



SAVONIA

■ OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

KIINTOAINEEEN TUULIKAMMIOTESTIEN SUUNNITTELU JA PÄÄSTÖKIRJASTON LUONTI

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma Ympäristötekniikan koulutusohjelma			
Työn tekijä(t) Mari Räsänen			
Työn nimi Kiintoaineen tuulikammioestien suunnittelu ja päästökirjaston luonti			
Päiväys	1.2.2016	Sivumäärä/Liitteet	54
Ohjaaja(t) Yliopettaja Merja Tolvanen ja Lehtori Teemu Räsänen			
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Ramboll Analytics			
Tiivistelmä			
<p>Opinnäytetyön tavoitteena oli tuottaa Rambollille pohjatietoa hajapölypäästöjen määrittämisestä tuulitunnelitestauksen avulla, löytää sopiva tapa tehdä tuulikammiokoeket Rambollin rakentamaan tuulikammioon, sekä luoda päästökirjasto. Teollisuudessa syntyvien varastointikasojen ja varastointikenttien, kuten rikastushiekka-alueiden ja kiintoainekasojen hajapölypäästöistä on vielä suhteellisen vähän tietoa ja niiden vaikutusta teollisuuden hajapölypäästöihin haluttiin selvittää lisää. Hajapölypäästöjen sisältämät PM₁₀ ja PM_{2,5} hiukkaset ovat ihmisen terveydelle haitaksi ja pölypäästöt aiheuttavat myös viihtyvyysongelmia.</p> <p>Varastoitavien materiaalien pölypäästöjä voidaan tutkia emissiopotentiaalikammiokoeketien avulla. Kirjallisuusselvityksessä selvitettiin jo aiemmin tehtyjä tuulitunnelikoeketia, tuulen vaikutus hiukkasten liikkumiseen ja tuulen nopeuden muutoksia varastointikasojen pinnalla. Opinnäytetyössä tarkasteltiin tyypillisimpiä sääoloja Suomessa. Sääolosuhteet, kuten tuulen nopeuden vaihtelut, materiaalin kosteus ja lumipeite vaikuttavat suuresti hajapölypäästöjen syntyyn. Kirjallisuudesta löytyneiden tuulitunnelikoeketien pohjalta suunniteltiin koejärjestelyt Rambollin tekemään tuulikammioon. Koejärjestelyt suunniteltiin niin, että koeket on helppo toistaa ja ne voidaan tehdä eri materiaaleille samalla tavalla, jotta tuloksia pystytään vertailemaan keskenään. Suunnitelmassa materiaalit asetetaan tuulikammioon alumiinilevyn avulla ja kammioon syötetään ilmaa 0,5 - 10 m/s virtausnopeudella. Koeketien perusteella materiaaleille saadaan määritettyä päästökertoimet.</p> <p>Lopputuloksena saatiin päästökirjasto, johon kirjattiin kirjallisuudessa jo tunnettuja päästökertoimia eri materiaaleille, kuten hiilivarastokasalle ja kultakaivoksen rikastushiekalle. Päästökertoimien yksikkönä on mg/m²/s. Nämä päästökertoimet löytyivät pääasiassa Yhdysvaltain ympäristönsuojeluviraston ja Australian hallituksen ylläpitämältä ilmastopäästöjen sivustolta, joihin on kirjattu suoraan teollisuuden eri toiminnoista syntyviä päästökertoimia. Tulevaisuudessa Ramboll voi täydentää päästökirjastoa ja lisätä tuulikammiokoeketia saadut hajapölypäästökertoimet päästökirjastoon.</p>			
Avainsanat emissiopotentiaalikammio, hajapölypäästö, päästökirjasto, päästökerroin, tuulikammio			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Environmental Technology			
Author(s) Mari Räsänen			
Title of Thesis Planning Wind Tunnel Tests and Creating Emission Factor Worksheet			
Date	1 February 2016	Pages/Appendices	54
Supervisor(s) Ms. Merja Tolvanen, Principal Lecturer, Mr. Teemu Räsänen, Lecturer			
Client Organisation /Partners Ramboll Analytics			
<p>Abstract</p> <p>Ramboll has designed a wind tunnel to determine the fugitive dust emissions. This bachelor's thesis gives background information to their measurements of fugitive dust emission.</p> <p>Information about fugitive dust emissions from industry storage areas is quite low. The purpose was to find more information about these emissions. Dust emissions cause pollution in the environment and the particles PM₁₀ and PM_{2,5} in dust emissions are a health hazard. Fugitive dust emissions can be determined by wind tunnel tests. The most typical weather conditions in Finland were observed in this bachelor's thesis because they have a great impact on fugitive dust emissions. Wind tunnel tests, which had already been run, were observed and the results from these tests were used to create testing arrangements for Ramboll's wind tunnel. In the future, when the test is ready to run, Ramboll will use the flow velocity of 0.5 - 10 meters per second to measure how much the materials contain fine particles like PM₁₀.</p> <p>The results from these wind tunnel tests will give emission factors to different materials. The most commonly used emission factors were brought together from other sources and were written down to a worksheet and this thesis. The unit for emission factors is mg/m²/s. In the future Ramboll will be able to add the results to the worksheet.</p>			
Keywords emission factor, fugitive dust emission, wind tunnel			

ESIPUHE

Tämä opinnäytetyö tehtiin yhteistyössä Rambollin kanssa. Haluan kiittää Kati Nuutista ja Janne Nuutista kiinnostavasta opinnäytetyön aiheesta sekä opinnäytetyön ohjauksesta. Haluan myös kiittää opinnäytetyön ohjaamisesta yliopettaja Merja Tolvasta ja lehtori Teemu Räsästä.

Kuopiossa 1.5.2016

Mari Räsänen

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	7
2	HAJAPÖLYPÄÄSTÖJEN MUODOSTUMISEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	8
2.1	Yleistä ulkoilman aerosolihiukkasista	8
2.1.1	Hiukkasten terveysvaikutukset	9
2.1.2	Hiukkaspäästöjen raja-arvot ulkoilmassa.....	9
2.2	Hajapäästö	10
2.3	Meteorologiset tekijät.....	10
2.3.1	Tuuli ja rajakerros	10
2.3.2	Tuulen nopeusasteikot	11
2.3.3	Tuulen nopeuden hetkellinen nousu	13
2.3.4	Tuulen nopeuden alueelliset erot	14
2.3.5	Sade ja maaperän kosteus.....	21
2.3.6	Lumipeite	22
2.4	Maanpinnan rosoisuus.....	23
3	HAJAPÖLYPÄÄSTÖJEN MUODOSTUMINEN KIINTOAINEKASASTA.....	24
3.1	Tuulen vaikutus hiukkasten liikkumistapaan.....	24
3.2	Varastointikasojen hajapölypäästöt	26
3.3	Tuulen kehittyminen kasan pinnalla	28
4	KIINTOAINEEN/PÖLYN EMISSIOPOTENTIAALIN MÄÄRITYSMENETELMIÄ.....	33
4.1	Päästökertoimien määrittäminen.....	33
4.1.1	Sulfidimalmikaivoksien jätealueiden ympäristövaikutusten tutkimukset Kanadassa, Ruotsissa ja Norjassa.....	34
4.1.2	Tuulitunnelitestausta kultakaivoksen lietemäiselle rikastushiekalle	34
4.1.3	PM ₁₀ ja PM _{2,5} päästöjen määrittäminen kuivuneen järven maaperästä tuulitunneli kokeella	36
4.1.4	Kaivoksen rikastushiekan hajapölypäästöjen simulointi tuulitunnelilla.....	39
4.1.5	Tuulieroosion vaikutus PM ₁₀ päästöihin.	40
4.1.6	Tuulitunneli kalibrointi USGS-pölynkeräyslaitteille	40
4.1.7	Suspension ja tuulieroosion vaikutus maaperän pölyämiseen.	41
4.1.8	Kosteuden vaikutus hiekkaisen savimaiden eroosioon.....	41
4.2	Yhteenveto kirjallisuusselvityksestä	42
4.3	Hajapölypäästöjen määrittäminen	43

4.4	Vuosipäästöjen laskeminen.....	44
5	TUULIKAMMIO TESTEIHIN SUUNNITELLUT MENETETTELYTAVAT	46
5.1	Tuulikammio.....	46
5.2	Tuulikammio kokeiden suunnittelu	46
6	PÄÄSTÖKIRJASTON LUOMINEN	48
6.1	Päästökertoimen määritelmä ja päästökirjaston luonti	48
6.2	Päästökirjasto	48
7	YHTEENVETO.....	50
	LÄHTEET	51

1 JOHDANTO

Teollisuuden hajapölyjen määrää ei ole vielä tutkittu tarpeeksi ja varastokenttien hajapölypäästöjen aiheuttamista hiukkaspäästömääristä on kiinnostuttu. Tulevaisuudessa näihin kiinnitetään enemmän huomiota ja varastoalueiden hajapölypäästöjen määrää halutaan määrittää tarkemmin. Tämän työn tarkoituksena on tuottaa Rambollille tietoa hajapölypäästöjen tutkimisesta emissiopotentiaalikammiotesteillä. Tietoja käytetään Rambollin tuulikammion menetelmän kehittämisessä. Tarkoituksena on myös tuottaa päästökirjasto, johon kootaan päästökertoimia teollisuudessa varastoitaville materiaaleille.

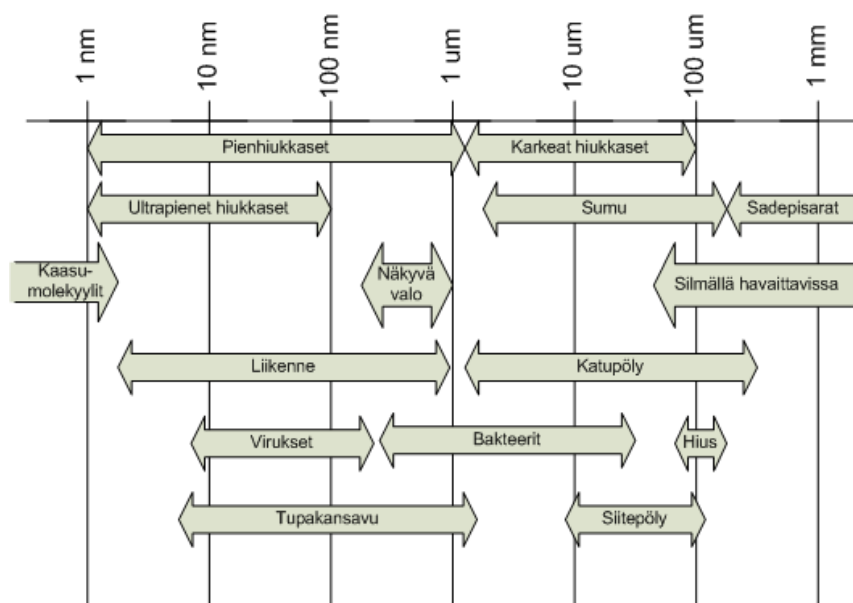
Kirjallisuusselvitykseen kootaan tietoa hajapölypäästöjen määritysmenetelmistä, hajapölypäästöjen syntymiseen vaikuttavista tekijöistä ja Suomen sääoloista. Näitä ovat esimerkiksi pysyvän lumipeitteen ajan muutokset sekä tuulen nopeuden ja suunnan vaihtelut eri puolilla Suomea. Työssä kuvataan tarkemmin viiden eri paikkakunnan tuulioloja tuuliruuksujen ja tuulen nopeuden vaihteluiden avulla. Myös tuulen vaikutusta varastokasojen pölyämiseen ja jo tehtyihin hajapölypäästömäärittäisiin tuulitunnelilla käydään läpi kirjallisuudesta löytyvän materiaalin avulla. Kirjallisuusselvityksessä käydään läpi kahdeksan erilaista tuulitunneleilla tehtyä hajapölypäästöjen määritysmenetelmää. Tuulitunnelimenetelmien pohjalta suunnitellaan koejärjestelyt Rambollin tekemän tuulikammion testausta varten. Tuulikammion testausmenetelmän tarkoituksena on, että koejärjestelmä pystytään toistamaan mahdollisimman samalla tavalla, jotta eri materiaalien tuloksia voidaan vertailla keskenään. Päästökirjastoon kootaan eri lähteistä saatuja päästökertoimia yksikössä mg/m²/s. Tulevaisuudessa Ramboll voi lisätä päästökirjastoon omien tuulikammiotestien päästökertoimet.

2 HAJAPÖLYPÄÄSTÖJEN MUODOSTUMISEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

2.1 Yleistä ulkoilman aerosolihiukkasista

Aerosolihiukkasella tarkoitetaan ilmassa leijuvaa kiinteää tai nestemäistä hiukkasta, jonka halkaisija on 1 nm - 100 µm ja siinä on enemmän kuin yksi molekyyli. Hiukkasten halkaisija ilmoitetaan yleensä yksikössä mikrometriä (µm) tai nanometriä (nm) (Hiukkastieto.fi.) Hiukkasten koko vaihtelee vain muutamien molekyylien kokoisista hiukkasista silmin havaittaviin pölyhiukkasiin. Hiukkasten muoto ja tiheys vaihtelevat, joten hiukkasten ominaisuuksien vertailemiseksi on otettu käyttöön aerodynaamisen halkaisijan käsite, joka kuvaa hiukkasten kokoa ja se perustuu hiukkasten liikkumiseen. (Toivonen 2010.) Sillä tarkoitetaan sellaisen kuvitteellisen pallonmuotoisen hiukkasen halkaisijaa, jonka tiheys on 1 g/cm³, ja jolla on sama laskeutumisnopeus kuin kyseessä olevalla hiukkasella. Todellisuudessa hiukkaset voivat poiketa huomattavasti toisistaan muodon, koon ja tiheyden suhteen. (Säämänen 2004, 19.)

Aerosolihiukkasia, joiden aerodynaaminen halkaisija on alle 10 µm kutsutaan hengitettäviksi hiukkasiksi ja niistä käytetään lyhennettä PM₁₀ (Particulate Matter <10). Hengitettävät hiukkaset jaetaan karkeisiin hengitettäviin hiukkasiin, joiden halkaisija on 2,5 - 10 µm ja alle 2,5 µm halkaisijaltaan oleviin hiukkasiin (Toivonen 2010.) Alle 2,5 µm halkaisijaltaan olevia hiukkasia kutsutaan pienhiukkasiksi ja niistä käytetään lyhennettä PM_{2,5}. Nämä pienhiukkaset liikkuvat ilmapirran mukana lähes kaasujen tavoin ja voivat kulkeutua jopa tuhansien kilometrien päähän päästölähteestään (Ilmanlaatu.fi.) Kuviossa 1 on esitetty eri kokoluokkien aerosolihiukkasia ja niiden halkaisijoita (Hiukkastieto.fi).



KUVIO 1 Tyypillisiä aerosolihiukkasia ja niiden halkaisijoita (Hiukkastieto.fi.)

Ilmakehän hiukkaset syntyvät luonnossa tai ihmistoiminnan seurauksena. Luonnon aiheuttamia hiukkaspäästöjä syntyy esimerkiksi tulivuoren purkauksissa ja aavikoilta tuulen nostattaman hiekkapölynä. Ihmisen toiminta tuottaa maailmanlaajuisesti noin 10 - 50% maapallon hiukkaspäästöistä. Päästöjä syntyy esimerkiksi erilaisten polttoprosessien yhteydessä. Karkeita hiukkasia syntyy esimer-

kiksi tuulen nostattamana maaperästä, mekaanisen hankauksen yhteydessä, sekä katupölystä. (Hiukkastieto.fi.) Hengitettävien hiukkasten laskeutumisnopeus on hyvin alhainen ja pienikin ilmavirtaus saa hiukkaset nousemaan ylöspäin ja jatkamaan leijumista ilmassa. Näitä hiukkasia on siis vaikea poistaa ilmasta. (Toivonen, 2010.) Pienhiukkasten PM_{2,5} yleisimmät lähteet Suomessa ovat puun pienpoltto ja polttoaineen palamisessa syntyvät hiukkaset (Ymparisto.fi). Kemiallisten reaktioiden kautta kaasumaisista yhdisteistä muodostuu pienhiukkasia (Ilmanlaatu.fi). Suomessa noin puolet pienhiukkasista tulee kaukokulkeutuneina Itä- ja Keski-Euroopasta. Hiukkasia poistuu ilmasta depositiolla, jolloin hiukkanen tarttuu johonkin pintaan tai esimerkiksi sadepisaraan ja sillä tavoin poistuu ilmakehästä ja ilmanlaatu paranee. (Hiukkastieto.fi.)

2.1.1 Hiukkasten terveysvaikutukset

Hiukkaset ovat terveydelle haitaksi ja aiheuttavat viihtyvyysoongelmia. Pienhiukkaset (PM_{2,5}) ovat terveydelle haitallisimpia hiukkasia, sillä niiden mukana hiilivedyt ja raskasmetallit pääsevät kulkeutumaan hengitysteitä pitkin ihmisen keuhkorakkuloihin saakka (Ymparisto.fi.) Altistuminen pienhiukkasille voi pahentaa astmaa ja lisätä hengitystieinfektioita, kuten keuhkoputkentulehduksia (Hengityслиitto.fi). PM₁₀ hiukkaset pystyvät kulkeutumaan hengitettävän ilman mukana ihmisen keuhkoputkiin ja voivat aiheuttaa hengitysteiden ärsyyntymisoireita ja pahentaa astman ja keuhkohtauman oireita. Hiukkasaltistuksella on havaittu olevan yhteys eliniän lyhenemiseen. (Hengityслиitto.fi.)

2.1.2 Hiukaspäästöjen raja-arvot ulkoilmassa

Valtioneuvosto on asettanut raja-arvot hiukaspäästöille ulkoilmassa. Taulukossa 1 on kuvattu raja-arvot ja sallittujen ylitysten määrät PM₁₀ ja PM_{2,5} hiukkasille (VNA 38/2011). PM₁₀ hiukkasten raja-arvo ulkoilmassa on alle 50 µg/m³ vuorokauden aikana ja vuodessa alle 40 µg/m³. Pienhiukkasten raja-arvo on 25 µg/m³ vuodessa.

TAULUKKO 1 VNA 38/2011 mukaiset raja-arvot hiukaspäästöille ulkoilmassa (Valtioneuvoston asetus ilmanlaadusta 2011.)

Aine	Keskiarvon laskenta-aika ¹⁾	Raja-arvo ²⁾ µg/m ³	Sallittujen ylitysten määrä kalenterivuodessa (vertailujakso)	Ajankohta, josta lähtien raja-arvot ovat olleet voimassa
Hengitettävät hiukkaset (PM ₁₀)	24 tuntia	50	35	1.1.2005
	kalenterivuosi	40	-	1.1.2005
Pienhiukkaset (PM _{2,5})	kalenterivuosi	25	-	1.1.2010

1) Mittaustuloksia yhdistettäessä ja tilastollisia tunnuslukuja laskettaessa on noudatettava liitteen 9 perusteita.

2) Kaasumaisilla yhdisteillä tulokset ilmaistaan 293 K lämpötilassa ja 101,3 kPa paineessa. Lyijyn ja hiukkasten tulokset ilmaistaan ulkoilman lämpötilassa ja paineessa.

3) Vuorokauden korkein kahdeksan tunnin keskiarvo valitaan tarkastelemalla kahdeksan tunnin liukuvia keskiarvoja. Kukin kahdeksan tunnin jakso osoitetaan sille päivälle, jona jakso päättyy.

2.2 Hajapäästö

Yleisesti hajapäästöillä tarkoitetaan epäsäännöllistä tai tahatonta päästöä lähteistä, joiden sijaintia ei ole tarkasti määritetty. Yleensä päästöt ovat liian hajanaisia tai pieniä, jotta niitä voitaisiin tarkkailla yksitellen. (Euroopan unionin virallinen lehti 2012.) Teollisuuden hajapäästöt voidaan jakaa karkeasti kolmeen eri päästölähteeseen: Prosessissa tapahtuvaa vahinko, kanavoitu lähde, esimerkiksi savupiippu tai varastokasa sekä hajalähde. Yleensä teollisuudessa ilmapäästöjen ajatellaan johtuvan tavanomaisista suljetun kanavan hallituista päästölähteistä, kuten savupiipuista. Kuitenkin hajapäästöjen yksityiskohtainen seuranta ja päästöjen vähentäminen ovat tärkeitä, jotta alueella saavutetaan parempi ilmanlaatu. (Nissinen 2014.)

Hajapäästöjä syntyy esimerkiksi teollisuudessa prosessien ja laitevikojen yhteydessä, venttiilien vuotokohdista ja välivarastointilaitoksista (Immonen 2014). Hajapölypäästöjen syntyyn päästölähteen toiminnan lisäksi vaikuttavat myös ulkoiset tekijät, kuten sade ja tuuli (Nissinen 2014). Tässä työssä hajapölypäästöillä tarkoitetaan teollisuuden toiminnoissa syntyneitä pölypäästöä. Hajapölypäästö voi syntyä esimerkiksi teollisuusalueella tapahtuvan toiminnon kuten kasaamisen tai kuormaamisen yhteydessä, olla teollisuusalueen liikenteen aiheuttamaa resuspensiota likaisilta ajoteiltä tai olla tuulen kentiltä, aumoista tai kasoista nostamaa leijuvaa pölyä.

2.3 Meteorologiset tekijät

2.3.1 Tuuli ja rajakerros

Ilmakehän alin kerros, troposfääri ulottuu maan pinnasta keskimäärin noin 10 kilometrin korkeuteen. Siellä tapahtuu maapallon tavalliset sääilmiöt, kuten pilvien muodostuminen, sade ja tuulet. Troposfäärissä ilma sekoittuu tehokkaasti pysty- ja vaakasuunnassa. Kuitenkaan lyhyen aikaa ilmakehässä olevat kaasut ja hiukkaset eivät ehdi sekoittua koko ilmamassaan ja sen seurauksena päästölähteiden läheisyydessä ilmanlaatu heikkenee. (Ilmatieteenlaitos.fi a.)

