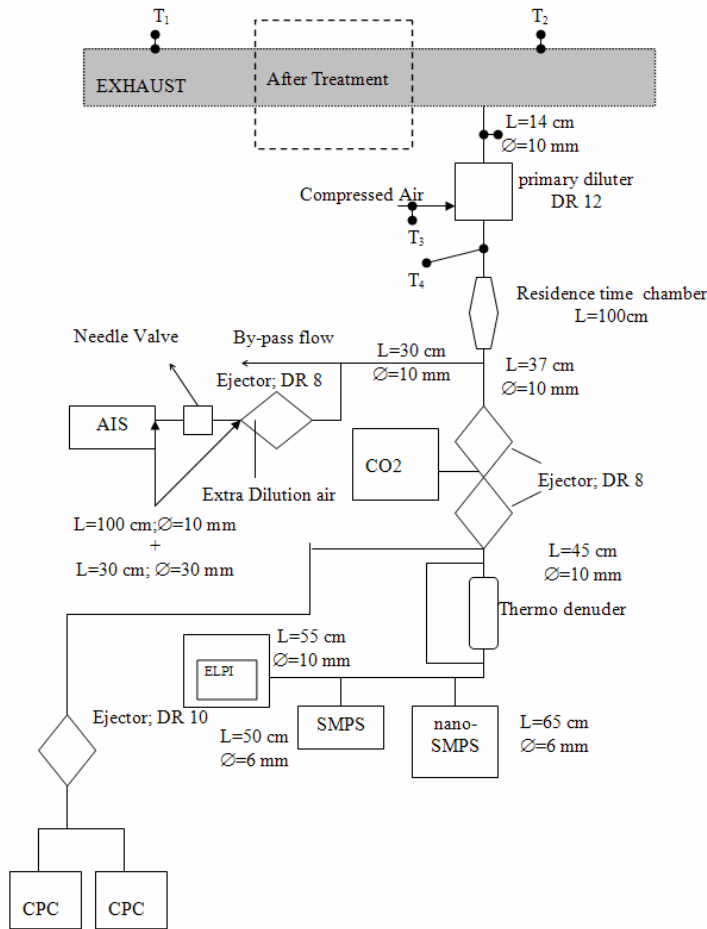
Mittauskamppanajaa varten asennettiin tiistain 7.2. ja perjantain 10.2. välisenä aikana oheisen kaaviokuvan mukainen mittalaittevarustus, joka sisälsi kaikkiaan viisi laimenninta, viipymäaikakammion, hiukkaslukumäärän ja -jakauman mittaamiseksi kaksi TTL:n CPC:tä (Condensation Particle Counter), yhden TTY:n SMPS:n (Scanning Mobility Particle Spectrometer), yhden TTY:n nano SMPS:n ja ELPIn (Electronic Low Pressure Impactor, joka on Stadian, mutta siinä käytettiin TTY:n impaktoria, josta tunnettiin kokojakaumien tiheydet), sähkövarausten mittaamiseksi TTL:n AIS:n (Air Ion Spectrometer), TTY:n termodenuuderin haihtuvien hiukkasten hävittämiseksi osassa mittauksia ja Stadian CO₂-analysointilaitteineen laimennussuhteen laskemiseksi. Laimennussuhde laskettiin MANin tehtaan miittaaman raa'an pakokaasun CO₂:n ja laimennetun pakokaasun CO₂:n suhteesta ja se säädettiin halutuksi (1:96) primäärilaimentimen laimennusilman massavirtaa muuttamalla. Lisäksi mitattiin lämpötiloja pakokaasusta heti ahtimen jälkeen ja 100 cm näytteenottopisteen jälkeen, laimennusilman lämpötila, ensimmäisen kerran laimennetun näytteen lämpötila sekä termodenuuderin sisälämpötila käyttäen Stadian materiaalitekniikan laboratoriolta lainattua National Instruments:n mittakorttia. Laitteiden tarkastukset ja säätäminen kesken mittauksen oli hieman vaikeaa ahtaiden takia, mutta oli kuitenkin pienellä taiteilulla mahdollista (katso kuva laitteiden sijoituksesta). Lisäksi kesken kuormapisteiden mittauksen moottorihuoneeseen meno oli työturvallisuussyistä kiellettyä.

