



■ OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

CADNA A -OHJELMISTON KÄYTTÖ MAA-AINESTEN OTTOALUEIDEN MURS- KAUSPÖLYN MALLINNUK- SESSA

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma Ympäristötekniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä(t) Henri Rytkönen	
Työn nimi Cadna A -ohjelmiston käyttö maa-ainesten ottoalueiden murskauspölyn mallinnuksessa	
Päiväys	18.5.2014
Sivumäärä/Liitteet	55/9
Ohjaaja(t) Yliopettaja Merja Tolvanen, päätoiminen tuntiopettaja Teemu Räsänen	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Suomen GPS-Mittaus Oy/Ympäristöinsinööri Anna-Maria Tirkkonen	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Insinöörityön tavoitteena oli tutkia ja testata soveltuuko tilaajan käyttämän Cadna A -melumallinnusohjelman ilmanpäästölisäosa (Cadna A-APL) maa-ainestuotannossa syntyvän kivenmurskauspölyn leviämisen mallintamiseen. Mikäli ohjelma soveltuisi tähän tarkoitukseen, tavoitteena olisi laatia tilaajalle suomenkieliset käyttö- ja raportointiohjeet pölymallinnusta varten. Tarve tämän opinnäytetyön teettämiselle syntyi tilaajan halusta laajentaa toimintaansa melumallinnuksen lisäksi myös pölynleviämisen mallintamiseen.</p> <p>Työssä tehtiin testimallinnukset kahdelle maa-ainesten ottoalueelle. Kohteiden valinnan perusteena oli, että niistä oli tehty valmiit melumallit, eikä kaikkia lähtöaineistoja tarvinnut luoda erikseen. Ohjelman testausta varten käytössä oli Cadna A-APL:n englanninkielinen manuaali sekä yrityksen suomenkielinen melumallinnuskäyttöohje. Testimallinnusten edetessä laadittiin myös tilaajan haluamat käyttö- ja raportointiohjeet. Laadittujen käyttö- ja raportointiohjeiden toimivuuden ja selkeyden testasi yrityksen ympäristöinsinööri.</p> <p>Työn tuloksena saatiin laadittua tilaajalle selkeät suomenkieliset käyttö- ja raportointiohjeet pölynleviämisen mallintamista varten. Käyttöohjeissa on esitetty mallinnuksen kulku yksityiskohtaisesti vaihe vaiheelta aina mallikuvien tulostukseen ja tulosten raportointiin asti. Testimallinnusten perusteella voitiin todeta, että ohjelmalla voidaan mallintaa kivenmurskauksesta aiheutuvan pölyn leviämistä maa-ainesten ottoalueilla. Näin ollen malleja voidaan käyttää ympäristölupahakemusten tukena ympäristövaikutuksia arvioitaessa. Mallinnusohjelman luotettavuutta on kuitenkin hyvä jatkossa testata hiukkaspäästömittauksilla. Ohjelmalla tuotettuja malleja voidaan hyödyntää mittausverkon laadinnassa. Tässä työssä keskityttiin vain kivenmurskauksesta aiheutuvan pölyn leviämiseen, mutta ohjelman käyttöä voidaan kehittää myös maa-ainesten ottoalueilla tapahtuvien muiden pölypäästölähteiden hiukkaspäästöjen mallintamiseen.</p>	
Avainsanat Cadna A, mallinnus, murskaus, pöly, hiukkaset	
Julkinen	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Environmental Technology			
Author(s) Henri Rytönen			
Title of Thesis Air Pollution Distribution Modeling in Soil Extraction Areas Using Cadna A Software			
Date	18 May 2014	Pages/Appendices	55/9
Supervisor(s) Mrs Merja Tolvanen, Principal Lecturer and Mr Teemu Räsänen, Lecturer			
Client Organisation /Partners SGM Consulting/ Mrs Anna-Maria Tirkkonen, Environmental Engineer			
<p>Abstract</p> <p>The aim of this thesis was to research and test if the extension (air pollution calculation) for Cadna A noise prediction software that the company uses was suitable for modeling the distribution of stone crushing dust in soil extraction areas. Another goal was to draw up instructions on air pollutant distribution modeling if the software was suitable for this purpose. The need for this thesis came up when the company was willing to expand their activity on air pollutant distribution modeling.</p> <p>Test modelings of this thesis were made on two soil extraction areas. The reason for selecting these areas was that they had completed noise prediction models which enabled to use the same starting data. For testing the software there was the Cadna A-APL manual and the company's instructions for noise prediction available for use. Instructions on air pollutant distribution modeling were made during the test modeling period. Usability and clarity of the instructions were tested by the company's environmental engineer.</p> <p>As a result of this thesis the instructions on air pollutant distribution modeling were made for the company's use. The instructions present the progression of the modeling process all the way to the model picture printing and results reporting. The test modelings showed that the software is capable of modeling the distribution of stone crushing dust in soil extraction areas. Therefore the produced models can be of assistance in environmental impact assessment. The dependability of the modeling results needs to be tested by comparison against particulate emission measurements. The produced models can be used in the preparation of measurement network. The priority of this thesis was to focus on emissions of stone crushing but the software could also be used when modeling the distribution of other emission sources in soil extraction areas.</p>			
Keywords Cadna A, modeling, distribution, dust, particulate matter			
Public			