Suomi kuuluu länsituulten vyöhykkeeseen. Suomen tuulioloihin vaikuttaa eniten lännestä, Atlantin mereltä Suomeen päin tulevat matalapaineet sekä itäpuolella oleva suuri manneralue. Talvella itäpuolen manneralueella on pysyvä korkeapaine ja taas lännessä Islannin ja Grönlannin päällä vallitsee laaja matalapaine. Näiden alueiden väliset ilmanpaine-erot aiheuttavat Suomen talvista tuulisia. Kesällä Islannin ja Grönlannin matalapaine on siirtynyt lähemmäksi Suomea ja Aasian päällä vallinnut korkeapaine on hävinnyt, jolloin ilmanpaine erot eivät ole niin suuret, eikä tuulet yhtä voimakkaita kuin talvella. Ilmanpaine-erot vaikuttavat tuulen nopeuteen. Mitä enemmän ilmanpaine muuttuu kahden alueen välillä, sitä voimakkaammin siellä tuulee. (Tuulivoimayhdistys.fi.)

Maanpinnan ja vapaan ilmakehän välistä ilmakerrosta kutsutaan rajakerrokseksi, sen korkeus vaihtelee paljon, Suomessa kerros ulottuu tyypillisesti 100 - 1000 metriin maan pinnasta. Rajakerroksen paksuuteen vaikuttavat ilman stabiilisuus, eli ilmakehän pystysuuntainen sekoittumisherkkyys, säätila, ilman kosteus ja maanpintainversiotilanteet, joissa lämpötila kasvaa korkeuden mukana. Rajakerroksessa "vapaan ilmakehän tuuli" muuttuu tuuleksi joka aiheuttaa puiden heilumista ja hiekan pölyämistä. Tuulen voimakkuuteen vaikuttavat maanpinnan rosoisuus ja ilman stabiilisuus. (Tuulivoimayhdistys.fi.) Rajakerroksessa ilman virtaus on usein turbulენტista. Ylärajan ja pintakerroksen välissä on niin sanottu Ekmanin kerros, jossa tuulten nopeuden suunta muuttuu ja tuulen nopeus heikkenee korkeuden pienentyessä pintakitkan vaikutuksesta. (Tuuliatlas.fi.)

Rajakerroksen lähimpänä maanpintaa olevaa kerrosta kutsutaan pintakerrokseksi, myös sen paksuuteen vaikuttavat ilmakehän stabiilisuus ja maanpinna rosoisuus, mutta yleensä kerros ulottuu maan pinnasta 10 - 150 metrin korkeuteen. Vaihtelevassa, epähomogeenisessa maastossa rajakerrokseen voi syntyä sisäisiä rajakerroksia. Ne syntyvät, kun ilma virtaa alustatyyppiltä toisenlaiselle alustatyyppille, esimerkiksi järveltä metsään. Alustatyyppin vaihtuessa pintalämpötila, maanpinnan rosoisuus tai molemmat voivat muuttua. Rosoisuuden muuttuessa karkeammalta sileämmälle alustatyyppille tuulen nopeus kiihtyy ja päinvastaisessa tapahtumassa tuulen nopeus hidastuu. Kiihtyminen ja hidastuminen tapahtuvat aluksi vain aivan alustan pinnassa, jolloin myös pöly ja pienhiukkaset lähtevät helposti tuulen mukaan. Turbulenttisen sekoittumisen myötä nopeuden muutos siirtyy myös ylemmäs. Tämän johdosta sisäinen rajakerros kasvaa sitä mukaa kuin etäisyys aluskasvillisuuden muutosrajasta kasvaa ja samalla tuulen mukaan lähteneet pienhiukkaset ja pöly leviävät ilmavirtauksen mukana. (Tuuliatlas.fi.)

2.3.2 Tuulen nopeusasteikot

Tuulen mittaustapa ja tuuliasteikot on sovittu kansainvälisesti yhteisiksi. Yleensä tuulta mitataan 10 metrin korkeudesta 10 minuutin välein. Tämä mittaustapa antaa tuulen nopeuden keskiarvon 10 minuutin ajalta, jolloin yksittäisten tuulenpuuskien vaikutusten arviointi jää huomioimatta mittauksissa. Kuitenkin erityisesti sisämaassa yksittäiset tuulenpuuskat aiheuttavat tuulivahinkoja ja hienoaineksen pölyämistä. Taulukossa 2 on kuvattu Suomessa käytettävä tuuliasteikko ja taulukossa 3 kansainvälisessä merisäässä käytettävät varoitukset. (Ilmatieteenlaitos.fi b.)

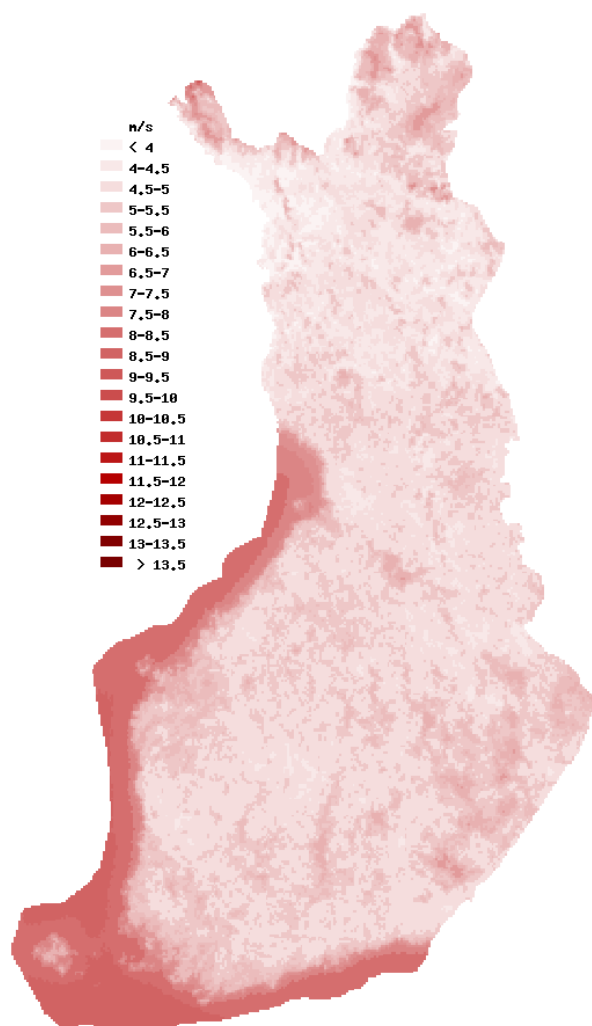
TAULUKKO 2 Tuuliasteikko 10 minuutin keskituulen nopeuksille (Ilmatieteenlaitos.fi b.)

tuulen nopeus (m/s)	asteikkoluokka
0	tyyntä
1–3	heikkoa tuulta
4–7	kohtalaista tuulta
8–13	navakkaa tuulta
14–20	kovaa tuulta
21–32	myrskyä
yli 32	hirmumyrskyä

TAULUKKO 3 Kansainvälisessä merisääpalvelussa käytettävät tuulivaroitukset 10 minuutin keskituulen nopeuksille (Ilmatieteenlaitos.fi b)

tuulen nopeus (m/s)	asteikkoluokka
14–16	near gale
17–20	gale
21–24	severe gale
25–28	storm
29–32	violent storm
yli 32	hurricane

Suomen tuulioloja on voitu ennustaa erilaisilla laskentamalleilla. Kuvassa 1 on esitettyä Suomen tuuliatlas-sivuston tuottama tuulen keskinopeuskartta Suomen alueelta. Tuulen aritmeettinen keskinopeus m/s ennuste on laskettu Ilmatieteen laitoksen AROME-sääennustusmallilla. Tuuliarvot on esitetty 2,5 x 2,5 neliökilometrin tarkkuudella 50 metrin korkeudelta maanpinnasta. Jokaisen 2,5 x 2,5 m² ruudun maanpinnan korkeus merenpinnasta on laskennallinen keskikorkeus. (Tuuliatlas.fi.) Koko vuoden tuulen keskinopeuden keskiarvo vaihtelee 50 metrin korkeudessa koko Suomessa alle 4 m/s noin 10 m/s. Sisämaassa tuulen keskinopeus jää alle kohtalaisen tuulen < 7 m/s.

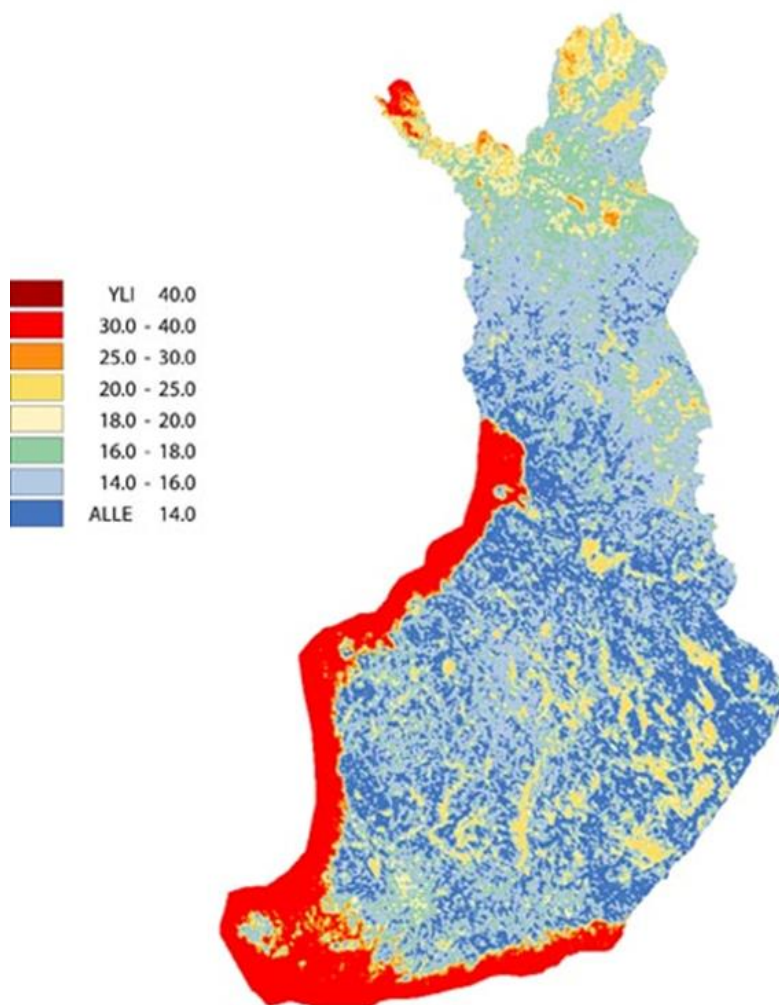


KUVA 1 Tuulen aritmeettinen keskinopeus (m/s) 50 metrin korkeudessa vuodessa (Tuuliatlas.fi.)

2.3.3 Tuulen nopeuden hetkellinen nousu

Ilmatieteenlaitoksen mukaan hetkelliset, 5 - 10 sekunnin tuulen puuskat ylittävät 10 minuutin keskituulen nopeuden säätilanteesta riippuen useimmiten 1,5-kertaisina, enimmillään 2-kertaisina. Nämä puuskat saavat maaperän hiukkaset irtoamaan maaperästä ja aiheuttavat pölypäästöjä. Kesäisin ukosen aikaan esiintyy paikallisesti voimakkaita tuulen puuskia. Yleensä puuskien tuulen nopeus jää alle 15 m/s. Suuria tuulivahinkoja alkaa syntyä yli 20 m/s puhaltavasta tuulesta ja tällaisia puuskia esiintyy useana päivänä kesässään. Kylmän säärintaman jälkeen tuuli on usein puuskaista laajoilla alueilla, jolloin myös tuulen hetkittäinen nopeus on voimakasta. (Ilmatieteenlaitos.fi b.)

Suomen tuuliatlas-sivustolla on kuvattuna maksimituulten jakaumaa Suomessa. Maksimituulella tarkoitetaan 10 minuutin keskituulen nopeutta, joka saavutetaan kerran 50 vuodessa. Kuvassa 2 on esitetty maksimituulten nopeuksia toistuvaksi kerran 50 vuodessa 10 metrin korkeudessa maanpinnasta. Myös maanpinnan rosaisuuden vaihtelut on huomioitu laskelmissa. Suurimmat arvot ovat rannikkoalueilla ja tunturialueille. Sisämaassa järvien päällä tuuli on voimakkainta. Suurin 50 vuoden välein toistuvaksi laskettu tuulen nopeus on 43,8 m/s, pienin 11,2 m/s ja keskiarvo 17,7 m/s. (Tuuliatlas.fi.)



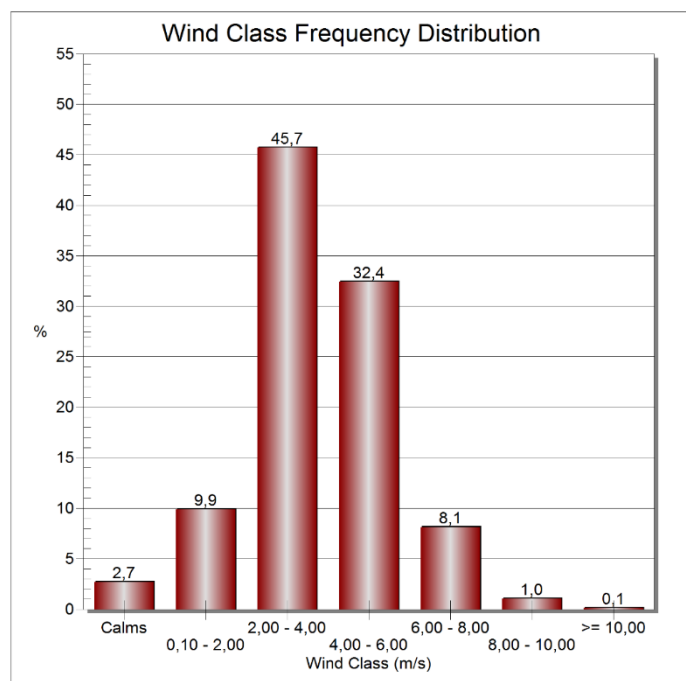
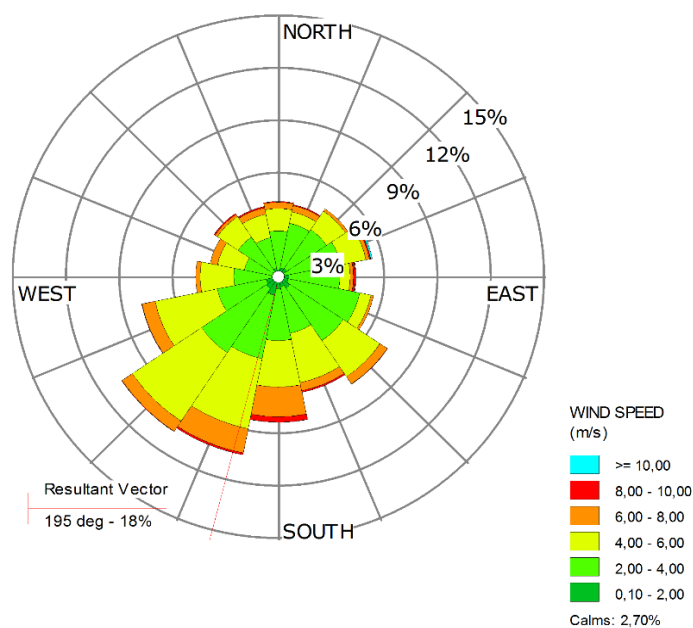
KUVA 2 Suomen maksimituulen nopeus 10 metrin korkeudessa, joka saavutetaan kerran 50 vuodessa. (Tuuliatlas.fi.)

2.3.4 Tuulen nopeuden alueelliset erot

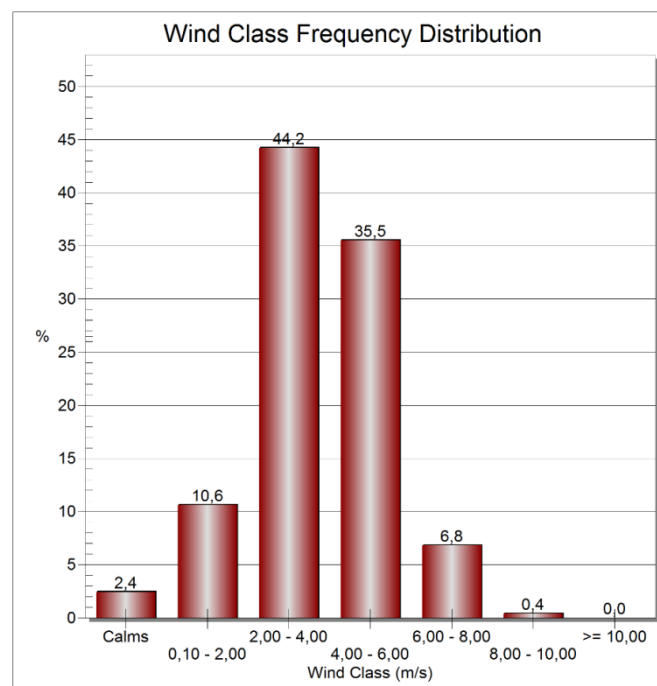
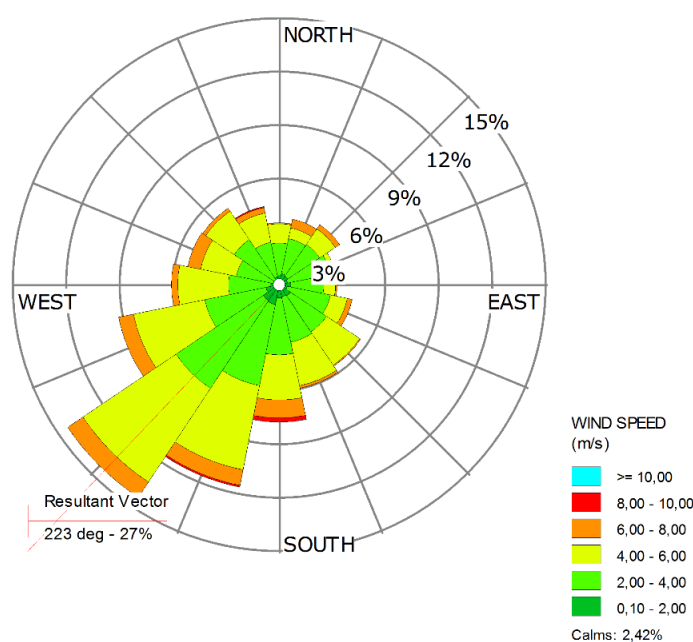
Tuulen vallitsevuus tuulensuunnittain viidellä eri paikkakunnalla on esitetty kuvioissa 2 - 11. Tuuliruusut perustuvat Rambollin hankkiman MM5-aineiston vuoden 2013 tuulitietoihin. Lumettomat ajanjaksot on eritelty vuoden 2015 lumitilanteiden mukaan, tiedot saatu Ilmatieteenlaitoksen ilmastopalvelusta (SOLIN 2016-03-09). Kuviossa on esitetty Jyväskylän, Kouvolan, Rovaniemen, Uudenkaupungin ja Vaasan tuuliruusut koko vuodelta sekä lumettomalta ajanjaksolta. Tuuliruusut ovat jaettu 24 sektoriin, joiden palkkien pituudella kuvataan tuulen ajallista osuutta tietystä sektorin suunnasta. Palkkien värit kuvaavat tuulen nopeusluokkia. Kuvioissa on esitetty myös tuulen nopeuden prosentuaaliset osuudet koko vuodelta ja lumettomalta ajanjaksolta. Kuviot on tehty AERMET View-ohjelmistolla. Taulukossa 4 on paikkakuntien lumettomat ajanjaksot.

TAULUKKO 4 Eri paikkakuntien lumeton ajanjakso (SOLIN 2016-03-09.)

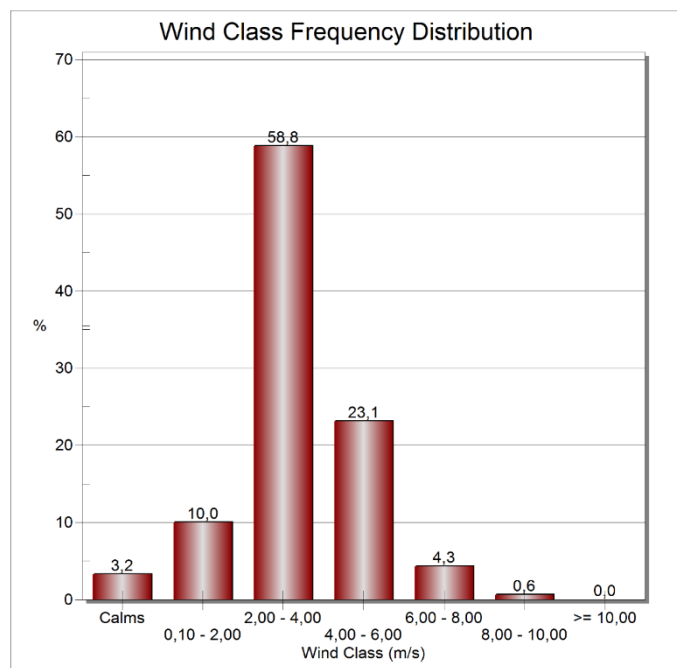
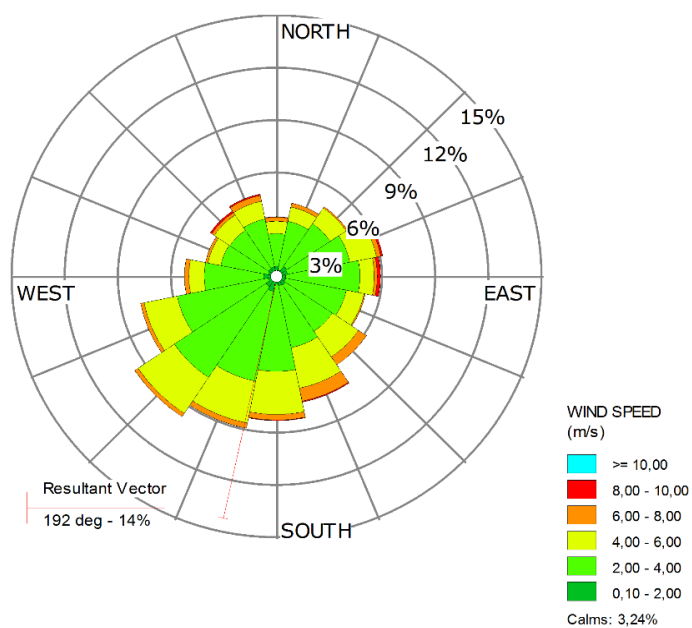
Paikkakunta	Aikaväli
Jyväskylä	6.3–20.11.2015
Kouvola	9.5–21.11.2015
Rovaniemi	14.5–30.10.2015
Vaasa	15.4–22.10.2015
Uusikaupunki	6.3–20.11.2015



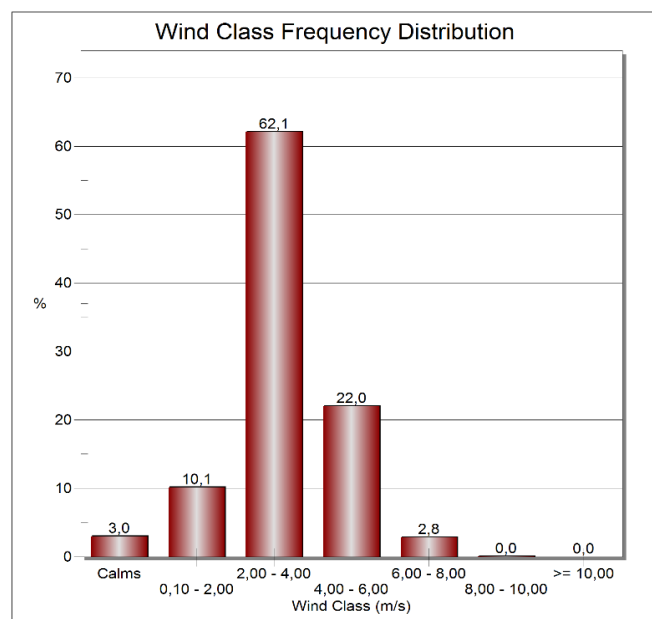
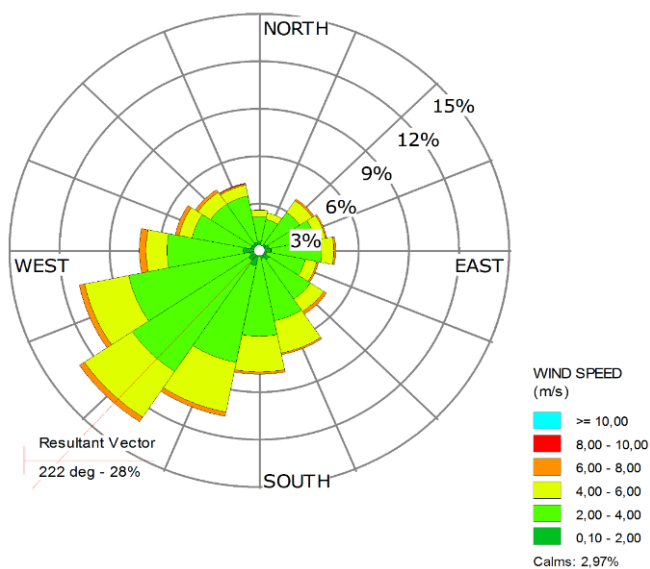
KUVIO 2 Tuuliruuus ja tuulen nopeudet prosentteina koko vuodelta Jyväskylästä (MM5-aineisto, SOLIN 2016-03-09.)