Käyntiosoite:
Stadia
Helsingin AMK
Autolaboratorio /Nuuskijaprojekti
Kalevankatu 43

Postiosoite:
PL 4021
00099 HELSINGIN KAUPUNKI

Puhelin:
+ 358 9 310 81395
+ 358 40 5313095
+ 358 50 3439591

Telefax:
+ 358 9 310 83500



Heidelbergin ryhmä kytki oman rikkihaponmittauslaitteistonsa omaan haaraan samalle kohtaan pakoputkea kuin missä muun tutkimusryhmän laitteet ottivat näytteen. Lisäksi samalle kohtaan liitettiin tehtaan oma laite keräämään näytettä hiukkasista suodattinelementille myöhempää kemiallista analysointia varten.

Mittauksia varten oli päätetty seuraavan luettelon mukainen mittaussykli, jossa käytettiin ESC (European Stationary Cycle) standardin mukaisia mittauspisteitä. Perusteena tälle oli se, että samaa sykliä oli käytetty TTY:n aikaisemmin yhdessä VTT:n kanssa tekemissä mittauksissa, jolloin tästä mittauskamppanjasta saatavat tulokset ovat vertailukelpoisia aikaisempien mittausten kanssa. Ennen mittaussykliä tehtiin lämmityskäyttö, joka jakautui tarvittaessa kahteen osaan. Moottorin ollessa kylmä ajettiin sitä ensin noin 10 minuuttia 25% kuormalla, kunnes moottoriöljyn lämpötila saavutti +50 °C (moottoritehtaan omat lämmityskäyttö). Tämän jälkeen ajettiin moottoria puoli tuntia ESC pisteessä 12 (75% kuorma). Jos moottoriöljyn lämpötila oli aluksi yli +50 °C, ajettiin vain jälkimmäinen piste lämmittelyksi.

	Mittauspisteet	Kuorma %	1/min	Vääntö Nm	Ajoaika h	Ahto bar, mitattu	T öljy max °C, mitattu
1	ESC 11	25	1800	426	0,5	0,67	92,6
2	ESC 3	50	1500	979	0,5	1,05	96,9
3	ESC 10	100	1800	1677	1,0	2,4	116,3
4	ESC 12	75	1800	1287	0,5	1,9	108,5

Mittaus pyrittiin aina toistamaan samalla tavalla, jotta mittauksissa olisi vähemmän muuttujia. Lämmityskäyttöä ja mittaussuodatinelementtien vaihdot mukaan lukien yhteen sykliin meni aikaa lähes 3,5 tuntia, joten työpäivän aikana oli mahdollista suorittaa kaksi sykliä.

Mittausmatriisi oli seuraavan luettelon mukainen. Mittauksissa päästiin käyttämään kahden eri rikkipitoisuuden omaavaa polttoainetta (6 ja 56 ppm). Jälkikäsitelymenetelmänä käytettiin joko hapetuskatalysointia tai katalyytillä päällystettyä hiukkasuodatinta (kuvat). Lisäksi kaksi mittauksista tehtiin ilman jälkikäsitelyä. Moottoriöljy oli koko mittauksen ajan sama.



Mittausmatriisi	Polttoaineen rikkipitoisuus ppm	Hapetuskatalysoittori	Suodatin	Huomioita
10.2.2006 ip	6	Kyllä	Ei	Testi
13.2.2006 ap	6	Kyllä	Ei	
13.2.2006 ip	6	Ei	Kyllä	
14.2.2006 ap	6	Ei	Ei	
14.2.2006 ip	56	Ei	Ei	
15.2.2006 ap	56	Ei	Kyllä	
15.2.2006 ip	56	Kyllä	Ei	Jäi kesken
16.2.2006 ap	56	Kyllä	Ei	
16.2.2006 ip	56	Kyllä	Ei	



Mittaukset sujuivat ilman suurempia ongelmia eikä teknisistä syistä mitään sellaista jäänyt mittaamatta, mitä oli ennalta suunniteltu. Viimeisissä mittauksissa oli kuitenkin huomattavissa, että mittauslaitteistot alkoivat lähestyä rajaa, jossa laitteet olisi täytynyt puhdistaa huolellisesti. Tämä kuitenkin olisi vaatinut pari päivää aikaa, joten se ei ollut tämän kamppanjan puitteissa mahdollista, mutta huomioitava mahdollisesti tulevia mittauskamppanoita suunniteltaessa. Toisaalta esimerkiksi ELPI:n näyteenkeräystasojen foliot vaihdettiin kahteen kertaan mittauksen aikana, koska se oli nopea ja helppo tehtävä tehdä ennen päivän mittauksen aloittamista.