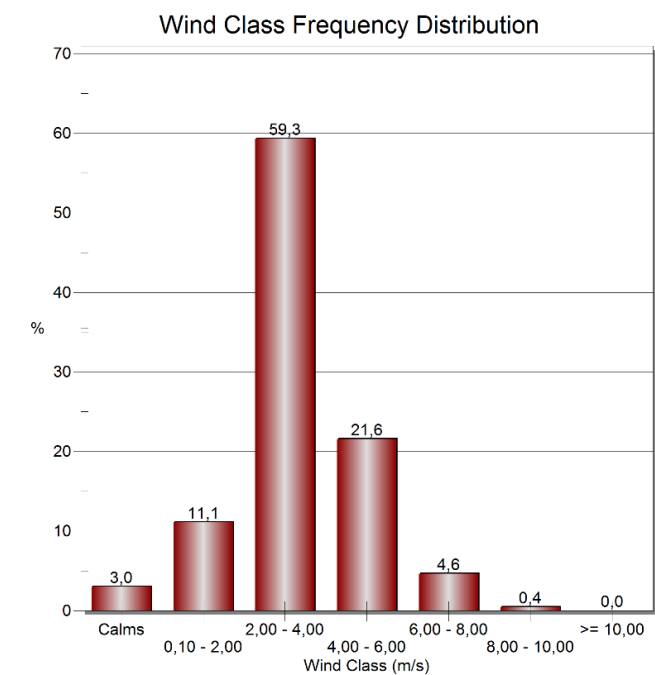
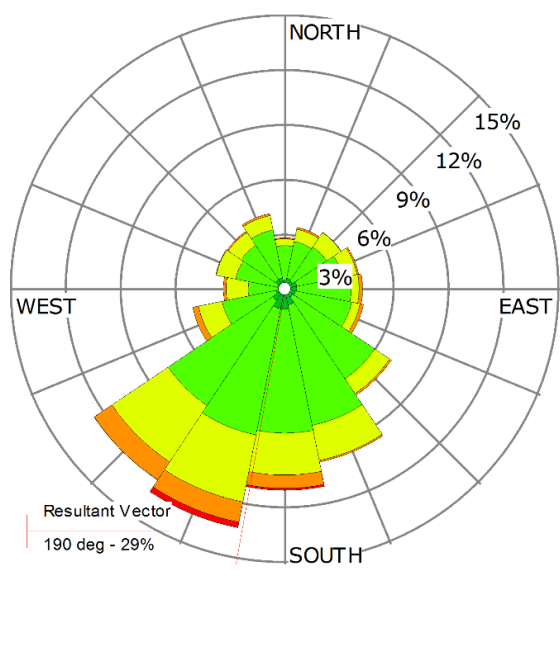
KUVIO 3 Tuuliruuus ja tuulen nopeudet prosentteina lumettomalla ajanjaksolla Jyväskylästä (MM5-aineisto, SOLIN 2016-03-09.)



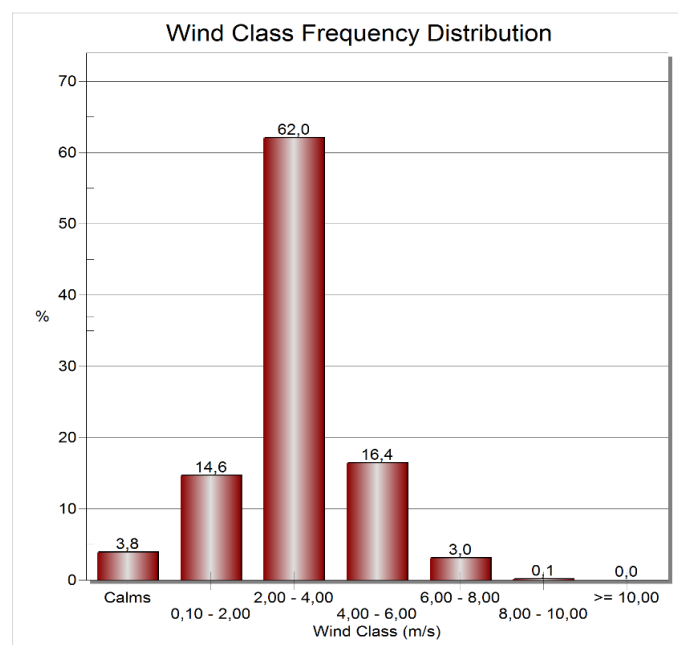
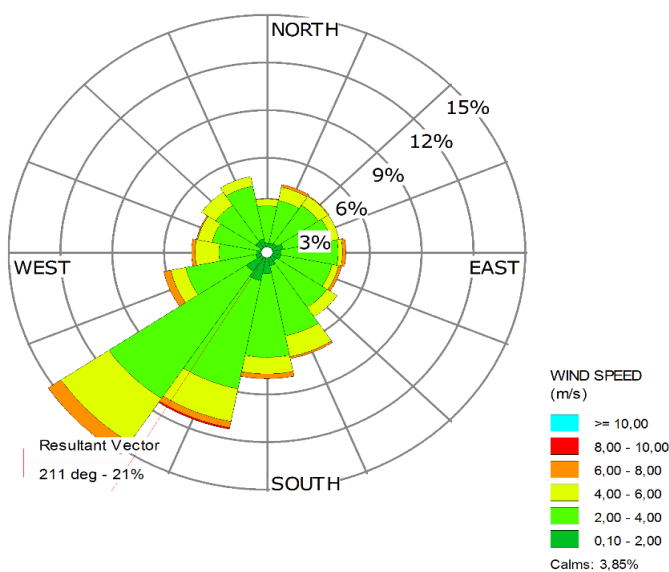
KUVIO 4 Tuuliruuus ja tuulen nopeudet prosentteina koko vuodelta Kouvolasta (MM5-aineisto, SOLIN 2016-03-09.)



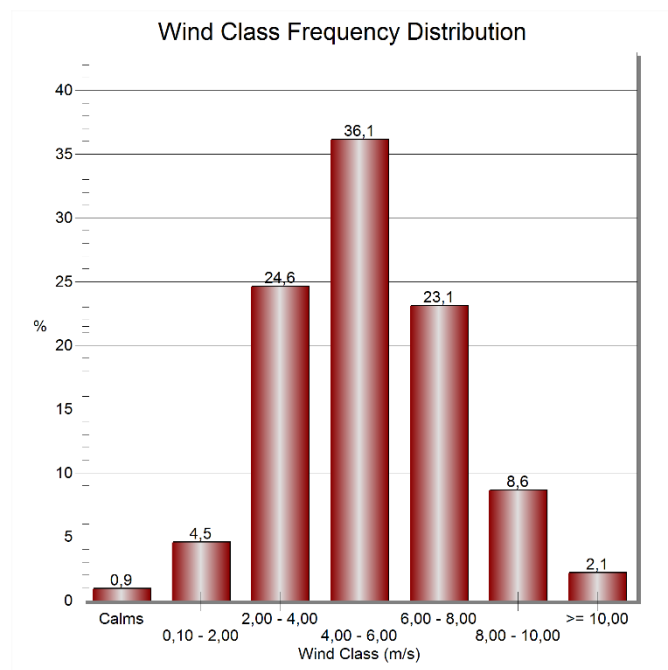
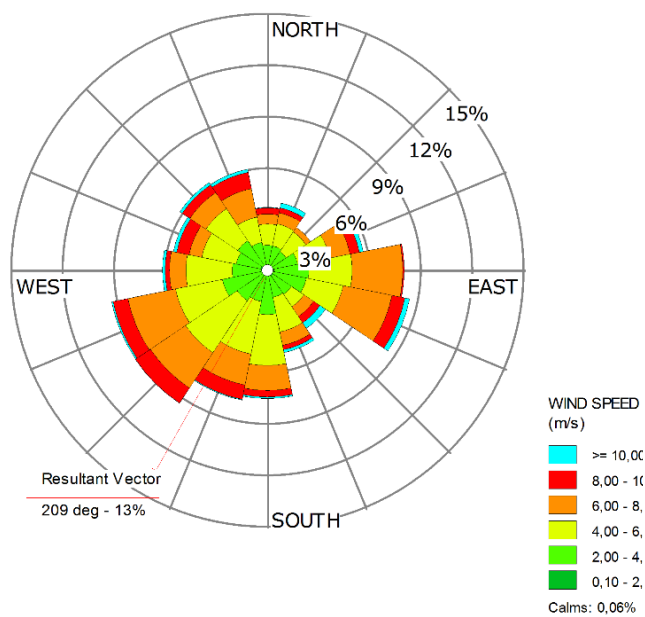
KUVIO 5 Tuuliruuus ja tuulen nopeudet prosentteina lumettomalla ajanjaksolla Kouvolasta (MM5-aineisto, SOLIN 2016-03-09.)



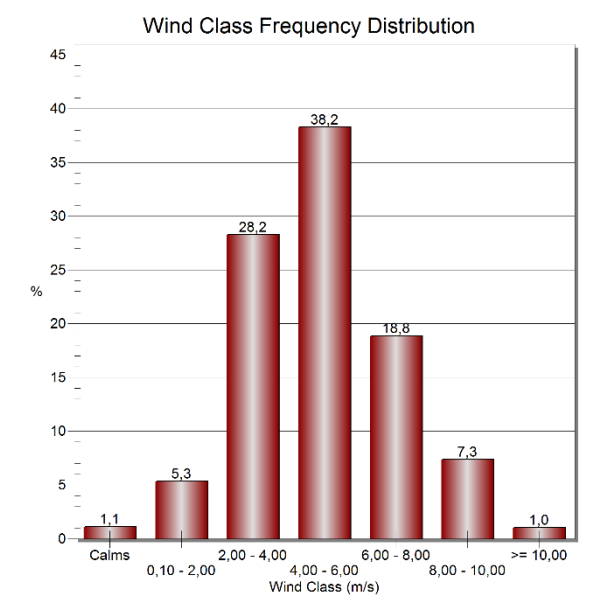
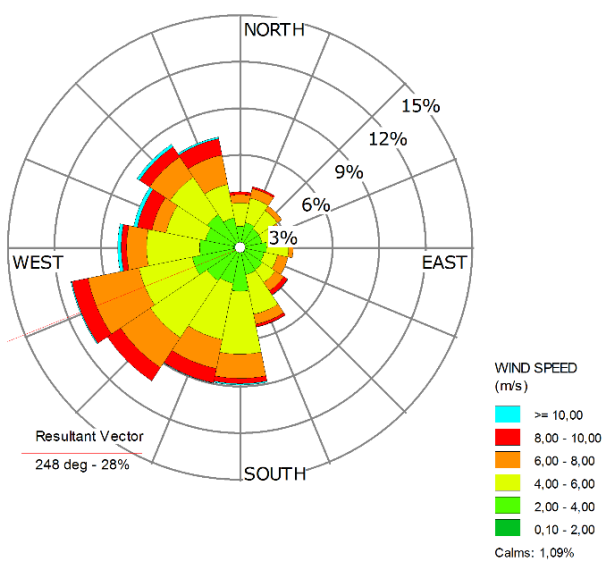
KUVIO 6 Tuuliruusu ja tuulen nopeudet prosentteina koko vuodelta Rovaniemeltä (MM5-aineisto, SOLIN 2016-03-09.)



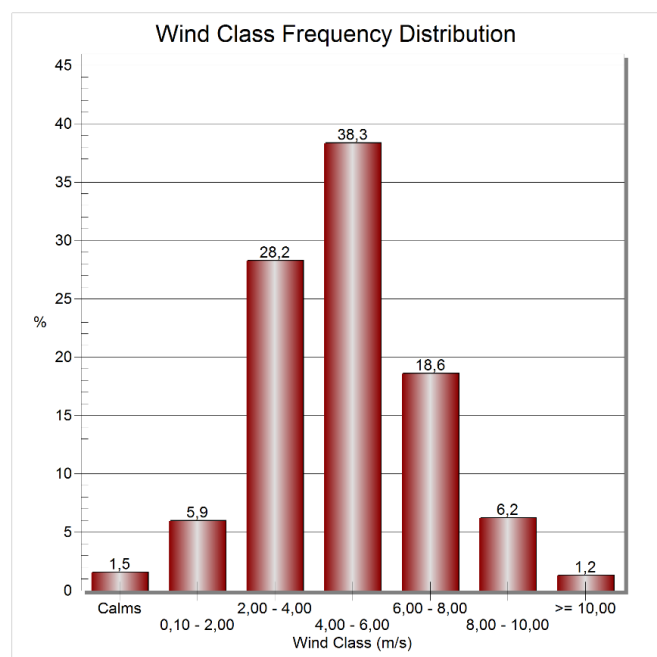
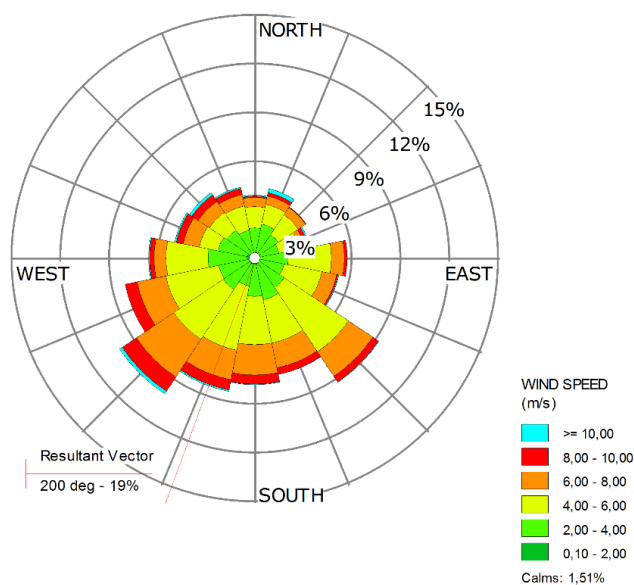
KUVIO 7 Tuuliruusu ja tuulen nopeudet prosentteina lumettomalla ajanjaksolla Rovaniemeltä (MM5-aineisto, SOLIN 2016-03-09.)



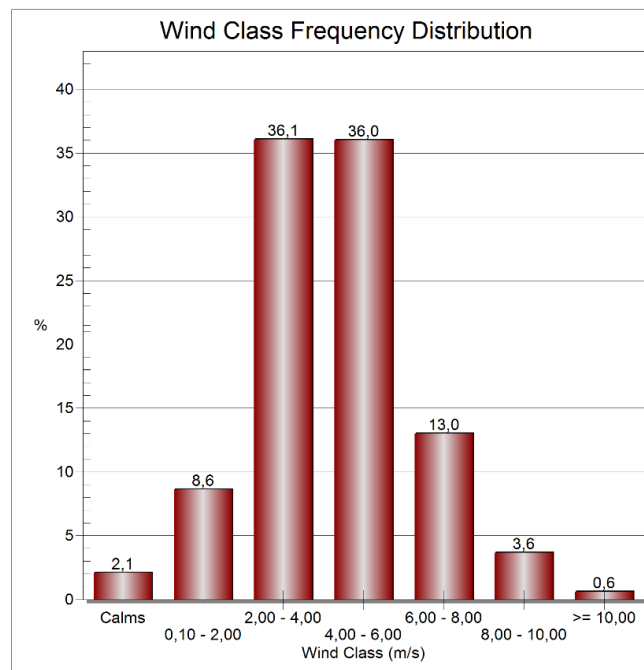
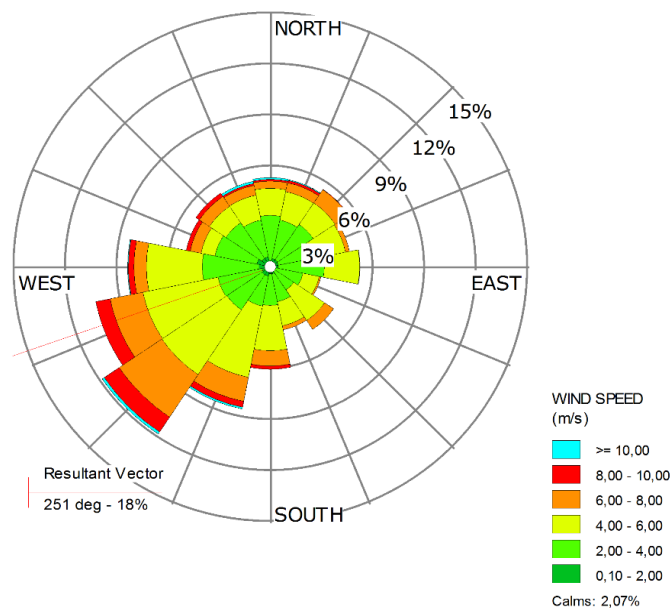
KUVIO 8 Tuuliruusu ja tuulen nopeudet prosentteina koko vuodelta Udestakaupungista (MM5-aineisto, SOLIN 2016-03-09.)



KUVIO 9 Tuuliruusu ja tuulen nopeudet prosentteina lumettomalla ajanjaksolla Udestakaupungista (MM5-aineisto, SOLIN 2016-03-09.)



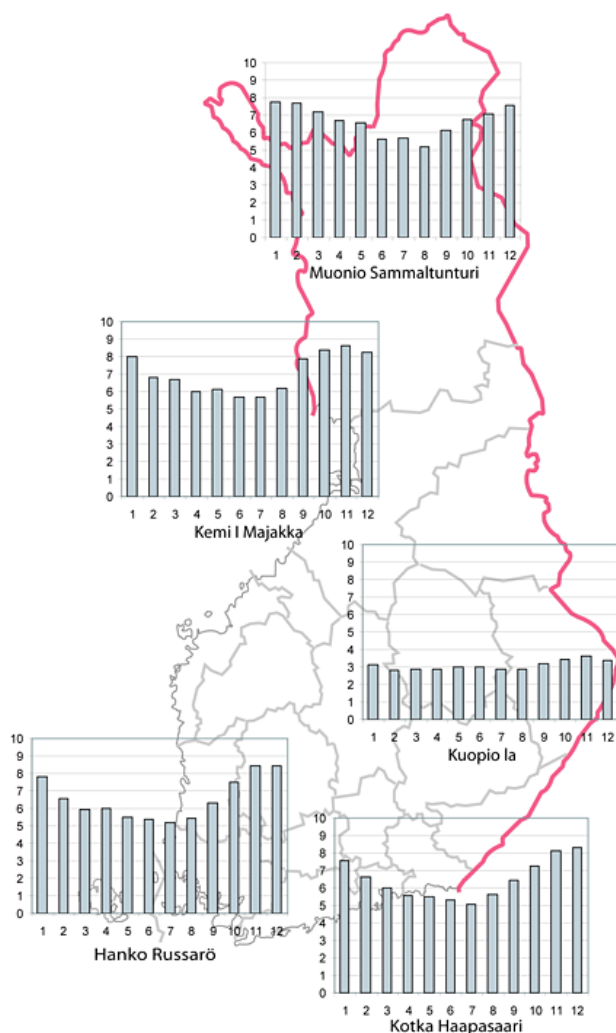
KUVIO 10 Tuuliruusu ja tuulen nopeudet prosentteina koko vuodelta Vaasassa (MM5-aineisto, SOLIN 2016-03-09.)



KUVIO 11 Tuuliruusu ja tuulen nopeudet prosentteina lumettomalla ajanjaksolla Vaasassa (MM5-aineisto, SOLIN 2016-03-09.)

Tuuliruusujen perusteella Suomessa koko vuonna tuuli on puhaltanut eniten etelän ja lännen välistä tuulta. Tuulen keskinopeus on vaihdellut tyynestä yli 10 m/s ja prosentuaalisesti eniten on tuullut 2 - 6 m/s. Rannikkokaupungeissa Uudessakaupungissa ja Vaasassa tuulen nopeus on ollut suurempaa kuin sisämaan kaupungeissa. Rannikkokaupungeissa tuulen nopeus on prosentuaalisesti puhaltanut eniten kohtalaista tuulta 4 - 6 m/s. Sisämaan kaupungeissa, Kouvolassa, Jyväskylässä ja Rovaniemellä tuuli on puhaltanut prosentuaalisesti eniten 2 - 4 m/s tuulta, joka vastaa heikkoa/kohtalaista tuulen nopeutta. Pohjois-Suomen ja Etelä-Suomen kaupungeissa, Rovaniemi ja Kouvola tuulen nopeuksilla ei ole huomattavaa eroa. Molemmilla paikkakunnilla tuuli on puhaltanut eniten 2 - 4 m/s koko vuonna ja lumettomalla ajanjaksolla. Tuuli on myös puhaltanut molemmilla paikkakunnilla eniten etelän ja lännen välistä tuulta.

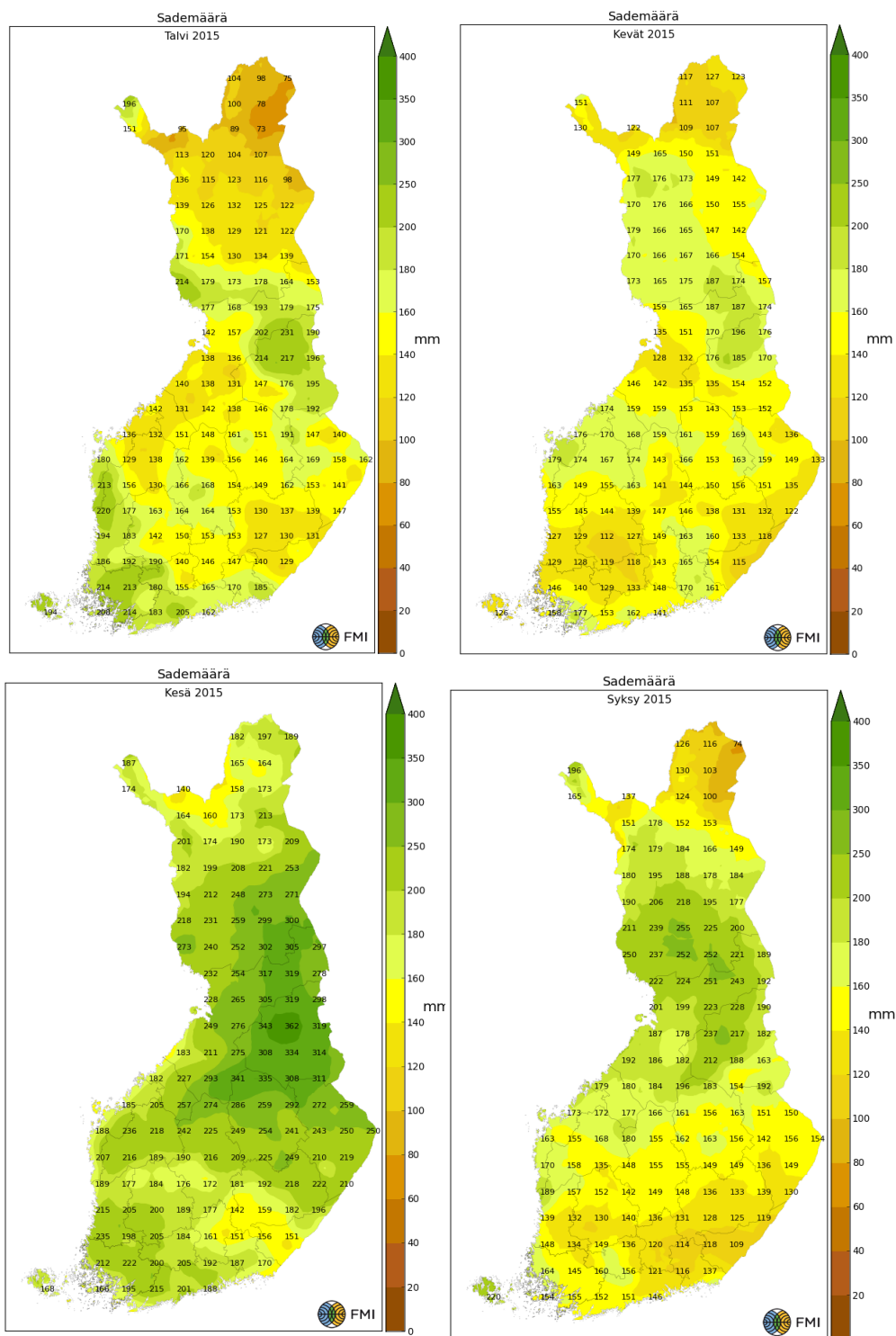
Kuvassa 3 kuvattuna Suomen tuuliatlaksen tekemä laskelma tuulen kuukausikeskiarvoista eri paikkakunnilla. Taulukoista huomaa, että rannikolla ja Muoniossa tunturin päällä tuulen nopeus on suurempi kuin sisämaassa. Kuopiossa tuulen keskinopeus on joka kuukausi alle 4 m/s. Talvikuukausina tuulen nopeus rannikolla on suurempaa kuin kesäisin. Esimerkiksi Hangon Ruissarössä huhtielokuussa tuulen keskinopeus jää alle 6 m/s ja talvikuukausina loka-tammikuussa tuulen nopeus on yli 7 metriä sekunnissa.



KUVA 3 Tuulen nopeuden kuukausikeskiarvon vaihtelu (m/s) eräillä Ilmatieteen laitoksen sääasemilla (Tuuliatlas.fi.)

2.3.5 Sade ja maaperän kosteus

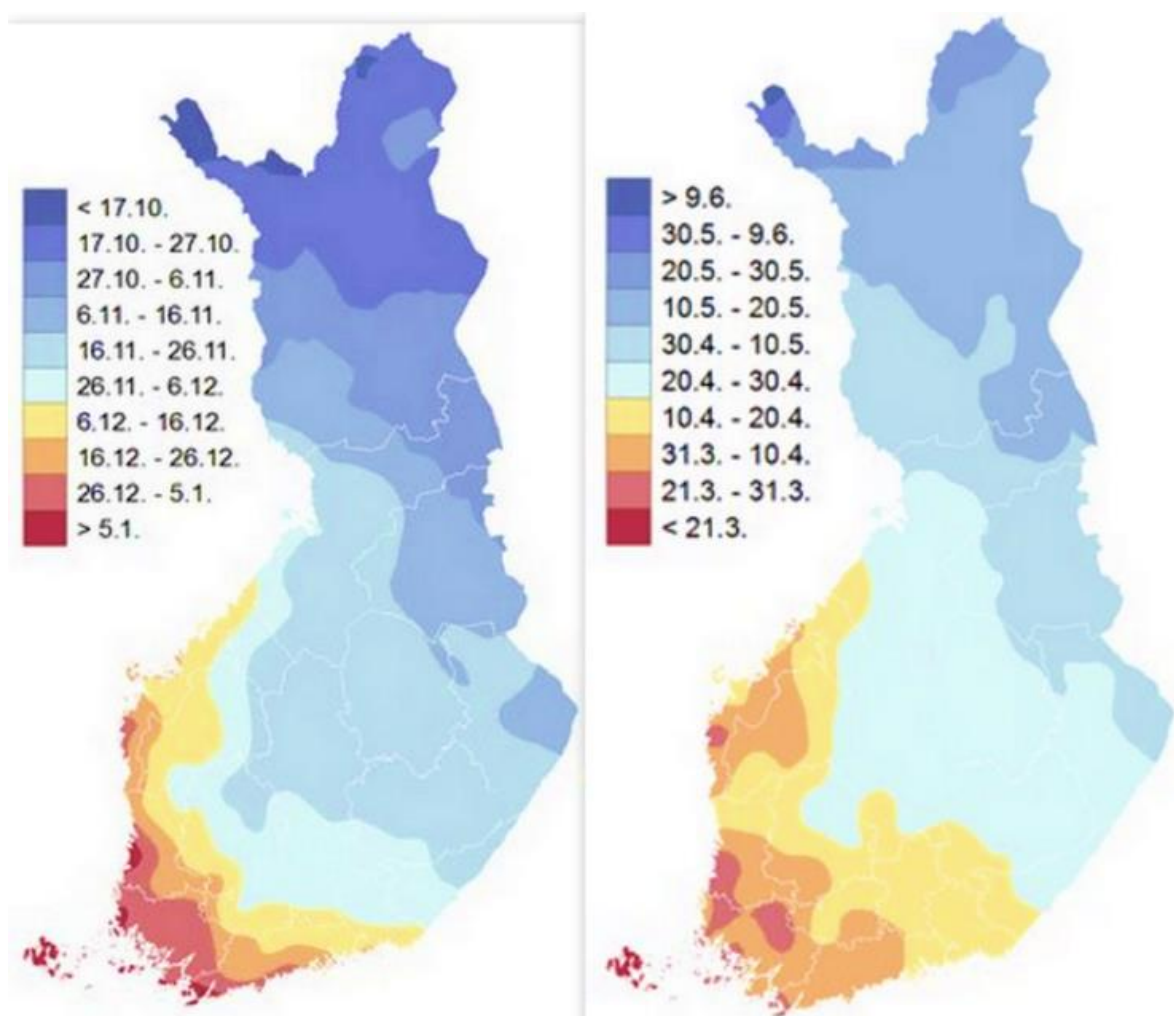
Maaperän kosteus vaikuttaa materiaalin pölyämiseen. Kosteus sitoo hiukkasia tiiviimmin yhteen, jolloin ne eivät pääse leviämään yhtä helposti irtonaisina hiukkasina tuulen mukana. Laskettaessa pölypäästöjen vuotuista määrää laskuista jätetään huomioimatta päivät, jolloin vettä on satanut yli 0,25 mm päivässä. Tämän määrän katsotaan riittävän sitomaan hiukkaset maanpintaan. (Geologian tutkimuskeskus, Tutkimusraportti 199 2013, 49.) Kuvassa 4 on esitetty vuoden 2015 keskimääräiset sateet vuodenajoinnain.



KUVA 4 Vuoden 2015 keskimääräiset sateet (Ilmatieteenlaitos.fi.)

2.3.6 Lumipeite

Pysyvällä lumipeitteellä tarkoitetaan ajanjaksoa, jolloin maassa on vähintään 1 cm lunta yhtäjaksoisesti tietyn aikaa. Lumipeite sataa maahan eri aikaan eri puolille Suomea. Lapin tuntureille ensimmäiset ehjät lumipeitteet satavat jo syys-lokakuussa ja rannikolla vasta marraskuun aikaan. Kuvassa 5 on esitetty pysyvän lumen sataminen maahan eri alueilla Suomessa pysyvän lumen sulaminen Suomessa. Kuvissa vertailu ajankohtana on käytetty vuosien 1981 - 2010 tilastoja. Kuten kuvista huomaa, rannikolla ja Etelä-Suomessa pysyvä lumipeite on yleensä maassa joulukuusta maaliskuuhun. Keski- ja Itä-Suomessa lumipeite sataa marraskuun aikana ja sulaa pois huhtikuun lopulla. Lapissa lumipeite pysyy maassa noin 7 kuukautta sataen maahan lokakuun lopussa ja sulaen pois vasta toukokuun aikana. (Ilmatieteenlaitos.fi.)



KUVA 5 Pysyvän lumipeitteen a) satamisen ja b) lähtemisen ajankohta vertailukaudella 1981–2010 (Ilmatieteenlaitos.fi.)

2.4 Maanpinnan rosoisuus

Maanpinnan rosoisuudella, eli maaston muodoilla ja alustatyypillä on suuri vaikutus ilmamassan virtauksen nopeuteen ja suuntaan. Maanpinnan muodon vaihtelu synnyttää kitkaa ilmavirtaukseen, joka hidastaa tuulta maanpintaa lähestyttäessä. Alustatyypin rosoisuus määritetään alustan ominaisuuksien mukaan ja sitä kuvataan **rosoisuus parametrilla z_0** , jonka yksikkö on metri. Jyrkkäseinäiset rinteet ja korkeiden metsien reuna-alueet ja kaupungit ovat hyvin rosoisia alustatyyppejä, joiden z_0 -arvo on suuri. Pienen rosoisuusarvon (z_0) omaavat vesi, lumi- ja jääpeitteet. Rosoisuus voi vaihdella myös vuodenajan mukaan, esimerkiksi talvisin peltojen pinta on hyvin tasainen, kun taas kesäisin pinta on rosoinen viljan kasvun myötä. Taulukossa 5 on kuvattu eri maastotyyppien z_0 -arvoja. (tuuliatlas.fi, tuulivoimayhdistys.fi.)

TAULUKKO 5 Maanpinnan rosoisuuden arvoja z_0 (tuulivoimayhdistys.fi.)

maastotyyppi	rosoisuus z_0 (m)
Tyyni sisäjärvi	0,000023
Tasainen meren jää	0,0004
Rikkonainen meren jää	0,0015–0,004
Laaja peltoaukea	0,03
Luminen laaja peltoaukea	0,03
Viljapelto (vilja 60 cm)	0,2–0,9
Metsä / rannikko	0,3–3
Täysikasvuinen havumetsä	1,5
Suurten kaupunkien keskusta	1–3

3 HAJAPÖLYPÄÄSTÖJEN MUODOSTUMINEN KIINTOAINEKASASTA

3.1 Tuulen vaikutus hiukkasten liikkumistapaan

Tuuli liikkuu normaalisti vaakasuunnassa tasaisesti, kun se osuu karkeaan maahan, sen nopeus hidastuu ja tuulen energia saa maassa olevat hiukkaset ja hiekanjyvät liikkumaan. Hiukkasilla on kolme eri vaihetta tuulessa liikkuessaan. Ensimmäinen ne irtoavat maaperästä tuulen vaikutuksesta ja tämän jälkeen liikkuvat ja pyörivät tuulen mukana riippuen tuulen voimakkuudesta, sitten kun tuulen voimakkuus ei enää jaksaa liikuttaa partikkeleita ne pysähtyvät ja kerrostuvat maanpinnalle ja pinnalle muodostuu aaltomaisia muodostelmia. (KUVA 6; Kok 2012, 4–20; MacDougall ja Uhl 2002.)



KUVA 6 Tuulen aiheuttamia muodostelmia maanpinnalla (Physicalgeography.net.)

Suurimmat vaikuttavat tekijät hiukkasten liikkuvuuteen ja pölyämiseen ovat tuulen nopeus, ilman kosteus ja hiukkaspartikkelien koko, myös maaperän karkeus ja kosteus vaikuttavat pölyämiseen. Eri materiaaleille voidaan määrittämään kriittinen- ja rajatuulen nopeus. Kriittinen tuulen nopeus (critical wind speed) kuvaa tilannetta, jossa tuulen vaikutuksesta hiukkanen lähtee vierimään kasan pinta pitkin. Rajanopeus (threshold wind speed) kuvaa nopeutta, jossa hiukkanen irtoaa maanpinnasta ja lähtee kulkeutumaan tuulen mukana. Hiukkasen irtoamiseen maanpinnasta tuulivoimakkuuden ja hiukkaskoon lisäksi vaikuttavat painovoima ja hiukkasten väliset koheesivoimat. Maanpinnalla oleva hiukkanen irtoaa maasta ja lähtee virtauksen mukaan, kun se kääntyy pisteen P yli (KUVIO 12). Tämä tapahtuu hetkellä, kun ilmanvastus (F_d) ja aerodynaaminen noste (F_L) ylittää hetkellisesti hiukkasten välisen voiman (F_{ip}) ja painovoiman (F_g). Kaavalla 1 voidaan laskea tämä irtoamishetki. r_d , r_g ja r_{ip} ovat hiukkasen momettivarsia ja verrannollisia hiukkasen halkaisijaan.

$$r_d F_d = r_g * (F_g - F_L) + r_{ip} F_{ip} \quad (1)$$

Jossa

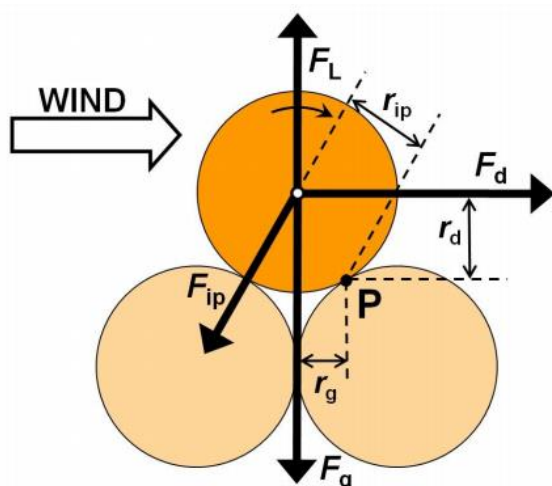
r_d , r_g ja r_{ip} = hiukkasen momettivarsia

F_d = ilmanvastus

F_L = aerodynaaminen noste

F_{ip} = hiukkasten välinen voima

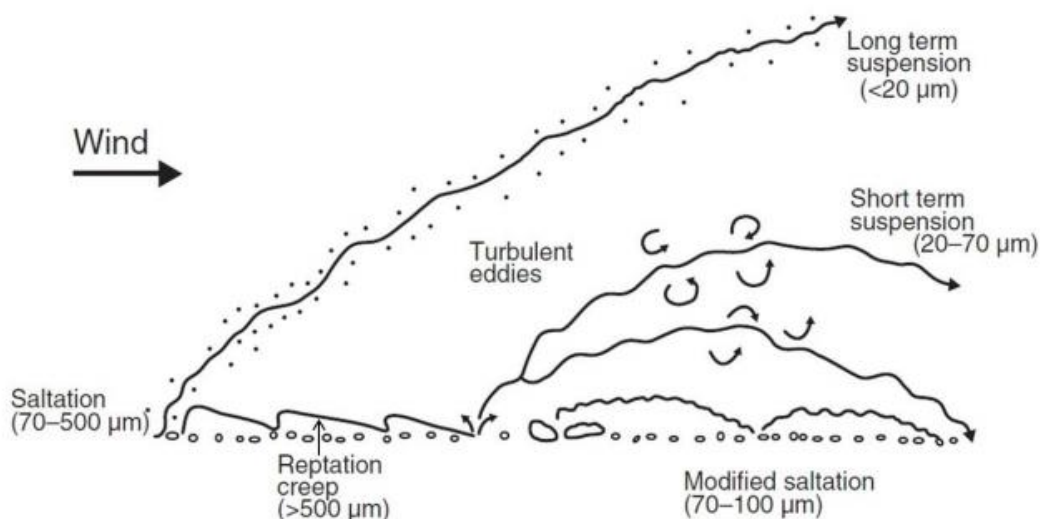
F_g = painovoima. (Kok 2012, 12.)



KUVIO 12 Voimat, jotka vaikuttavat hiukkasen irtoamiseen maanpinnasta. (Kok 2012, 11.)

Hiukkasten liikkuminen tuulen mukana voidaan jakaa karkeasti kolmeen erityyppiseen liikkumiseen (Kok 2012, 4–20; MacDougall ja Uh 2002.)

- a) Vieriminen (surface creep), jolloin hiukkaset vierivät maanpintaa pitkin, mutta eivät irtoa maan pinnasta. Vieriminen loppuu, kun hiukkaset kerääntyvät suurempiin kasoihin, pysähtyvät maanpinnassa oleviin koloihin, tai tuulen nopeus heikkenee niin, ettei nopeus riitä siirtämään partikkeleja. Vierimistä tapahtuu tyypillisesti yli 500 μm kokoisille hiukkasille.
- b) Saltaatio (saltation), jossa hiukkaset lennähtävät tuulen mukana pieniä matkoja ilmassa ja iskeytyvät takaisin maanpintaan. Mitä korkeammalta hiukkanen iskeytyy takaisin maahan, sitä enemmän se saa energiaa irrottaakseen maaperästä lisää hiekanjyviä ja pölyäviä hiukkasia. Saltaatiota tapahtuu tyypillisesti noin 70 - 500 μm kokoisille hiukkasille.
- c) Suspensio, jossa aivan pienimmät hiukkaset irtoavat maaperästä tuulen mukaan ja lentävät jonkun matkaa tuulen vaikutuksesta. Suspensio voidaan jakaa lyhyen matkan ja pitkän matkan suspensioon. Lyhyen matkan suspensioon osallistuvat tyypillisesti 20 - 70 μm kokoiset hiukkaset, jotka kulkeutuvat tuulen mukana turbulenttisissa tuulen virtauksissa. Pitkän ajan suspensiossa alle 20 μm kokoiset hiukkaset voivat pysyä ilmakehässä muutamia viikkoja ja lentää tuulen mukana jopa tuhansia kilometrejä. Tuulen mukana kulkevat pölypäästöt ovat pääosin suspensiossa olevia hiukkasia. (Kok 2012, 11–20; MacDougall ja Uh 2002.)

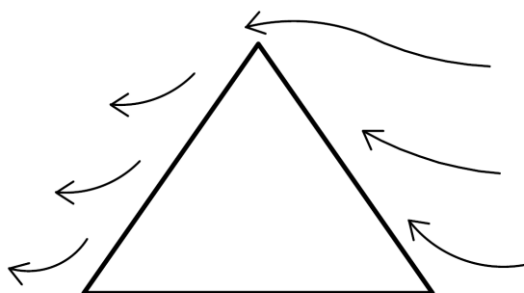


KUVA 7 Hiukkasten liikkumistapoja tuulen mukana. (Kok 2012, 5.)