Myös Heidelbergin mittalaitteet toimivat odotuksia paremmin, vaikka ne olivat ensimmäistä kertaa tämänlaisissa mittauksissa käytössä. Ennen mittauksia pelätiin pakokaasun noen tukkivan laitteen, mutta se ei tuntunut olevan ongelmana. Ilmeisimmin ainut ongelma rikkihapon mittaamisessa oli näyteen kondensoituminen näytelinjaan mittauksen aikana, jolloin itse laitteelle asti ei kaikki näyte saapunut ajallansa. Tähän ilmeisesti korjauksena toimi näytelinjan lämmityksen lämpötilan nosto lähelle 200 °C.

Toinen aivan uudenaikaisessa mittausilanteessa ollut laite oli TTL:n AIS, joka on lähinnä tarkoitettu ilmakehämittauksiin eli erittäin pienille pitoisuuksille. Nyt käytetty laimennussuhde (noin 100) oli ilmeisesti riittävä ja laite tuntui toimivan luotettavan oloisesti ainakin sen käyttäjän tutkija Terä Lähteen mukaan. Lopullisesti tämä tosin varmistuu vasta dataa analysoitaessa.

Käyntiosoite:
Stadia
Helsingin AMK
Autolaboratorio /Nuuskijaprojekti
Kalevankatu 43

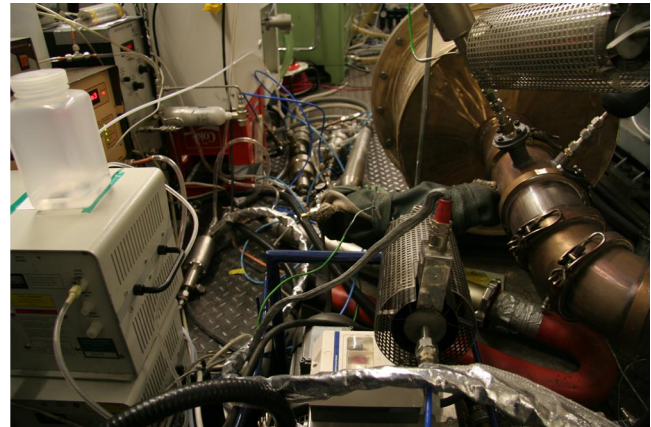
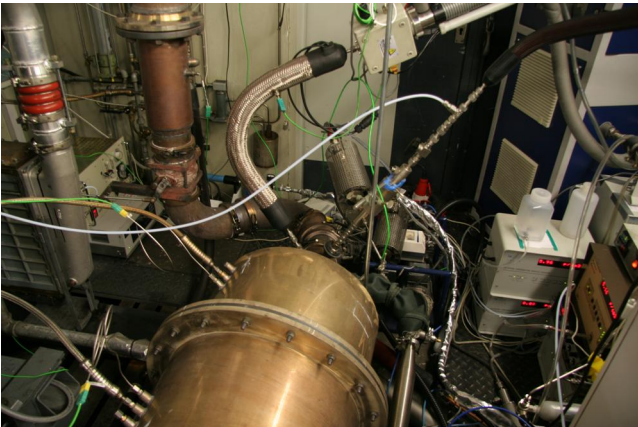
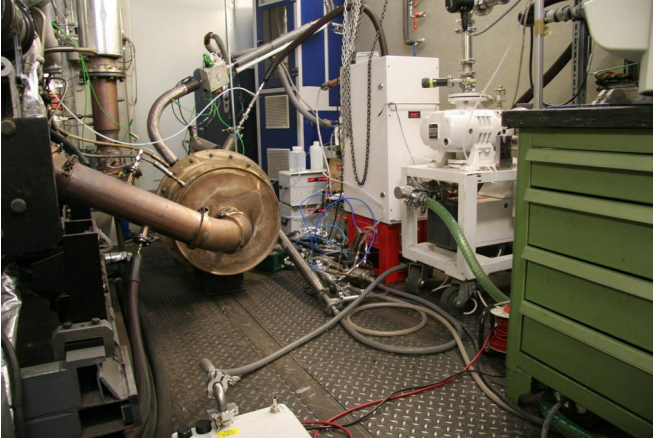
Postiosoite:
PL 4021
00099 HELSINGIN KAUPUNKI