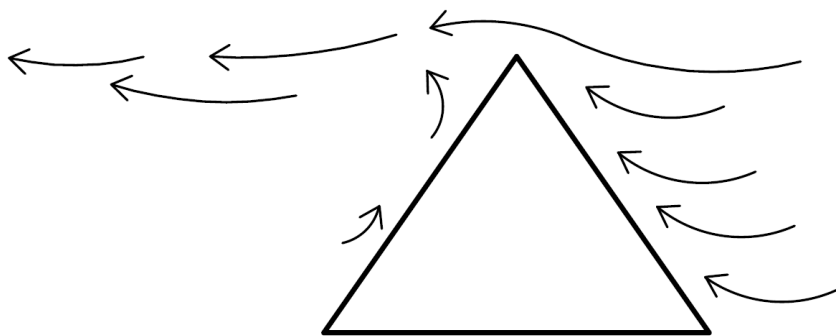
Kuvassa 7 on kuvattu tarkemmin hiukkasten tapoja liikkua tuulen mukana. Myös maalaji ja sen kosteus vaikuttavat siihen, millä tavoin hiukkaset irtoavat maaperästä ja liikkuvat. Niiden liikkumista ei voida jakaa suoraan näihin kolmeen eri tapaan, vaan yleensä maaperän pölyäminen ja liikkuminen tapahtuvat kaikilla tavoilla yhtä aikaa. Saltaation suuri vaikutus tuulieroosioon ja pölyävyyteen johtuu siitä, kun ilmalennosta tulevat suurhiukkaset iskeytyvät takaisin maahan. Tällöin hiukkaset heilauttavat maanpintaa syvemmältä, jolloin siitä irtoaa lisää pölyäviä hiukkasia, jotka lähtevät pölypäästöinä kulkeutumaan tuulen mukana. Hiukkasten iskeytyessä maahan ne voivat myös hajottaa toisia partikkeleja, jotka puolestaan saltaatoituvat tuulen mukaan. (Kok 2012, 11–20; MacDougall ja Uh 2002.)

3.2 Varastointikasojen hajapölypäästöt

Tuuli saa aikaan avoimien, suojaamattomien kasojen pölyämistä. Kasojen muoto ja korkeus vaikuttavat niiden pölyämiseen. Paavo Ristola Oy:n tekemässä selvityksessä on mainittu, että 1:7 sivukaltevuus kivihiilikasoissa on hyvä pölyhaittojen vähentämiseksi. (Insinööritoimisto Paavo Ristola Oy 1991, 2–4.)



KUVA 8 Pölypäästön syntyminen hiilikasasta alhaisen ja kohtalaisen tuulen nopeudessa (alle 10 m/s.). (Insinööritoimisto Paavo Ristola Oy 1991, 4.)



KUVA 9 Pölypäästö syntyminen hiilikasasta suurilla tuulen nopeuksilla (yli 10 m/s). (Insinööritoimisto Paavo Ristola Oy 1991, 4.)

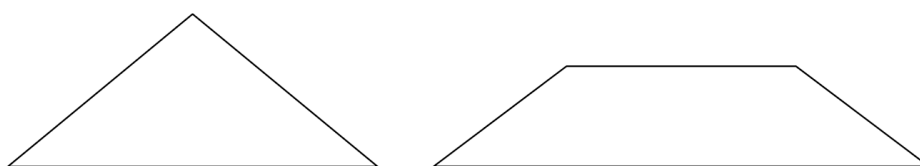
Kuvissa 8 ja 9 on kuvattu pölypäästöjen syntymistä hiilikasoista eri tuulen nopeuksilla. Kuvassa 8 alhaisilla tuulen nopeuksilla päästöt eivät leviä yhtä pitkälle kuin kuvan 9 tilanteessa. Kuvassa 9 on kuvattuna yli 10 m/s tuulen vaikutus pölypäästöjen syntyyn. Tällöin tuuli tarttuu navakammin kasan pintaan ja irrottaa kasan pinnasta hiukkasia mukaansa. Tuuli aiheuttaa myös tuulensuojaiselle puolelle turbulenttisia virtauksia, joiden mukana pölyä irtoaa enemmän. Kasan hajapölypäästö on suurempi kuin pienemällä tuulen nopeudella. (Insinööritoimisto Paavo Ristola Oy 1991, 2–4.)

Kaivostoiminnassa varsinaisen tuotteen saavuttamiseksi joudutaan usein poistamaan kaivoksista myös sivukiveä. Avolouhinnassa sivukiven määrä voi jopa ylittää varsinaisen tuotteen louhintamäärän. Sivukivien hyötykäyttömahdollisuudet riippuvat paljon kivien laadusta. Sivukivikasoja voidaan välivarastoida kaivosalueelle myöhempää hyödyntämistä varten. Hyötykäyttöön kelpaamaton sivukivi kasataan yleensä lohkaraina ja suurina kivenä kaivosalueelle sivukiville tarkoitetulle läjitysalueelle. Sivukivikasojen lohkaraiden suuruuden takia pölyämistä ei usein pidetä merkittävänä. Kuitenkin lohkaraiden pinnalle voi jäädä louhinnan yhteydessä irronnutta hienorakeista pölyävää mineraaliainesta. Sivukivet rapautuvat myös helpommin pintakerroksen puuttumisen takia. Kaivosten sivukivikasat ovat yleensä hyvin korkeita, joka lisää tuulieroosion vaikutusta kasojen pölyävyyteen ja kaivosten pölyhaittojen syntymiseen. Kaivosten pölyhaittoja syntyy sivukivikasojen lisäksi kuljetuksen yhteydessä ajoteiltä, kentiltä, renkaista ja kuorma-autojen lavoilta. Tuulen mukaan lähtevä mineraalipöly vastaa koostumukseltaan pääasiassa hienoksi jauhautunutta sivukiveä, joka voi sisältää mm. metalleja, puolimetalleja, rikin yhdisteitä tai kuitumaista asbestipölyä. Mineraalipölyn haitallisuus terveydelle riippuu haitta-aineiden määrästä ja laadusta ja hiukkasten koosta (hengitettävät hiukkaset). (opasnet.org; Geologian tutkimuskeskus Tutkimusraportti 199 2013, 47–50.)

3.3 Tuulen kehittyminen kasan pinnalla

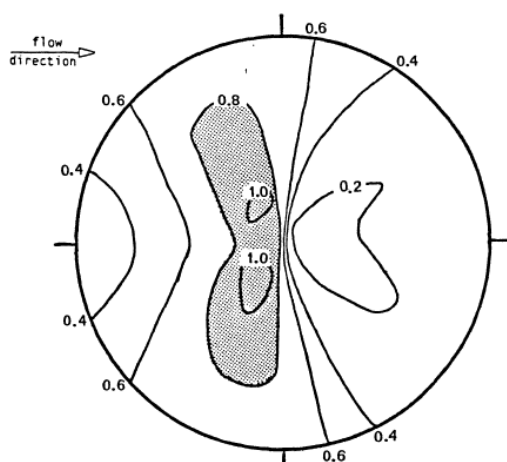
Päästöjen syntyyn varastokasoista vaikuttavat eniten varastoidun materiaalin irtotiheys, kasan pinnalle syntyvä ”kuorimainen” rakenne, materiaalin kosteuspiitoisuus, hiukkasten kokojakauma ja kasan geometria. Merkittävimmät hajapölypäästöjen syntyyn vaikuttavat tekijät ovat kuitenkin tuulen nopeus ja saltaation vaikutuksesta tulevat hiukkaset. (Badr ja Harion 2005, 5576–5584.)

Billman ja Arya ovat tutkineet tuulen nopeuden muutosta kasan pinnalla tutkimuksessa Windbreak Effectiveness for Storage Pile Fugitive Dust Control: A Wind Tunnel Study ja Storage Pile Wind Erosion 1988. Tutkimuksissa oli kaksi erimuotoista kasaa, toinen kasa on ollut kartiomainen ja toinen aumamainen jonka korkein kohta on tasainen (KUVA 10). Kasat ovat olleet 11 metriä korkeita ja niiden sivujen kaltevuus on ollut 37°. Kasojen pinnan rosoisuus (z_0) on ollut 0,5 senttimetriä.

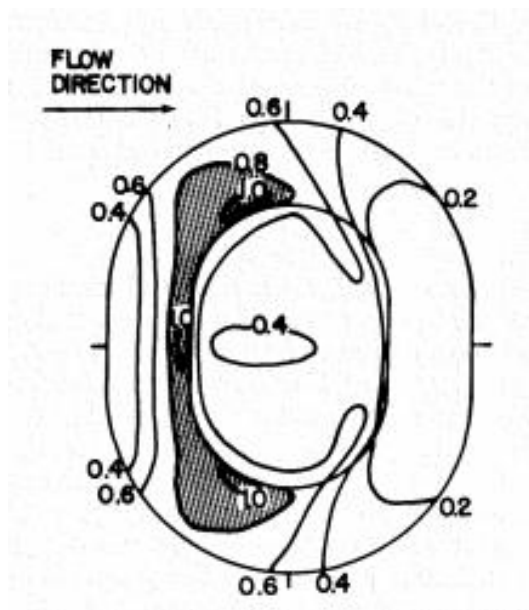


KUVA 10 Tutkimuksessa käytettyjen kasojen muodot (Billman ja Arya 1988.)

Kuvissa 11 ja 12 on esitetty tuulen nopeuksia muutoksia erikohdissa kasan pintaa. Kuvissa tuuli puhaltaa kasoihin vasemmalta oikealle. Luvut kuvaavat kasan pinnan tuulen nopeuden suhdetta alueella vallitsevaan tuulen nopeuteen 10 metrin korkeudella. (kasan pinnan tuulen nopeus(u) /alueella vallitseva tuulen nopeus (u_r .) Tutkimuksissa pintatuuli vastaa noin 25 senttimetrin korkeudessa olevaa tuulta kasan pinnasta. 10 metrin korkeuden tuulen nopeus on valittu vallitsevaksi tuulen nopeudeksi, koska sitä käytetään yleisesti ilmatieteenkirjallisuudessa ja -mittauksissa pintatuulen nopeutena. (Billman ja Arya 1988, 2–51.)

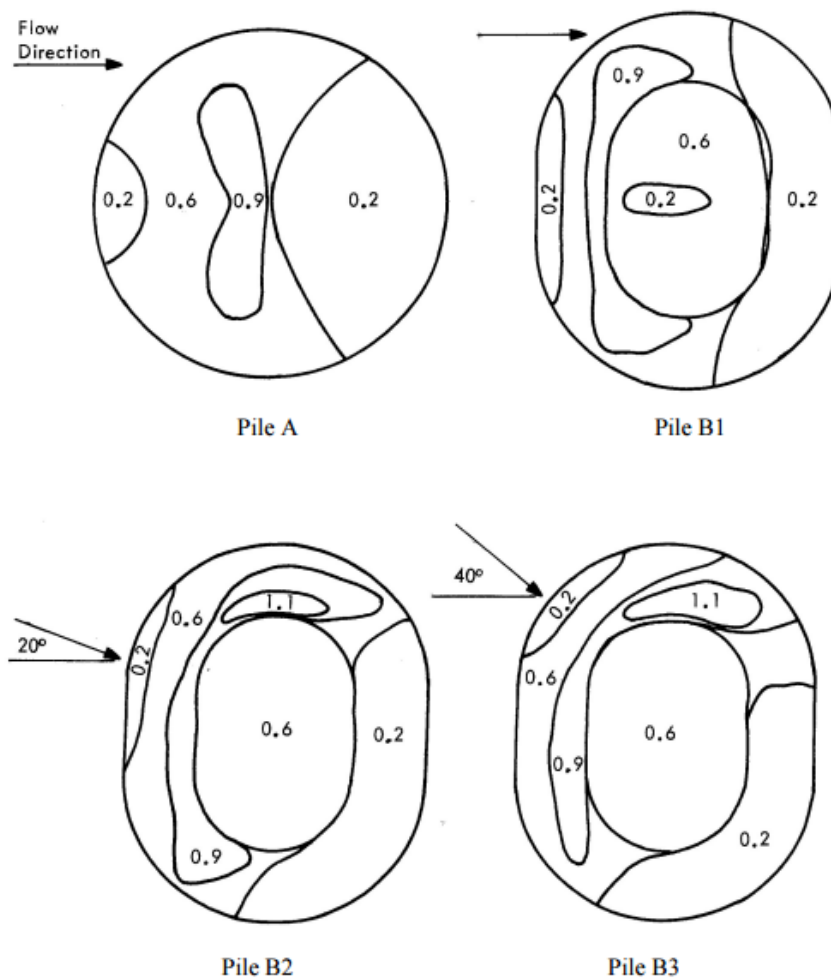


KUVA 11 Tuulen nopeusalueet kartionmuotoisen kasan pinnalla (u/u_r) (Billman ja Arya 1988, 52.)



KUVA 12 Tuulen nopeusalueet aumamaisessa, päältä tasaisessa kasassa (u/u_r) (Billman ja Arya 1988, 55.)

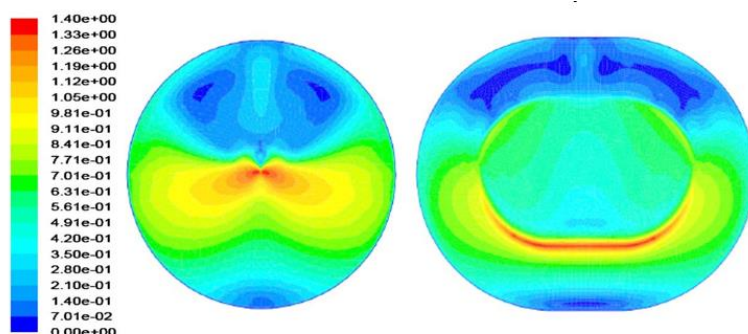
Molempien kasojen maksimituulen nopeudet olivat kasojen tuulen puoleisilla reunoilla yläosassa, jossa suhdeluku on 1. Maksimituulen nopeus levittäytyy kasan yläosassa sivuille päin, koska virtaus kiihtyy tuulen sivuuttaessa ja kiertyessä kasan yli. Kasa halkaisee tuulen virtaukset ja näin tuulen suojan puolelle syntyy pyörteisen tuulen alue, jossa tuulen nopeus on pieni. Tuulen nopeus on pienintä kasan tuulensuojaisella puolella sekä aumamaisen kasan päällä olevalla tasaisella alueella. (Billman ja Arya 1988, 2–51.)



KUVA 13 Kasan pintatuulen nopeuden suhde alueella vallitsevaan tuulen nopeuteen 10 metrin korkeudessa u_s/u_r , a) kartiomainen kasa ja b1–b3) aumamainen kasa eri tuulen suunnilla (U. S. EPA. AP 42 2016b.)

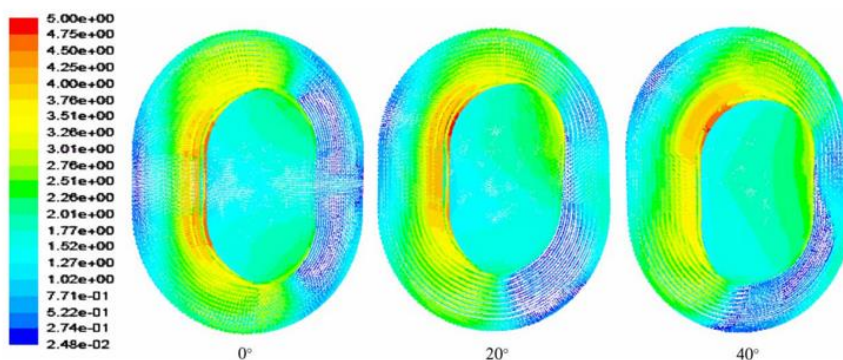
Kuvassa 13 on esitetty myös tuulen muuttumista kasojen pinnassa. Kuvassa on esitetty kartiomaisen ja aumamaisen kasan tuulialueita. Aumamaisissa kasoissa tuulen suuntaa on muutettu ja tutkittu, kuinka se vaikuttaa tuulen nopeuteen kasan pinnalla. Kartiomaisessa kasassa tuulen maksiminopeus on suurinta kasan tuulen puoleisella sivulla aivan kasan yläosassa, jossa tuuli puhaltaa kohti kasaa. Suuren tuulen nopeuden alue ulottuu harjanteen molemmille puolille, myös aivan kasan yläosaan tuulensuojaiselle puolelle. Tuulen nopeus on pienin kasan tuulensuojaisen puolen alaosassa. Aumamaisessa kasassa tuulen nopeudet käyttäytyvät samoin kuin kartiomaisessa kasassa, mutta tuulen toiseksi hitain alue on kasan päällä. Tilanteissa, joissa tuuli puhaltaa aumamaisiin kasoihin 20° ja 40° kulmissa kasan päälle ei jää enää hitaamman tuulen aluetta (KUVA 13). Näissä tilanteissa myös tuuli ottaa voimakkaammin kasan pintaan, suhde luvun ollessa 1,1 kasan päädysssä. Suoraan päin kasaa tulevan tuulen maksimi suhdearvo on 0,9. (Billman ja Arya 1988, 2–51; U. S. EPA. AP 42 2016b.)

Badr ja Harion (2005) ovat mallintaneet tuulen ja pölypäästöjen syntyä varastokasoissa. Kasan pinnan tuulen nopeuden arvioinnissa on käytetty tukena jo olemassa olevia tutkimuksia tuulen kehitymisestä kasan pinnalla. Näin on saatu luotettavampia tuloksia mallintamista varten. Mallinnus ennustaa paineen lievää nousua, kun tuuli lähestyy kasoja ja samalla tuulen nopeus kasan alaosassa laskee. Tämä nopeuden aleneminen kasan alaosassa johtaa myös hiekan kulkeutumiskapasiteetin pienentymiseen, joka taas vähentää päästöjä alaosasta kasaa. Kasan huipun läheisyydessä ilmavirtaukset kääntyvät kasan pinnan mukana, kun taas kasan yläpuolella ne jatkavat alkuperäistä liikesuuntaa. Ilma ei puristu kokoon kasan ympärillä, vaan jatkaa matkaa kohti huippua virtausnopeuden kasvaessa ja vastaavasti paineen pienetessä. Molemmille kasatyypeille tuulieroosiolle herkimmät alueet ovat tuulen puoleiset rinteet yläosat (KUVA 14).



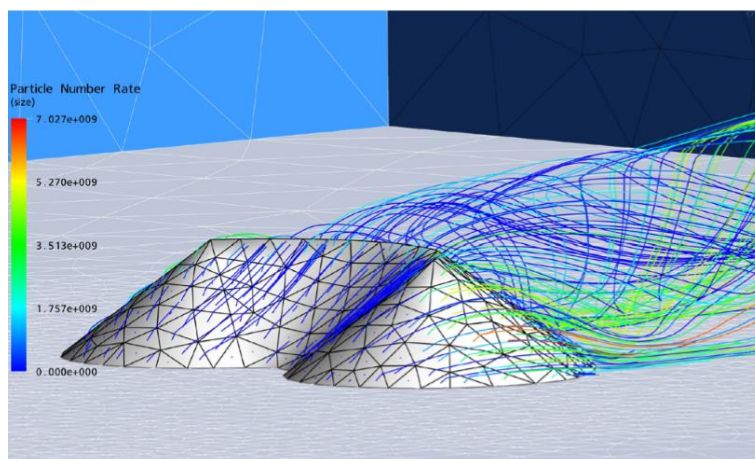
KUVA 14 Mallinnetut tuulen nopeudet kartion muotoisen ja auman muotoisen kasan pinnassa (Badr ja Harion 2005, 5585.)

Tutkimusten mukaan tasapäälyksisen aumamaisen kasan pölypäästöt ovat kasan yläosassa pienempiä kuin kartiomaisen kasan. Tämän oletetaan johtuvan äkillisestä paineen laskusta teräväharjaisessa kasassa, jonka seurauksena virtaus sekoittuu ja tuulen mukaan irtoaa hiukkasia kasan pinnasta. Kasan tuulensuojan puoleisiin virtauksiin vaikuttavat kasan geometria, tuulen suunta ja tuulen voimakkuus. Kiihtyvä virtausnopeus ja paineen muutokset kasan ylämentäessä voi aiheuttaa tuulensuojaiselle puolelle pyörteisiä virtauksia. (Badr ja Harion 2005, 5582.) Kuvassa 22 on esitetty tuulen nopeuden muutosta tasapäälyksisestä kasasta 0° , 20° ja 40° kulmassa. Tuulen tulokulman muuttuessa kohti kasaa, kasan takapuoleiset pyörteiset virtaukset muuttuvat, mitä suuremmasta kulmasta tuuli tulee, sen suuremmaksi tuulen nopeuden arvot kasan pinnalla kasvavat (KUVA 15).



KUVA 15 Tietokonepohjaisesti mallinnetut tuulen nopeudet aumamaisen kasan pinnassa 0° , 20° ja 40° tulokulmassa (Badr ja Harion 2005, 5582.)

Diego ym. (2009) ovat arvioineet tuulen nopeuden vaikutusta pölypäästöjen syntyyn avoimista varastokasoista CFD-mallinnuksella. Pääkohtina tutkimuksessa on ollut ensin määrittää tuulen virtausanalyysi ja sen jälkeen syöttää päästöarvot tuulen virtausmuodostelmiin. Päästökertoimien saamiseksi on käytetty erilaisia laskukaavoja. (Diego ym. 2009, 3197–3207.) Kuvassa 16 on esitetty kassasta tuulen mukana irtoavien hiukkasten määrää. Suurimmat hiukkaspäästöt on lähtenyt kasan sivuilta punaisten ja keltaisten viivojen alueelta. Pienimmät päästöt ovat tulleet kasan etupuolelta ja tuulensuojaiselta puolelta, nämä ovat kuvattuina sinisellä värillä kuvassa.



KUVA 16 Pölypäästöjen synty CFD-ohjelmistolla laskettuna (Diego, Pelegry, Torno, Torano ja Menendez 2009, 3197–3207.)

4 KIINTOAINEN/PÖLYN EMISSIOPOTENTIALIN MÄÄRITYSMENETELMIÄ

4.1 Päästökertoimien määrittäminen

Kirjallisuuslähteistä löytyneitä jo tehtyjen tuulitunnelikokeiden päästökertoimen määrittämissä tarkastellaan. Kirjallisuusselvityksestä pyritään saamaan tieto, miten materiaalit on asetettu tuulitunneliin ja millaisia tuulen nopeuksia tuulitunneleissa on käytetty. Tarkoituksena on löytää sopiva tapa tehdä tuulikammikokeet ja suunnitella koejärjestelyt Rambollin tuulikammioon.

Chow, Gilles ja Nickling ovat käyneet työssään *Resuspension of Particles by Wind*, 1996 läpi tuulitunnelitesteillä tehtävää päästökerroinmäärittäystä. Chow ym. (1996) toteavat, että siirrettävän tuulitunnelin ominaisuudet täytyy määrittää hyvin, jotta hiukkasten liikkumista ja päästökertoimia voidaan mallintaa onnistuneesti. Tunnelista pitää mallintaa (turbulent boundary) turbulenttien sijainnit ja rajakodat, sekä tuulen nopeusprofiili tunnelissa, joka kuvaa tuulen luonnollista korkeutta maanpinnalla. Tuulen kitkanopeus (u^*) ja pintaleikkausjännitys (τ_0) ovat tärkeimpiä muuttujia tuulitunnelitesteissä. Kynnyskitkanopeus (u_{*1} , m/s^{-1}) tulee määrittää, jotta voidaan laskea päästökertoimet eri materiaaleille. Kitkanopeus on laskennallinen arvo, joka kuvaa hetkeä, kun hiukkaset ja hiekanjyvät irtoavat ilmavirtauksen mukaan ja lähtevät vierimään ja pomppimaan. Kitkanopeus riippuu tuulen nopeudesta ja pinnan karkeudesta, mitä karkeampaa tutkittava kiviaines on, sitä pienempi kitkanopeuden arvo on.

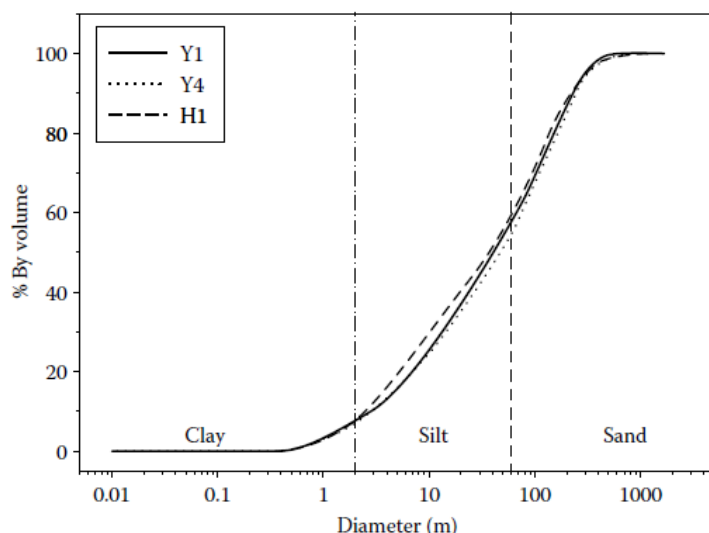
Tuulitunnelikokeissa vaakasuoraa virtausta tutkittaessa voidaan tutkia hiukkasten kolmea eri liikku mistapaa, vieriminen, saltaatio ja suspensio ja näiden yhtäaikaisesta käyttäytymisestä aiheutuvia pölypäästöjä. Kun halutaan tutkia suspensiota ja leijuviin hiukkasten määrää sekä kokoa on kiinnitettävä huomiota myös tuulitunnelin pystysuuntaisiin virtauksiin. Tutkittavan maalajin ominaisuudet vaikuttavat päästöjen syntyyn ja siihen, kuinka tuulieroosio vaikuttaa materiaalin pintaan luonnossa. Näitä ominaisuuksia ovat esimerkiksi materiaalin kosteus, maanpinnan rosoisuus, maaperän koostumus, raekokojakauma, lämpötila ja kuinka häirittyä maaperä on. Nämä asiat on hyvä tietää tutkitavasta materiaalista ennen tuulitunnelimittausten tekoa. (Chow, Gilles ja Nickling 1996.)

4.1.1 Sulfidimalmikaivoksien jätealueiden ympäristövaikutusten tutkimukset Kanadassa, Ruotsissa ja Norjassa

Pekka Sipilän (1995) selvityksessä Sulfidimalmikaivosten jätealueiden ympäristövaikutusten tutkimukset Kanadassa, Ruotsissa ja Norjassa on kuvattu tuulitunnelin käyttöä. Tutkimuksissa on selvitetty uranikaivosten rikastamoiden jätehiekkänäytteiden pölyämistä. Testien tarkoituksena oli tutkia tasaisen ja turbulentsin tuulen ja kosteuden vaikutusta eroosioon. Käytetyn tuulitunnelin mitat olivat 9 x 2,44 metriä ja korkeus 1,22 metriä. Pohjalle asetettavan jätehiekkapatjan paksuus oli 38 millimetriä ja se oli levitetty 1,82 metriä pitkälle ja 0,92 metriä leveälle alueelle. Kokeissa määritettiin kolmella eri tuulitunneliin säädetyn ilmavirran nopeudella tuulen ja turbulenssien nopeus hiekkapatjan pinnalla. Käytetyt nopeudet olivat 4,5 m/s, 7,5 m/s ja 9,5 m/s. Kokeissa tutkittiin myös partikkelien määrää ilmassa neljällä eri tasolla kolmessa eri kohtaa tuulitunnelia, sekä saltaatioilmiön vaikutusta jätehiekkapatjaan. Tutkimuksessa selvitettiin myös jätehiekkapatjan raekokojakaumaa ennen koetta ja kokeen jälkeen, saltaation vaikutusta raekokojakaumaan ja jätepatjan kosteuden vaikutusta pölyävyyteen. (Sipilä 1995.)

4.1.2 Tuulitunnelitestaus kultakaivoksen lietemäiselle rikastushiekalle

Mackayn ja Thidobeauxin (2011) tekemässä tutkimuksessa tutkittiin tuulikammiossa kultakaivoksen rikastushiekan PM₁₀ päästöjä ja kosteuden vaikutusta rikastushiekan pölyävyyteen. Rikastushiekka on altista kulkeutumaan tuulen mukana ja näin huonontaa ilmanlaatua alueella. Kaivosyhtiö halusi vähentää pölypäästöjä kaivosalueella kastelemalla rikastushiekkaa ja määrittää tuulitunnelin testaus-ten avulla vähimmäisvesimäärän pölyhaittojen estämiseksi.



KUVIO 13 Kultakaivoksen rikastushiekan raekokojakauma (Mackay ja Thidobeaux 2011.)

Kaivos sijaitsi autiomaassa ja maaperä sisälsi paljon hienojakoista materiaalia, savea noin 10 %, silttiä 50 % ja 40 % hiekkaa (KUVIO 13). Tutkittavat näytteet kaivettiin maasta ja jauhettiin hienomaksi ennen testien tekemistä. Näytteitä sekoitettiin veteen ja niistä tehtiin lietettä. Lietteestä pyrittiin tekemään samanlaista kuin rikastushiekka lieju kaivoksella. Testien tavoitteena oli määrittää eri tuulen nopeuksilla PM₁₀ päästöt. Mittaukset tehtiin eri tavoin käsitellylle rikastushiekalle (i) kuiva, (ii) kuiva jauhettu, (iii) kostutettu 10% ja 2% vesipitoisuus, ja (iv) häiriintyneelle näytteelle. Kokeet tois-

tettiin siten, että tuulen sekaan syötettiin samaa pölyävää materiaalia. Näin saatiin tietää hiukkasten osumisen vaikutus näytepatjaan ja pölyämiseen, tämän perusteella saatiin laskettua päästökerroin pölyämiselle E , autiomaassa hiekkamyrskyjen aikana. (Mackay ja Thidobeaux 2011.)

TAULUKKO 6 Päästöarvot eri materiaaleille, kun tunneliin puhallettiin puhdasta ilmaa. (Mackay ja Thidobeaux 2011.)

Wind Tunnel Emission Results (E , $\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) for a Clean Air Intake

U_*	0.19	0.23	0.27	0.33	0.37	0.41	0.47	0.53	0.56
U_{10m}	7.0	7.5	8.8	10.4	11.9	13.3	14.9	17.0	17.8
Pulverized Tailings									
H1	0.030	0.516	0.198	0.367	0.614	1.240	3.090	4.332	12.23
Y23	0.323	0.537	0.110	0.290	0.374	0.587	1.527	3.265	3.607
Slurry Dried then Disturbed									
H1	0.038	0.060	0.164	—	0.081	0.067	0.201	0.584	
Y23	—	—	0.074	—	0.0765	0.739	0.927	1.656	
Slurry Dried to 2% Gravimetric Water Content or Lower									
H1	0.973	1.397	1.648	2.195	2.123	2.147	2.275	2.270	
H1	0.968	1.245	1.358	1.772	1.694	2.086	3.289	2.570	
Y23	0.781	0.944	1.115	1.307	1.114	1.468	1.348	1.622	
Y23	1.087	0.899	0.827	1.065	0.881	1.032	0.969	1.148	
Slurry Dried to 10% Gravimetric Water Content									
H1	0.404	0.488	0.692	1.021	0.752	1.437	0.994	1.438	
Y23	0.443	0.224	0.084	0.170	—	0.372	—	0.216	
Y23	0.488	0.178	0.063	0.095	—	—	—	—	

TAULUKKO 7 Päästökertoimet materiaaleille, kun ilman sekaan puhallettiin hiekkaa. (Mackay ja Thidobeaux 2011.)

Wind Tunnel Emission Results (E , $\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) with Particle Feed ON

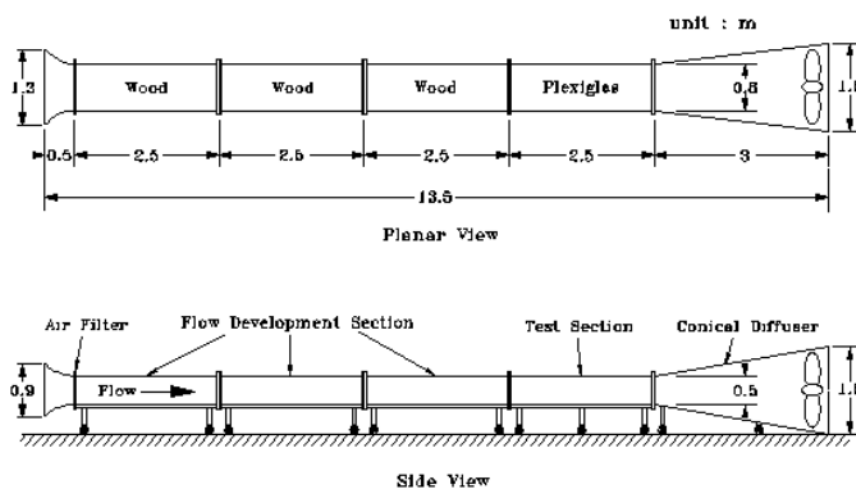
U_*	0.19	0.23	0.27	0.33	0.37	0.41	0.47	0.53	0.56
U_{10m}	7.0	7.5	8.8	10.4	11.9	3.3	14.9	17.0	17.8
Pulverized Tailings									
H1	0.592	7.65	17.17	37.26	56.87	93.98	155.7	238.9	311.1
Y23	0.541	4.57	12.62	20.10	38.41	71.57	105.0	139.8	243.4
Slurry Dried then Disturbed									
H1	0.804	1.787	5.365	6.592	13.36	16.08	31.82	43.66	
Y23	1.180	1.012	0.639	5.030	9.537	12.47	20.94	38.54	
Slurry Dried to 2% Gravimetric Water Content or Lower									
H1	1.532	1.814	2.847	2.901	3.519	2.689	1.098	—	
H1	1.715	2.279	4.272	3.747	3.716	4.547	1.905	—	
Y23	0.628	0.257	0.719	—	0.138	0.264	—	3.714	
Y23	0.745	0.300	0.756	—	0.013	0.934	—	—	
Slurry dried to 10% gravimetric water content									
H1	0.214	—	0.286	—	—	1.318	—	—	
Y23	0.231	0.127	0.330	0.491	2.125	1.103	2.969	3.827	

Taulukossa 6 on kuvattu neljän eri materiaalin (jauhettu rikastushiekka, kuivatettu liete, liete, jonka kosteuspitoisuus on 2 % ja liete, kosteuspitoisuus on 10%) päästöarvoja E, kun tunneliin syötettiin puhdasta ilmaa. Taulukossa 7 on kuvattu samojen materiaalien (jauhettu rikastushiekka, kuivatettu liete, liete, jonka kosteuspitoisuus on 2 % ja liete, jonka kosteuspitoisuus on 10 %) eroosion vaikutus materiaalien pölyämiseen. Tässä ilman sekaan on syötetty samoja materiaaleja, jolloin saadaan mallinnettua hiekkamyrskyä autiomaassa. (Mackay ja Thidobeaux 2011.)

Testien perusteella tuulen mukana olevat hiukkaset nostivat hankauksen vaikutuksesta PM₁₀ päästöjä kaksinkertaiseksi ja jos materiaali oli erittäin kuivaa päästötaso nousi 10³-kertaisesti. Kuivasta jauhetusta rikastushiekasta tulevat suurimmat pölypäästöt. Seuraavaksi eniten päästöjä syntyy kuivasta murskatusta ja mekaanisesti erotellusta rikastushiekasta. Kosteat pinnat päästivät myös pieniä määriä pölyä, mutta sellaisella tasolla, jota ei voi erottaa häiriöttömän kovan pinnan pölyämistasolta. Testien tulosten perusteella voidaan todeta, että yhtenäisen häiriintymätön kuorimainen maanpinta tuottaa vähemmän pölyä kuin kostutettu hienojakoinen hiekka. (Mackay ja Thidobeaux 2011.)

4.1.3 PM₁₀ ja PM_{2,5} päästöjen määrittäminen kuivuneen järven maaperästä tuulitunneli kokeella

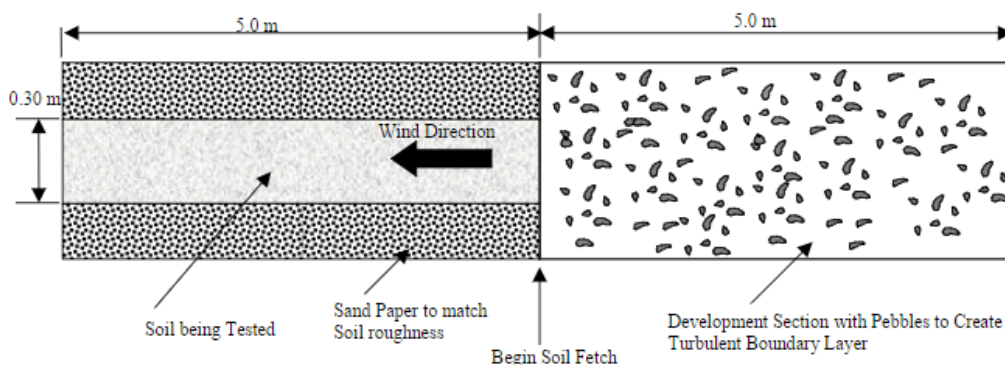
Kuvassa 17 on kuvattu Whiten ja Roneyn (2000) kokeessa käytetty tuulitunneli. Tunneli on suunniteltu erityisesti saltaation ja suspension tutkimiseen. Tunnelin pituus on 13,5 metriä, jotta tunnelin sisällä ilmavirtaukseen ehtii syntyä turbulenteja virtauksia kuvaamaan ilmakehän rajakerroksessa tapahtuvia oikeita todellisia ilmiöitä. Tunnelin pohjaan ensimmäiselle 5 metrin matkalle on kiinnitetty pieniä kiviä, jotta kahdensuuntainen turbulenteittinen rajakerrosten tuuli saadaan muodostumaan tunneliin. Seuraavan kahden osion pintoja on karhennettu, jotta ne kuvaavat maaperän karkeutta. Tunnelissa on 5 metriä pitkä, 0,30 metriä leveä ja 0,025 metriä syvä kaukalo, johon tutkittava materiaali voidaan asettaa (KUVA 18).



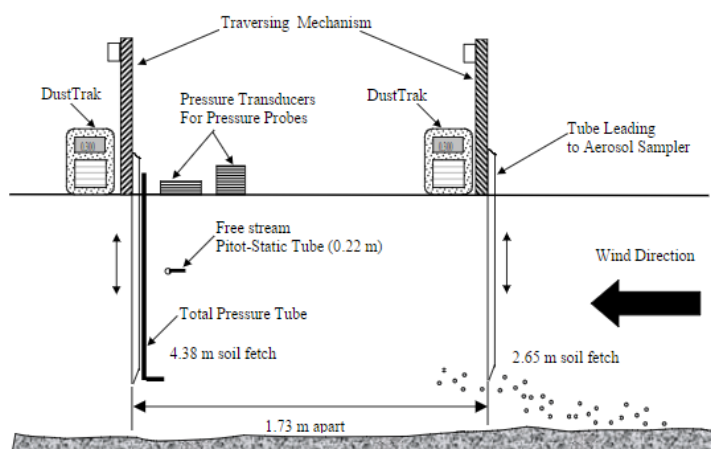
KUVA 17 Whiten ja Roneyn tutkimuksissa käytetty tuulitunneli kuvattuna sivusta päin (White ja Roney 2000.)

Mittauslaitteina toimi kaksi liikuteltavaa DustTraks- mittaria jotka mittasivat PM10 ja PM2,5 päästöjä (yksikössä mg/m^3) kahdella eri akselilla näytealustan jälkeen. Poikittainen paineanturi mittaa nopeuden näytepatjan päällä ja staattinen pitot-putki mittaa keskinopeuden tunnelissa. Mittauksissa suurin käytetty nopeus oli 13,5 m/s.

Ensin tuulitunnelikokeiden tarkoituksena oli selvittää löyhän, irtonaisen maan päästökertoimet. Tutkittavat näytteet kaivettiin neljästä eri kohtaa 10 - 25 senttimetrin syvyydestä kuivuneen järven maaperästä. Jokainen näyte tutkittiin yksitellen ja näyte asetettiin kuvan 23 mukaisesti tuulitunneliin 5,0 metriä pitkälle, 0,30 metriä leveälle ja 0,025 metriä syväälle alustalle tuulitunneliin. Neljästä näytteestä yksi jouduttiin esikäsittämään, ensin kuivaamaan viikon ajan ja sen jälkeen näytteestä eroteltiin suuren kokkareet karkealla seulalla. Tämän jälkeen maanäytteet seulottiin, jotta niiden raekojakauma pysyi samana kuin aiemmin oli jo määritetty. Kaksi The DustTraks™ mittaria asennettiin 2,65 ja 4,38 metrin päähän näyteastian etureunasta. Mittarit mittasivat samanaikaisesti aina samalta korkeudelta. Näytettä kerättiin jokaiselta korkeudelta 10 sekunnin ajan. Kuvassa 19 on kuvattuna mittausjärjestely.

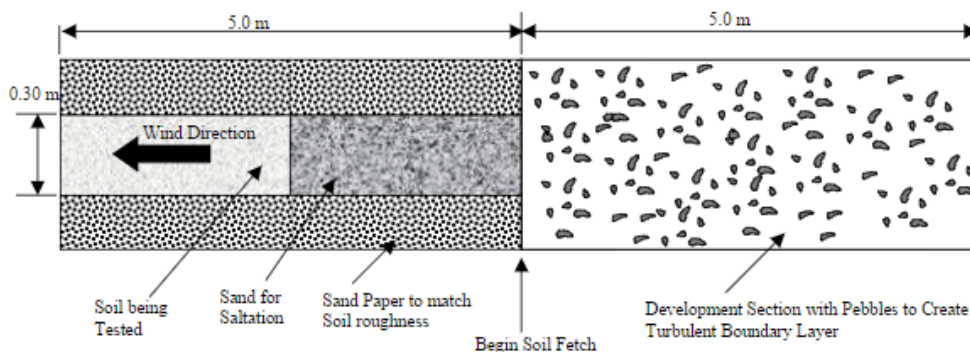


KUVA 18 Whiten ja Roneyn tuulitunneli kuvattuna ylhäältä päin (White ja Roney 2000.)



KUVA 19 Whiten ja Roneyn tuulitunnelitestaus asettelu sivusta päin (White ja Roney 2000.)

Saltaation arvioidaan lisäävän PM₁₀ päästöjä kuivuneen järven alueella, joten testissä testattiin myös sen vaikutusta pölypäästöihin. Näytealustan tuulen tulosuunnan puolelle lisättiin karkeampaa hiekkaa, joka tuulen puhaltaessa saltautuu hienojakoisempaan näytepetiin (KUVA 20). Näin saatiin testattua saltaation vaikutus PM₁₀ päästöihin. Tämä testattiin erilaisilla maanäytelajeilla ja pintamateriaaleilla.



KUVA 20 Tuulitunnelitesti asettelu, kun tutkittiin saltaation vaikutusta päästöjen syntyyn. (White ja Roney 2000.)

Kosteuden vaikutus testattiin tutkimalla kahta näytettä, joilla oli eri kosteuspitoisuus. Tuulitunneliin syötettiin ilmaa mahdollisimman suurella nopeudella, jotta saavutettiin suurin mahdollinen päästötaaso. Ensin kostutettu näyte laitettiin tunnelin pohjalle ja sen jälkeen 1, 2,5 ja 4,4 metrin kohdalta näytepetiä otettiin noin 30 grammaa näytteitä, joiden massa punnittiin heti ja painot kirjattiin näytteen märkäpainoksi. Maanäytteet kuivattiin, jotta niiden kosteuspitoisuus saatiin määritettyä. Tämän jälkeen tehtiin tuulitunnelissa puhallustesti. Sen jälkeen näytteisiin lisättiin vettä suihkuttamalla pintaa ja sekoittamalla vesi myös alempiin kerroksiin ja samalla maaperänäytteestä otettiin kosteuden määrittämistä varten taas kolme näytettä, jotka punnittiin ja kuivattiin. Tuulitunnelitesti tehtiin kuudella eri kosteuspitoisuudella molemmille maanäytteille ja kostuttamista tehtiin niin, että viimeisellä kerralla maanäytepeti oli huomattavasti kosteampi. Kosteuspitoisuudet vaihtelivat 16 - 25 %. Tuulen nopeus ja kitkanopeus pidettiin mittauksissa vakiona, noin 0,7 m/s. (White ja Roney 2000.)

4.1.4 Kaivoksen rikastushiekan hajapölypäästöjen simulointi tuulitunnelilla

Boultonin, Neumanan ja Sandersonin (2009) tuulitunnelisimulaatiossa tutkittiin kaivoksien rikastushiekan pölypäästöjen vaikutusta ympäristöön. Näytteet, jotka sisälsivät vulkaanista, tulivuoresta purkautunutta kivilajia ja kerrostuneita kivilajeja, kerättiin etelä Mongolian ja Gobin autiomaan aron reunalta-alueelta. Materiaalina käytettiin kiviä. Kivet murskattiin raekooltaan samanlaiseksi kuin Australiassa sijaitsevan kaivoksen rikastushiekkajätteen oletettiin olevan.