Puhelin:
+ 358 9 310 81395
+ 358 40 5313095
+ 358 50 3439591

Telefax:
+ 358 9 310 83500



Ainut keskeytys mittauksissa, joka tapahtui iltpäivällä 15.2., johtui lyhyestä, alle sekunnin kestäneestä sähkökatkoksesta, jolloin suurin osa mittalaitteista sekä moottori sammuiivat kesken mittauksen. Mittauksia olisi voitu muuten jatkaa, mutta moottorin ajonesto kytkeytyi päälle eikä sitä voitu ohittaa. Ajonesto kytkeytyi automaattisesti pois päältä seuraavaan aamuun mennessä, jolloin mittauksia voitiin jatkaa normaalisti. Onneksi katkon sattua ajettiin 25%:n kuormapistettä, jolloin moottori ei ollut suuren rasituksen alaisena. Jos katko olisi tapahtunut 100%:n kuorman lopussa olisi mm. punaehkuinen turboahdin jäänyt ilman jäähdyttävää voiteluöljyä, jolloin se olisi voinut vaurioitua ja mittaukset kyseisellä moottorilla olisivat loppuneet siihen.



Mittaukset onnistuivat erinomaisesti ja mielenkiintoista dataa saatiin valtavasti. Varsinainen data-analyysi vie aikaa, joten tässä matkaraportissa niitä ei käsitellä sen koomin, mutta mittauksen aikana tehdyistä havainnoista voidaan todeta nukleatiomoodin hiukkasten esiintymisestä seuraavaa: nukleatio esiintyi kaikilla polttoaineilla aina 75 ja 100 %:n kuormilla paitsi ajettaessa 6 ppm:n rikkipitoisuuden omaavalla polttoaineella ilman jälkikäsitelyä tai hapetuskatalysaattorin kanssa. 25 %:n kuormalla nukleatiota ei näkynyt kuin kerran isolla rikkipitoisuudella suodattimen kanssa. Selvä yhteys rikkihapon ja nukleatiomoodin samanaikaiselle esiintymiselle havaittiin, mikä indikoi binäärisen rikkihappo-vesi-nukleatiomekanismin mahdollisuutta. Toisaalta muitakaan mekanismeja ei vielä voida poissulkea.

Käyntiosoite:
Stadia
Helsingin AMK
Autolaboratorio /Nuuskijaprojekti
Kalevankatu 43

Postiosoite:
PL 4021
00099 HELSINGIN KAUPUNKI

Puhelin:
+ 358 9 310 81395
+ 358 40 5313095
+ 358 50 3439591

Telefax:
+ 358 9 310 83500



Perjantai 17.2. suoritettiin mittausjärjestelyn purku sekä mittauksen loppupalaveri, jossa todettiin mittauksen onnistuneen hyvin. Paluu kotiin suoritettiin siten, että perjantai ja lauantain välinen yö ajettiin siirtymä Nürnbergistä Rostockiin, josta lauantaiamuna Superfast IX kuljetti Nuuskija-auton mittalaitteineen ja mittaajineen takaisin Hankoon. Laivan saavuttua sunnuntaina 19.2. Hankoon, kuljetettiin TTY:n mittalaitteet ensin Tampereelle. Tampereelta jatkettiin Helsinkiin, jonne TTL:n tiloihin vietiin heidän mittalaitteet ja lopuksi Nuuskija Stadian tiloihin. Sitten vielä maanantaina 20.2. palautettiin loput lainalaitteet omistajilleen. Kaikkinsa Nuuskijalla taitettiin matkaa noin 2800 km.



Käyntiosoite:
Stadia
Helsingin AMK
Autolaboratorio /Nuuskijaprojekti
Kalevankatu 43

Postiosoite:
PL 4021
00099 HELSINGIN KAUPUNKI

Puhelin:
+ 358 9 310 81395
+ 358 40 5313095
+ 358 50 3439591

Telefax:
+ 358 9 310 83500