Testin tavoitteena oli:

- A) Määrittää tuulen nopeuden ja kosteuden suhde rikastushiekan pölyämiseen. Ja samalla määrittää ”pahin pöly skenaario”, kun kuivaa jauhattua rikastushiekkaa pölytetään.
- B) Arvioida maan kuoren halkeamien ja repeämien vaikutus maan pölyävyyteen ja pölypäästöjen syntyyn.
- C) Määrittää pölypäästöjen vähentyminen, kun rikastushiekkalietteestä dekantoidaan pienimmät hiukkaset.
- D) Määrittää saltaation vaikutus pölypäästöjen kasvuun.

Testi tehtiin neljälle eri lietenäytteelle, jotka kuivattiin ja murskattiin, jotta sekaan ei jäänyt suuria partikkeleja. Jauhettu sedimentti jätettiin ensin pois testeistä, ja muut näytteet kasteltiin 64 p- % kosteuteen (54 V-%). Tarkoituksena oli jäljitellä rikastushiekkalietteen fysikaalisia ominaisuuksia. Pienet 16 x 26,5 senttimetrin kokoiset ja 2,5 senttimetriä syvät alumiini vuoat vuorattiin alumiiniteipillä, jotta jokainen näyte voitiin yli täyttää, ilman että näyte vuotaa, sillä tavalla mahdollistetaan näytteiden kutistuminen kuivauksen aikana. Näytteiden annettiin tasoittua ja 30 minuutin päästä osa näytteistä dekantoitiin ja hienoin aines poistettiin. Tämän jälkeen kaikki näytteet kuivattiin 50 °C:n lämpötilassa muutamia päiviä niin, että näytteiden kosteuspitoisuus oli 10 p-%. Tämän jälkeen suoritettiin tuulitunneli testaukset. Testausten jälkeen osa vuoista kuivattiin vielä 2 %:n kosteuspitoisuuteen. Osa näytteistä kuivattiin hitaasti viiden päivän ajan lämpölamppujen alla. Kuivauksen jälkeen jokaiseen näytteeseen syntyi yhtenäisiä, kuorimaisia pintoja ja näytteet tiivistyivät kasaan noin 25 %. Näytteisiin muodostui halkeamia reunoja pitkin ja joihinkin näytteisiin myös kesemmäksi näytealustaa.

Käytetty tunneli oli suora 13,8 metriä pitkä ja poikkipinta-alaltaan 0,54 m². PM₁₀ hiukkasmittarina käytettiin DustTrak laaserfotometriä, joka mittaa jatkuvatoimisesti hiukkasia. Kaksi DustTrak: ia kiinnitettiin tuulitunnelin sisään 15 ja 36 senttimetrin korkeuteen isokineettisen saltaatioansan eteen ja näytepetiin syötettiin ilmaa 11 m/s nopeudella. Tuulitunnelista määritettiin kitkanopeus u^* ja tuulen nopeuden pystyprofiili z , eli pystysuora etäisyys pinnasta, sekä rosoisuus z_0 ja k , joka on Karmanin vakio.

Laatikot asetettiin tunneliin 6 metrin päähän ilmantuloaukosta ja 5 metrin päässä DustTrack mittareista. Näytelaatikot upotettiin tuulitunnelin pohjaan, jotta laatikon reunat eivät vaikuttaisi tuulen virtaukseen. Kaksi näytteistä sijaitsi 7 metrin päässä tuloaukosta, kokonsa vuoksi. Tuulitunneliin syötettiin ilmaa vapaan tuulen nopeudella 3 m/s jatkuvatoimisesti 60 sekunnin ajan. Sen jälkeen nopeutta nostettiin aina 1 m/s ja näytteen pölyämistä mitattiin jatkuvatoimisesti 60 sekunnin ajan molemmilla mittareilla 15 ja 36 senttimetrin korkeudessa. Tätä toistettiin aina 12 m/s virtaukseen asti. Tutkimuksessa tutkittiin myös saltaation vaikutusta PM₁₀ päästöihin. Näytteen hiukkasista 20% on kooltaan noin 150 µm. Nämä vaikuttavat pölyävyyteen saltaation kautta. Tätä tutkittiin syöttämällä hiekkaa, jonka halkaisija oli noin 200 µm, vastatuulen säiliöstä ja tutkittiin kuinka saltaatio pomput vaikuttavat näytteiden pölyämiseen.

PM₁₀ pölyämisen kohtisuora profiili määritettiin laittamalla tuulitunnelin näytepinnalle 1 cm:n välein DustTrakin mikroprosessori sensoreita pohjasta tunnelin kattoon. Profiili määritettiin puhtaalla ilmapirralla, ilmapirralla kun hiekkaa syötettiin mukaan ilmapirtaan ja jauhetun rikastushiekan pölyävyys, kun hiekkaa syötettiin tuulitunneliin. Mittausaika oli 90 minuuttia (Neumana, Boulton, Sanderson 2009, 520–529.)

4.1.5 Tuulieroosion vaikutus PM₁₀ päästöihin.

Saxtonin, Stetlerin ja Chandlerin (1997) raportissa Simultaneous Wind Erosion and PM10 Fluxes 1997, käytettiin siirrettävää tuulitunnelia, jolla tutkittiin PM₁₀ päästöjen syntyä maasta ja maanpinnan karheuden vaikutusta päästöjen syntyyn. Tuulitunneli oli 13 metriä pitkä, 1,0 metriä leveä, 1,2 metriä korkea. Kokeesta tehtiin viisi toistoa 30 eri kentältä, jotka edustivat seitsemää pää maaperäluokkaa. Kenttäkokeiden pinnat haravoitiin, jotta ylimääräiset risut ym. saatiin pois koeruudulta. Tuulta puhallettiin 18 m/s nopeudella yhden metrin korkeudesta 10 minuutin ajan maaperään. Ruudun toisessa päässä oli sykloni, joka keräsi irronneen pölyn talteen, jotta päästömäärät voitiin laskea. (Saxton, Stetler ja Chandler 1997, 1–13.)

4.1.6 Tuulitunneli kalibrointi USGS-pölynkeräyslaitteille

Goossensin tutkimuksessa käytetty tuulitunneli oli 7,6 metriä pitkä, 1,2 metriä leveä ja 0,6 metriä korkea. Kalibroinnissa käytettiin kalkkipitoista multaa, joka sisälsi 3 % savea (<2 µm), 83% silttiä (2-63 µm) ja 14% hiekkaa (> 63 µm). Materiaali syötettiin ilmapirran sekaan tuulitunnelin yläosasta ja tunnelin pohjalle asennettiin näytteen keräyslaite. Näytteenottolaite asennettiin 20 senttimetrin korkeuteen pohjasta keskelle tunnelia, jossa tuulen virtaus on vapaan tuulen alueella. Testeissä näytettiin syötettiin ilmaa viidellä eri virtausnopeudella 1 - 5 m/s välillä ja jokaista virtausnopeutta pidettiin päällä 3 minuuttia. Tarkat tuulen nopeudet olivat 0,98 m/s, 2,00 m/s, 2,99 m/s, 4,03 m/s ja 4,81 m/s. (Goossens 2010, 159–170.)

4.1.7 Suspension ja tuulieroosion vaikutus maaperän pölyämiseen.

Chandlerin ja Saxtonin raportissa (1999) tutkittiin tuulieroosion vaikutusta ja määritettiin pölyävän materiaalin raekokojakauma. Tunneli on 1 metrin leveä, 1,2 metriä korkea ja 13 metriä pitkä siirrettävä tuulitunneli. Kokeessa tutkittiin eri maaperänäytteitä, jokainen näyte sisälsi silttiä ja osa myös vulkaanista tuhkaa. Näytteitä puhallettiin 10 minuutin koejaksoissa tuulitunnelissa 18 m/s virtausnopeudella. Tuulieroosion vaikutuksia tutkittaessa tuulitunneliin syötettiin siivilöityä hiekkaa 90 g/min, jolla saatiin tutkittua saltaation vaikutusta tuulieroosioon. (Chandler, Saxton 1999.)

4.1.8 Kosteuden vaikutus hiekkaisen savimaiden eroosioon

Chen, Zhibao, Zhenshan ja Zuotao (1996) tutkimuksessa on tutkittu maaperän ominaisuuksien, kuten kosteuden ja tuulen voimakkuuden vaikutusta maaperän syöpmiseen ja pölypäästöjen syntyyn. Tuulitunneli testissä käytettävät materiaalit olivat hiekkainen lössimaa, hiekkainen savi ja savinen hiekka, joiden raekoot olivat 0,05 - 0,005 millimetrin väliltä. Näytteet kaivettiin 25 senttimetrin syvyydestä maasta ja ne asetettiin 100 x 30 x 25 senttimetrin kokoiseen näyteastiaan, jossa näytteitä pystytettiin kuivaamaan ja kostuttamaan tarpeen mukaan. Tuulitunneli oli 16 metriä pitkä, 1 metriä leveä ja 0,6 metriä korkea. Näyteastiat asetettiin 12 metrin päähän tunnelin päästä josta ilmaa puhallettiin sisään. Näyteastiat upotettiin tunnelin pohjaan siten, että näytteiden pinta oli samalla tasolla tunnelin pohjan kanssa. Näytteiden kosteutta muutettiin suihkuttamalla tislattua vettä näytteiden pintaan ja sekoittamalla se tasaisesti 3 senttimetrin syvyyteen näytteessä. Näytteiden kosteuspitoisuus määritettiin kuivaamalla näytteitä uunissa 105°:ssa 8 tuntia. Näytteitä pölytettiin 2 - 15 minuuttiin riippuen näytteen kosteudesta ja tuulen nopeudesta. Tuulen nopeutta mitattiin pitotputkella 30 cm:n korkeudesta näytepatjan päältä. Tuulitunnelin toisessa päässä oli näytteenkeräysjärjestelmä, joka keräsi irronneet partikkelit. Irronneen maaperän määrä mitattiin myös punnitsemalla astioiden paino ennen ja jälkeen tuulitunnelikokeen. (Weinan, Zhibao, Zhenshan ja Zuotao 1996.)

4.2 Yhteenveto kirjallisuusselvityksestä

Taulukossa 8 on yhteenveto tuulitunnelitutkimuksista. Kaikki kirjallisuusselvityksen tuulitunnelitestit on tehty maaperästä tai rikastushiekkakasoista saaduista materiaaleista. Selvitysten 1, 3 ja 8 materiaalina on käytetty rikastushiekkajoja ja loppujen testien materiaalina on ollut maaperä, joka on sisältänyt kokeesta riippuen mm. multaa, savea, silttiä ja hiekkaa. Tuulitunnelien pituudet vaihtelevat. Yleensä maastossa tehdyissä mittauksissa tuulitunnelit olivat pidempiä kuin laboratorioissa tehdyissä kokeissa. Tunneliin puhallettavan ilmavirran nopeus vaihteli 1 - 18 m/s testien välillä.

TAULUKKO 8 Kirjallisuusselvityksen tuulitunnelitestien tulosten yhteenveto

Koe	Tuulitunnelin mitat (m) (pituus x leveys x korkeus)	Tutkittava materiaali	Materiaalin asettaminen tunneliin	kosteus	Puhallusnopeus (m/s)	puhallus aika
1	9 x 2,44	uraanikaivoksen rikastamon jätehiekkanäyte	1,82 m x 0,92 m alueelle, 38 mm paksu kerros		4,5; 7,5; 9,5	na
2	pituus 10 m, ensin 5 m suora turbulenttisten virtausten saamiseksi, sen jälkeen 5 m, johon näyte sijoitettiin	Kuivuneen järven maaperä, näytteet kerättiin 10- 25 cm syvyydestä maasta.	5 m x 0,3 m x 0,025 m alue, jolle näyte levitettiin tasaisesti	Näytteisiin suihkuttettiin vettä tasaisesti, 6 eri kosteutta 16-25 % välillä, näytteestä otettiin 30 g näyte, josta määritettiin kosteus.	maksimi nopeus 13,5	na
3	13,8 pitkä	Kaivoksen rikastushiekka	16 cm x 26,5 cm x 2,5 cm syvät alumiini vuoat, jotka upotettiin tunnelin pohjaan	Näytteet kasteltiin 64 p-% ja 54 p-% kosteuspitoisuuteen, jonka jälkeen kuivatettiin 10% kosteuteen ja osa 2 % kosteuteen	5 - 12	1 min
4	7,6 m x 1,2 m x 0,6 m	kalkkipitoinen multa,3% savea (<2 µm), 83% silttiä (2-63 µm) ja 14% hiekkaa (> 63 µm)	pölyhiukkaset syötettiin tunneliin ilmavirran mukaan ja kerättiin tunnelin pohjalla olevaan astiaan.	na	1-5 (0.98 ; 2.00; 2.99; 4.03; 4.81)	3 min
5	13 m x 1,0 m x 1,2 m	maaperä	tunneli asetettiin maata vasten	na	18	10 min
6	8 m pitkä, jossa 2 m x1 m x1 m testi alue	kiinteät hiukkaset 0,5-1 mm halkaisijaltaan	2m x 1 m x 1m testaus alue, jolle näyte asetettiin	na	1 - 5,5	na
7	16 m x 1 m x 0,6 m	25 cm syvyydestä maata raekoko ka. 0,114, 0,130; 0,198mm, sisältää mm savea & hiekkaa	100 x 30 x 25 cm näyteastia, joka upotettiin tunnelin pohjaan	näytteet kasteltiin 3 cm syvyyteen tislattulla vedellä ja kosteus määritettiin kuivaamalla näytteitä uunissa.	kynnystuulen nopeus - 25	2- 15 min, riippuen tuulen nopeudesta ja näytteen kosteuspitoisuudesta
8	na	kultakaivoksen rikastushiekka savea noin 10 %, silttiä 50 % ja 40% hiekkaa sellaisenaan ja jauhettuna tasaisesti	na	2 % ja 10 % kosteuden vaikutus pölyämiseen	7,0; 7,5; 8,8; 10,4; 11,9; 13,3; 14,9; 17,0; 17,8	na

1 Sipilä 1995, 2 Chandler Saxton ja Stetler 1997, 3 Boulton, Neumana ja Sanderson 2009, 4 Goossens 2010, 5 Chandler, Saxton 1999, 6 Al-azab Corsmeier, Kottmeier ja Shannak 2014, 7 Chen, Zhibao, Zhenshan ja Zuotao 1996 ja 8 Mackay ja Thidobeaux 2011

4.3 Hajapölypäästön määrittäminen

MacDougalin ja Uhlin (2002) raportissa on kerrottu tuulieroosion aiheuttamien hajapölypäästöjen määrittämisestä. Hajapölypäästöjen laskeminen nojaa vahvasti tuulitunnelikokeilla laskettuihin päästökertoimiin. Raportissa todetaan, että tuulitunnelitesteissä pölypäästöjä syntyy saltaation ja suspension vaikutuksesta. Kuitenkin vain PM_{10} -luokan hiukkaspäästöillä on merkitystä hajapölylähteiden päästökertoimia määritettäessä, sillä ne kulkeutuvat tuulen mukana pitkiä matkoja

Tuulitunnelitestejä tehdessä ensimmäisenä vaiheena on määrittää maaperätyyppi tutkimusalueella. Tämä on yksi kriittisimmistä vaiheista. Eri maaperien/ materiaalien ominaisuuksista on tehty jo tuulitunnelitestauksia ja niiden pohjalta on kerätty tietokantaa eri materiaalien ominaisuuksista. Maaperästä tulee ottaa huomioon sen kasvillisuuden määrä ja tyyppi, onko maaperässä paljon kiviä tai muita suojaavia elementtejä ja kuinka karhea maanpinta on. Myös maaperän raekokojakauma tulee selvittää, jotta PM_{10} ja $PM_{2,5}$ päästökartoitus voidaan tehdä. On tärkeää selvittää myös, onko maaperä stabiili vai epästabiili. Tutkittavalta alueelta on huomioitava, aiheutuuko siellä kausittaista maaperän häiriintymistä, kuten kyntötöitä tai suurta muutosta kausittaisessa liikenteessä alueella. Myös esimerkiksi talvikuukausien lumipeite täytyy ottaa huomioon päästöjä laskettaessa, sillä lumipeite estää päästöjen syntymisen. Tutkittavan alueen erilaisten maalajien prosentuaaliset osuudet koko alueesta tulee selvittää. Jokaisesta maalajista lähtee eri määriä pölypäästöjä, joten jokaiselle maaperälle tulee selvittää omat päästökertoimet tuulitunnelitestillä. Eri maa-alueiden päästökertoimet summatetaan ja niistä saadaan laskettua tarkasti koko alueen päästökerroin.

Tutkittavan alueen sääolosuhteet täytyy myös selvittää. Ennen mittauksia on hyvä tietää alueen tuulen nopeuden tuntikeskiarvo, sademäärät ja tuulen puuskien huippuarvot. Jos tutkimusalue on hyvin laaja, meteorologiset tiedot voivat muuttua alueen sisällä, jolloin tietoja pitää kerätä laajemmin eri osista aluetta. Tällä varmistetaan tarkemmat lopputulokset hajapölypäästöjen määrittämiseen. Jokaiselle testattavalle maatyypille tulee asettaa oma tuulen nopeuden kynnysarvo. Testejä tehdessä on syytä olettaa, että maaperä ei ole ylittänyt kynnysarvoa, eikä päästöjä ole päässyt vielä syntymään alueelta. Häiriintyneiltä maa-alueilta lähtee enemmän päästöjä kuin häiriintymättömästä maasta. Tasaaisessa häiriintymättömässä maassa maanpinnasta lähtee tuulen puuskien mukana päästöjä vain maanpinnasta, eikä alempien kerroksien hiukkaset pääse kosketuksiin tuulen kanssa. Tuulen nopeuden kynnysarvoa määritettäessä tulee ottaa huomioon, että tuulen puhaltaessa maaperän hiukkaskokojakauma muuttuu koko ajan.

Myös tuulitapahtumien muutoksien ajat tulee määrittää. Tuulen ajanjaksoksi voidaan määrittää se aika kuin tuulee tietyllä tuulen nopeudella tietyn ajan tunteina. Esimerkiksi yksi tuulitapahtuma on, kun tuuli saavuttaa kynnysnopeutensa tietyllä alueella ja tämän jälkeen tuulen nopeus heikkenee ja kolmen tunnin päästä saavuttaa taas kynnysnopeuden. Tuulitapahtuma voidaan jakaa myös pidemmällä väleillä. Esimerkiksi, kun tuuli puhaltaa kynnysnopeudellaan, tämän jälkeen tuulen nopeus heikkenee ja kolmen päivän päästä saavuttaa taas kynnysnopeutensa, tämä voidaan jakaa kahteen tuulitapahtumaan.

Sade vaikuttaa myös tuulieroosion syntyyn vähentämällä pölypäästöjä sateisina päivinä. Yleensä sateiset päivät jätetään huomioimatta päästölaskelmia tehdessä. Myös sateen jälkeen pilvisten ja kylmien päivien huomioimista laskelmiin tulee harkita. Tutkimusalueen maaperän kyky sitoa kosteutta tulisi tutkia luotettavien tulosten saavuttamiseksi. Näiden määritysten jälkeen voidaan alueelle laskea tarkat päästökertoimet ja pölypäästöjen määrät. (MacDougal ja Uhl 2002.)

4.4 Vuosipäästöjen laskeminen

Vuosipäästöjen laskemiseen on kehitetty erilaisia laskentatapoja. Tässä on esitettyä Opasnet.org sivustolla oleva laskentakaava sivukivikasojen varastoinnin aiheuttamaa kokonaispölypäästöä vuodessa. Kaava on muokattu USEPA:n (U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), 1983) kaavasta. (Opasnet.org.)

$$E = J * 1.9 * (s/1.5) * [(365 - p)/235] * (f/15) \quad (2)$$

Jossa

- E = päästökerroin pölyämislle (kg/ha/päivä)
 J = hiukkasten aerodynaaminen kerroin
 J (TPM) = 1,0 (kokonaispölyäminen)
 J (PM₁₀) = 0,5
 J (PM_{2.5}) = 0,2
 s = silttipitoisuus (%). Oletusarvona 30 %, sivukivikasoilla luku voi olla huomattavasti pienempi, vain muutama prosentti.
 p = niiden päivien lukumäärä, jolloin sademäärä on yhtä suuri tai yli 0,25 mm. Oletusarvona Itä-Suomessa voidaan käyttää lukua 159 (Outokummun alueen luku, joka perustuu Ilmatieteen laitoksen säädataan vuosien 2002 - 2011 tarkastelujaksolla).
 f = prosenttimääräisesti aika, jolloin tuulen nopeus kasan keskikorkeudella ylittää 5,4 m/s (%). Oletusarvona Itä-Suomessa voidaan käyttää lukua 7,2 % (Outokummun alueen luku, joka perustuu Ilmatieteen laitoksen tuulidataan vuosien 2007 - 2011 tarkastelujaksolla)

Tuulieroosion aiheuttama vuotuinen pölypäästö saadaan kertomalla E päästökerroin varastointialueen tuulieroosion vaikutukseen kohdistuvalla pinta-alalla (ha) ja 365:llä. Kaava on tarkoitettu kasoille, joiden pinta on häiriintynyt ja eroosiolle herkkää materiaalia on tarjolla koko ajan. Suomen olosuhteissa esimerkiksi talvisin lumipeite estää eroosiota ja osa kasoista voi olla häiriintymättömiä, tämän vuoksi kaavan laskennalliset arvot ovat todennäköisesti todellisuutta suurempia. (Opasnet.org.)

Pölypäästöjä voidaan vähentää kastelemalla pölyäviä kasoja. Alla olevassa taulukossa 9 on kuvattu kastelumäärän tarve prosentuaaliseen pölypäästön vähenemiseen. Pölypäästöjä voidaan vähentää myös rakentamalla tuuliesteitä, arvioiden mukaan täydellisen tuulen puoleisen suojan on katsottu vähentävän 75 % pölyämistä. (Opasnet.org.)

TAULUKKO 9 Kastelutarve pölypäästöjen vähentämiseksi (Opasnet.org.)

Pölypäästön väheneminen %	Päivittäinen tarvittava kastelumäärä (m ³ /ha)
50	15,9
60	22,4
70	31,8
80	47,5
85	60,9
90	83,2
95	133,6

Pölypäästöjen vähentämistoimenpiteiden jälkeen kaavalla 3 pystytään laskemaan lopullinen pölypäästö määrä (Fugitive Emissions discussion in the Air & Waste Management Association Air Pollution Engineering Manual, 1992).

$$E_c = E * [(100 - C)/100] \quad (3)$$

jossa

E_c = lopullinen vähentämistoimenpiteiden jälkeinen pölypäästö (kg/ha/päivä)

E = päästökerroin pölyämiselle (kg/ha/päivä)

C = vähentämistehokkuus (%) (Opasnet.org.)

5 TUULIKAMMIO TESTEIHIN SUUNNITELLUT MENETETTELYTAVAT

5.1 Tuulikammio

Ramboll on suunnitellut ja rakennuttanut oman tuulikammion hajapölypäästöjen määrittämistä varten (KUVA 21). Opinnäytetyössä suunnitellaan tuulikammiossa tutkittavien materiaalien testausten menettelytavat hajapölypäästöjen määrittämistä varten. Tuulikammion kokonaispituus on noin 225 senttimetriä. Tunnelin tasainen pohja on 125 senttimetriä pitkä ja 50,5 senttimetriä leveä. Kammio on rakennettu alumiinista ja sivuseinille on tehty muovilevystä ikkunat, joista pystytään seuraamaan koetta. Kammion yhdellä sivulla on 115 senttimetriä pitkä ja 40 senttimetriä leveä aukko josta näytteet voidaan asettaa kammioon ja maastossa tätä aukkoa voidaan käyttää suoraan materiaalin näytealustana. Maastossa aukko laitetaan suoraan maata vasten, jolloin maaperän pölyämistä saadaan tutkittua paikan päällä. Tunneliin johdetaan ilmaa puhaltimella ja ilmavirtausta voidaan säätää poistoputkessa olevan läpän avulla ja puhaltimen ilmanottoaukkoa peittämällä. Laboratoriossa kammio on kytketty poistoon.



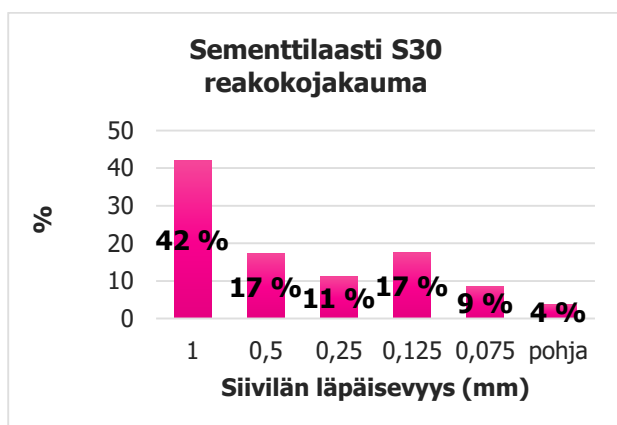
KUVA 21 Tuulikammio (Räsänen 2016.)

5.2 Tuulikammio kokeiden suunnittelu

Ennen testejä materiaalien raekoko määritetään, jotta ne voidaan kirjata päästökirjastoon ja eri materiaaleja voidaan vertailla keskenään. Tutkittava materiaali asetetaan alumiinilevylle muotin avulla. Alumiinilevy laitetaan tuulikammioon ja muotti poistetaan siellä materiaalin ympäriltä. Tällä varmistetaan, että materiaali saadaan asetettua aina samalla tavalla kammioon ja ettei materiaali pääse pölyämään ennen tunneliin asettamista. Alumiinilevy asetetaan tuulikammion pohjalle. Ilmavirran nopeus mitataan läheltä näytepetiä tuloilman puolelta SwemaAir40 virtausmittarilla. Hiukkasmittari OSIRIS Turnkey Instruments ja painemittari EXTECH instruments, L148 on asennettu kammion poistoilman puolelle. Mittareille on tehty omat paikat, jotta mittaustulokset eivät muuttuisi ja eri materiaalien arvot olisi keskenään vertailukelpoisia.

Tuulikammion toimintaa testataan Lakan sementtilaasti S30:llä. Tämän avulla nähdään, kuinka materiaali pölyää tunnelissa, mitkä ovat optimaaliset tuulen nopeudet oikeiden materiaalien tutkimiseen ja millä tavoin materiaali kannattaa asettaa tunneliin. Sementtilaastin Raekoko määritettiin, jotta sitä voidaan verrata muihin määrityksiin (TAULUKKO 10).

TAULUKKO 10 Sementtilaastin raekokojakauma



Kokeissa on suunniteltu käytettävän virtausnopeuksia 0,5 m/s, 2 m/s, 5 m/s, 7 m/s ja 10 m/s. Nämä nopeudet edustavat keskiarvoja Suomessa käytettävän tuulen nopeus asteikon tuulista ja ovat yleisesti vallitsevia tuulen nopeuksia. Samaa näytepetiä pölytetään jokaisella virtausnopeudella aina 5 minuutta, jonka jälkeen nopeutta nostetaan seuraavaan arvoon. Tulevaisuudessa tuulikammiota aiotaan käyttää kenttämittauksissa eri alueiden tai kuljetusreittien hajapölypäästökertoimien määrittämiseen.

6 PÄÄSTÖKIRJASTON LUOMINEN

6.1 Päästökertoimen määritelmä ja päästökirjaston luonti

Päästökerroin on arvo, joka kertoo epäpuhtauspäästön määrän pääsystä ilmakehään suhteutettuna tiettyyn arvoon. Yleensä päästökerroin ilmaistaan päästön määrän paino jaettuna yksikköpainolla, tilavuudella, etäisyydellä tai kestolla, esimerkiksi kuparihienokuonan päästökerroin $\text{mg}/\text{m}^2/\text{s}$. Yleensä päästökertoimet ovat päästöjen syntymisen/ ilman epäpuhtauksien keskiarvoja pitkän aikavälin laskelmista. Tarkkojen tietyltä alueelta tulevien päästömäärien laskemiseen on kehitetty erilaisia laskentamenetelmiä ja tietokonepohjaisia mallintamishjelmia. (U. S. EPA. AP 42, 2016b.)

Päästökirjastoon on koottuna teollisuuden hajapölypäästölähteiden päästömääriä. Kootut materiaalit ovat teollisuudessa olevia erilaisia varastoitavia materiaaleja, niiden kenttiä ja varastointikasoja. Päästökirjastoon on valmiiksi koottu kirjallisuudesta saatuja kertoimia esimerkiksi rikastushiekoille, hiilikasalle ja varastokentälle. Tarkoituksena on, että päästökirjastoa pystytään päivittämään sitä mukaa kuin uusia päästökertomia saadaan määritettyä tuulikammiotesteillä.

6.2 Päästökirjasto

Taulukossa 11 on esitetty eri lähteistä saatuja päästökertoimia eri materiaaleille.

TAULUKKO 11 Päästökirjasto

Materiaali	Raekoko	Kosteus	Muu ominaisuus	hajapölypäästö (mg/m ² /s)	PM _{2,5} -pitoisuus (µg/m ³)
Rikastushiekka kultakaivokselta	10 % 0,01 - 2 µm savi, 50% 2 - 60 µm siltti, 40% 60 - 1000 µm hiekkaa	na	jauhettu rikastushiekka	0,59	na
		na	jauhettu kuivattu, pintahäiritty	0,80	na
		10% kosteus	na	0,21	na
		2% kosteus	na	1,53	na
Turve	na	28-55% kosteus	keskimäär. tuulen nopeus 1,3 - 6 m/s	na	35 - 2300
		28 - 59 % kosteus	keskimäär. tuulen nopeus 1,5 - 7,4 m/s	na	6 - 4530
Hakevarasto	na	na	na	0,01	na
Tuulen nostama pöly hakekasan läheisyydestä	na	na	Keskimäär. Tuulen nopeus 1,8 m/s	0,2 (PM ₁₀)	na
Piha-alue	na	na	pölyävä alue 1000 m ²	0,025	na
Hiilikenttä	na	na	varastointi määrä 50 000 m ³	0,0004	na
Hiilivarastokasa	na	na	Varastointi määrä 313474 m ³		
			Tuulen nopeus 10 m/s	0,0003	na
			Tuulen nopeus 15 m/s	0,0008	na
Sivukivikasa	na	na	na	0,093 (PM ₁₀)	na
Kynnöspelto	na	na	na	0,00002	na
Kalkin ja Dolmiitin valmistuksen varastokasa	na	na	varastointi ala 5000 m ² , aktiivinen koko vuoden	0,0042	na
Malmin louhinnan varastokasa	na	na	PM ₁₀	0,0060	na
			TSP	0,011	na
Betonin valmistuksen hiekka + varastokasat	na	na	yhteenlaskettu päästökertoim	0,005	na

7 YHTEENVETO

Tämän työn tarkoituksena on ollut etsiä taustatietoa Rambollille hajapölypäästöjen määrittämisestä tuulikammiokoekoiden avulla, tuottaa hajapölypäästökirjasto ja olla taustatietona tulevaisuudessa hajapölypäästöjen määrittämistä varten. Opinnäytetyön kirjallisuusselvityksessä tarkasteltiin Suomen tuulioloja. Työssä selvitettiin Suomessa käytettävät tuuliasteikot, yleisimmät tuulen nopeudet ja sademäärät Suomessa. Viiden eri paikkakunnan tuuli ja lumitiedot selvitettiin tarkemmin ja näiltä paikkakunnilta piirrettiin tuuliruusut koko vuoden ja sulanmaan ajalta. On tärkeää tietää sulanmaan tuulitiedot, sillä lumipeitteen ollessa maassa maa ei pääse pölyämään ja hajapölypäästöjä ei pääse syntymään tältä ajalta. Kirjallisuusselvityksessä tarkasteltiin myös hiukkasten eri tapoja kulkeutua maanpinnalla. Kulkeutuminen voidaan jakaa karkeasti kolmeen eri muotoon, vieriminen, saltaatio ja suspensio. Työssä käytiin läpi myös tuulen vaikutus erimuotoisten varastointikasojen pölyämiseen, kuinka tuulen nopeus muuttuu eri kohdissa kasaa ja kuinka tuulen suunnan muutos vaikuttaa tähän. Näitä tietoja Ramboll voi käyttää tulevaisuudessa määrittämään päästökertoimia erilaisten varastokasojen pinnoilta. Ilmatieteenlaitoksen internetsivulta, sekä monista lähteistä löytyi paljon tietoa Suomen sääoloista, joten opinnäytetyön kirjallisuusselvityksestä Suomen sääoloista tuli kattava.

Työn kirjallisuusselvityksessä tarkasteltiin myös jo tehtyjä hajapölypäästömäärittäyksiä tuulitunnelitestien avulla. Kirjallisuuslähteistä täytyi saada tietoa testien tekemisestä, millaisilla nopeuksilla näytesteihin on syötetty ilmaa tuulitunnelissa ja kuinka materiaalit kannattaa asettaa tunneliin. Kirjallisuusselvityksen pohjalta suunniteltiin koejärjestelyt Rambollin tuulikammioita varten. Hyvien tuulitunnelikoemenetelmien löytäminen oli hiukan haastavaa, sillä kaikki aineisto niihin liittyen oli englannin kielistä ja tuulitunnelitestien tekemisestä piti löytää hyvin yksityiskohtaistietoa. Tieteellisten artikkelien kääntäminen suomeksi oli aikaa vievää, mutta toisaalta kääntäessä oma englanninkielentaito ja tieteellistenartikkelien lukutaito paranivat. Näiden tarkasteltujen tuulitunnelikokeiden pohjalta suunniteltiin koejärjestelyt Rambollin rakentamaan tuulikammioon. Tulevaisuudessa selviää, toimiiko suunnitelma vai täytyykö sitä muuttaa. Opinnäytetyöhön oli alun perin tarkoitus liittää myös muutamien materiaalien tuulikammiotestausten tulokset ja laskea materiaaleille päästökertoimet. Kuitenkin tuulikammion osien toimitus viivästyi, eikä päästökertoimien määrittäystä ehditty liittää tähän työhön. Nämä olisi ollut hyvä olla mukana työssä, jolloin olisin voinut vertailla kirjallisuuden tuulitunnelitestien tuloksia Rambollin tuulikammion tuloksiin. Tällöin materiaaleille oltaisiin saatu myös laskettua päästökertoimet, jotka olisi voinut liittää tehtyyn päästökirjastoon.

Työssä on myös mukana päästökirjasto, jonka tarkoituksena on olla apuna tulevaisuudessa hajapölypäästöjen määrittämistä varten. Päästökirjasto luotiin eri lähteistä löytyvien, jo laskettujen päästökertoimien, sekä tehtyjen tuulitunnelikokeiden tulosten perusteella. Teollisuuden varastoitaville materiaaleille löytyi vähän päästökertoimia, joka selittyy todennäköisesti sillä, ettei niiden hajapölypäästömääriä olla vielä tutkittu paljoa. Löydetyt päästökertoimet koottiin taulukkoon ja tulevaisuudessa Ramboll voi liittää tuulikammiokokeilla saadut päästökertoimet siihen ja täydentää päästökirjastoa.

LÄHTEET

AL-ASAB T, CORSMEIER U, KOTTMEIER Ch ja SHANAK a 2014. Wind tunnel study of twelve dust samples by large particle size. Atmospheric Environment [Viitattu 2016-03-23] Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231014006645>

ARYA S. P. S ja BILLMAN Barbara J 1988. Windbreak Effectiveness for Storage Pile Fugitive Dust Control: A Wind Tunnel Study. Saatavissa: https://www.alexandriava.gov/uploadedFiles/tes/oeq/info/Reference%201_Paper-Windbreak%20Effectiveness%20for%20storage%20Pile%20Fugitive%20Dust%20Control.pdf

BADR T, HARION J.L 2005, Numerical modelling of flow over stockpiles: Implications on dust emissions. Atmospheric Environment 5576–5584 [Viitattu 2016-03-17] Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231005005297>

BOULTONB J. Wayne, NEUMANA Cheryl Mckenna, SANDERSON Steven, 2009. Wind tunnel simulation of environmental controls on fugitive dust emissions from mine tailings. Atmospheric Environment Volume 43, Issue 3, January 2009, sivut 520–529 [Viitattu 6.2.2016] Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231008009709>

CHANDLER David, SAXTON Keith 1999. Developments in Measurement and Models for Suspension-Dominated Wind Erosion. Saatavissa <http://topsoil.nserl.purdue.edu/nserlweb-old/isco99/pdf/ISCOdisc/SustainingTheGlobalFarm/P107-Chandler.pdf>

CHANDLER David, SAXTON Keith ja STETLER Larry 1997. Simultaneous Wind Erosion and PM10 Fluxes Saattavissa: <https://infosys.ars.usda.gov/WindErosion/symposium/proceedings/saxton.pdf>

CHEN Weinan, ZHIBAO Dong, ZHENSHAN Li ja ZUOTAO Yang 1996. Wind tunnel test of the influence of moisture on the erodibility of loessial sandy loam soils by wind. Journal of Arid Environments [verkkoaineisto] Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140196396901196>

DIEGO I., PELEGRY A., TORNO S., TORANO J, MENENDEZ M. 2009, Simultaneous CFD evaluation of wind flow and dust emission in open storage piles. Applied Mathematical Modelling Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X08002801>

Euroopan unionin virallinen lehti, KOMISSION ASETUS (EU) N: o 601/2012, 2012, Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivissä 2003/87/EY tarkoitusta kasvihuonekaasupäästöjen tarkkailusta ja raportoinnista [Viitattu 14.3.2016]

GEOLOGIAN TUTKIMUSKESKUS 2013 Tutkimusraportti 199 [verkkoaineisto] [Viitattu 5.2.2015] Saatavissa: http://tupa.gtk.fi/julkaisu/tutkimusraportti/tr_199.pdf

CHOW Judith, GILLES John ja NICKLING W. 1996, Resuspension of Particles by Wind: Research Initiatives for California Regional Particulate Air Quality Study [Viitattu 2016-03-18] Saatavissa: <https://www.dri.edu/images/stories/editors/eafeditor/Gilliesetal1996TSS5.pdf>

GOOSSENS Dirk 2010. Wind tunnel calibration of the USGS dust deposition sampler: Sampling efficiency and grain size correction. Aeolian Research. [Viitattu 2016-03-18] Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875963710000273>

Hengitysliitto.fi [verkkoaineisto]. [viitattu 2016-03-18] Saatavissa: <http://www.hengitysliitto.fi>
Polku: hengitysliitto.fi. sisailma. ulkoilma. ilmansaasteet. hiukkaset.

Ilmanlaatuportaali.fi [verkkoaineisto]. [viitattu 2016-03-18] Saatavissa: <http://www.ilmanlaatu.fi>
Polku ilmanlaatu.fi Tietoa ilmansaasteista. Ilmansaasteet. Hengitettävät hiukkaset.

Ilmatieteenlaitos.fi a [verkkoaineisto]. [viitattu 2016-03-18] Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi>
Polku: Ilmatieteenlaitos.fi. Teematietoa. Ilmakehä ja sääilmiöt. Ilmakehän kerrokset.

Ilmatieteenlaitos.fi b [verkkoaineisto]. [viitattu 4.2.2016] Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/tuulet>
Polku: Ilmatieteenlaitos.fi. Teematietoa. Sääennuste. Tunne termit - ymmärrä säätiedotus. Tuulet.

IMMONEN Milja 2014, Sellutehtaan TRS-hajapäästöjen hallinta, Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Diplomityö. [Viitattu 2016-03-13] Saatavissa: <http://www.doria.fi/handle/10024/100049>

INSINÖÖRITOIMISTO PAAVO RISTOLA OY 1991. Kivihiilen pölyäminen kuljetuksen yhteydessä ja varastoinnin aikana Loviisan satamassa.

KOK J. F., PARTELI E J R, MICHAELS T I ja KARAM Bou D 2012, The physics of windblown sand and dust

LAHTI ENERGIA OY 2014. Lahti Energia Bio2020-hanke YMPÄRISTÖVAIKUTUSTEN ARVIOINTI-SELOSTUS [Viitattu 25.3.2016]

MACDOUGALL Catherine R, UHL Michael F. 2002. Empirical Method for Determining Fugitive Dust Emissions from Wind Erosion of Vacant Land: "The MacDougall Method" [Viitattu 2016-02-18]

MACKAY Donald, THIDOBEAUX Louis J. 2011. Handbook of Chemical Mass Transport in the Environment CRC Press, WIND TUNNEL ESTIMATION OF EMISSIONS FROM TAILINGS AS SLURRY.

National Geographic 2016 [verkkoaineisto]. [viitattu 2016-03-23] Saatavissa: <http://education.nationalgeographic.org/encyclopedia/dune/>

NISSINEN, Anni 2014. Boliden Kokkolan Hiukkasmaisten hajapäästöjen arviointi, Centria-Ammattikorkeakoulu. Kemiantekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. [Viitattu 2016-03-18] Saatavissa: https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/76516/nissinen_anni.pdf?sequence=1

Opasnet.fi, Terveysten ja hyvinvoinnin laitos (THL) [verkkoaineisto] [Viitattu 2016-03-17] Saatavissa:
<http://fi.opasnet.org/fi/Etusivu>

Polku: Opasnet.fi. Kaivannaisjätteiden varastointi.

PhysicalGeography.net, 2016 [verkkoaineisto]. [viitattu2016-03-15] Saatavissa:

<http://www.physicalgeography.net/fundamentals/10ah.html>

SIIPILÄ Pekka 1995, Sulfidimalmikaivosten jätealueiden ympäristö- vaikutusten tutkimukset Kanadassa, Ruotsissa ja Norjassa, GEOLOGIAN TUTKIMUSKESKUS Tutkimusraportti 129” Saatavissa:

http://tupa.gtk.fi/julkaisu/tutkimusraportti/tr_129.pdf

SOLIN Kaisa 2016-03-09. Lumitietoja Ilmatieteen laitokselta [sähköpostiviesti]. Vastaanottaja Mari Räsänen. [Tulostettu 2016-03-10.] Saatavissa: Kuopio Mari Räsänen arkistot.

SÄÄMÄNEN Arto, RIIPINEN Hannu, KULMALA Ilpo ja WELLING Irma. 2004. Kansainvälinen yhteistyö- ja tiedonvälityshanke hyvien työympäristöratkaisujenedistämiseksi, Pölyntorjunta. [Viitattu 2016-04-11]

Tuuliatlas.fi [verkkoaineisto]. [viitattu 2016-02-15] Saatavissa:

http://www.tuuliatlas.fi/tuulisuus/tuulisuus_4.html

Polku: Tuuliatlas.fi. Tuulisuus Suomessa.

Tuulivoimayhdistys [verkkoaineisto]. [Viitattu 5.2.2016] Saatavissa:

<http://www.tuulivoimayhdistys.fi/>

Polku: Tuulivoimayhdistys.fi Tietoa tuulivoimasta.

TORANO J.A., RODRIGUEZ R., DIEGO I., RIVAS J.M., PELEGRY A. 2007. Influence of the pile shape on wind erosion CFD emission simulation. [Viitattu 6.2.2016]

U. S. EPA. AP 42 2016a. Introduction to AP 42, Volume I, Fifth Edition [Verkkoaineisto] [Viitattu2016-03-25] Saatavissa: <https://www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/c00s00.pdf>

U. S. EPA. AP 42 2016b. Fifth Edition, Volume I Chapter 13: Miscellaneous Sources, Industrial Wind Erosion [verkkoaineisto] [viitattu2016-03-24] Saatavissa:

<https://www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch13/index.html>

VALTIONEUVOSTON ASETUS ILMANLAADUSTA 2011. 38/2011 Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2008/50/EY EYVL (32008L0050); EUVL N:o L 152, 11.6.2008, s. . Finlex. Lainsäädäntö [Viitattu 2016-03-18] Saatavissa: <http://www.finlex.fi/data/sdliite/liite/5916.pdf>

WHITE Bruce R, RONEY Jason 2000, Simulation and Analysis of Factors Leading to High PM10 Emissions Fluxes at Owens Dry Lake Using an Environmental Wind Tunnel Saatavissa:

https://www.researchgate.net/publication/268262324_Final_Report_Simulation_and_Analysis_of_Factors_Leading_to_High_PM_10_Emissions_Fluxes_at_Owens_Dry_Lake_Using_an_Environmental_Wind_Tunnel

Ymparisto.fi [verkkoaineisto]. [Viitattu 2016-03-18] Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/fi-FI>

Polku: Ymparisto.fi Etusivu. Kartat ja tilastot. Ympäristön tilan indikaattorit. Ilman epäpuhtaudet. Hiukkaspäästöissä ei näy laskua.