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	6
2	ALAILMAKEHÄSSÄ OLEVAT HIUKKASET.....	7
2.1	Hiukkasten päästölähteet	7
2.2	Käyttäytymismekanismit.....	8
2.2.1	Hiukkaskokojakauma.....	8
2.2.2	Hiukkasten liikkeet ilmassa.....	10
2.2.3	Hiukkasten sähkövaraus	12
2.2.4	Valon ja hiukkasten keskinäinen vuorovaikutus.....	12
2.2.5	Hiukkasten laskeuma.....	14
2.3	Hiukkaspäästöjen terveysvaikutukset.....	17
2.4	Hiukkasten ympäristövaikutukset	19
3	KIVIAINESTUOTANNOSSA SYNTYVÄ PÖLY	21
3.1	Pölyävät työvaiheet	21
3.2	Kivipölyn syntyminen murskauksessa.....	21
3.3	Murskauksen pölyn hiukkaskokojakauma	23
3.4	Murskauksen ympäristövaikutukset	26
3.5	Lainsäädännölliset ohjauskeinot	27
3.5.1	Ympäristönsuojelulaki, ympäristönsuojeluasetus ja valtioneuvoston asetus	27
3.5.2	Maa-ainelaki ja -asetus	30
4	PÖLYN LEVIÄMISEN MALLINTAMINEN.....	32
4.1	Mallintaminen	32
4.2	Leviämismallien lähtötiedot	32
4.2.1	Päästöt.....	32
4.2.2	Sääolosuhteet.....	33
4.2.3	Alueen maasto	35
4.3	Mallintamisen soveltuminen kivenmurskauksessa	35
4.4	Leviämismallinnusohjelma Cadna A-APL.....	36
5	OHJELMAN TESTAUS JA TYÖOHJEEN LAADINTA.....	38
5.1	Cadna A-APL:n soveltuvuuden selvittäminen ja testaus.....	38
5.2	Mallinnuksen kulku	38
5.3	Mallinnuskohde 1: Laajakummun maa- ja kiviainesalue, Pielavesi.....	40
5.3.1	Mallinnuskohteen 1 kuvaus	40

5.3.2	Murskauspölyn leviämismallit kohteessa 1.....	42
5.4	Mallinnuskohde 2: Rukasmäen maa- ja kiviainesalue, Karttula	45
5.4.1	Mallinnuskohteen 2 kuvaus	45
5.4.2	Murskauspölyn leviämismallit kohteessa 2.....	47
5.5	Tulokset ja niiden arviointi.....	49
5.6	Mallinnustulosten luotettavuuden arviointi.....	49
6	JOHTOPÄÄTÖKSET	51
	LÄHTEET	53

1 JOHDANTO

Ilman saasteet ja erityisesti pienhiukkaset ovat yksi suurimmista ympäristön aiheuttamista terveys-haitoista. Niitä on tutkittu jo pitkään ja niiden terveysvaikutukset tunnetaan jo melko hyvin, vaikka-kin lisätutkimuksia tarvitaan vielä paljon enemmän. Ihmiset ovat tulleet yhä tietoisemmiksi siitä, että pitkäaikainen pienhiukkasille altistuminen voi johtaa vaikeisiin hengityselin- ja sydänsairauksiin ja si-tä kautta lyhentää elinikää huomattavasti (Pennanen ja Salonen 2006). Suurimmat ongelmat pien-hiukkasten osalta löytyvät kaupunkialueilta, joissa suuret liikennemäärät aiheuttavat hiukkaspäästöjä nostattamalla katupölyä ja tuottamalla pakokaasupäästöjä hengitysilmaan (Hiukkastieto.fi). Myös energiantuotanto ja muut polttoprosessit ovat merkittäviä hiukkasten päästölähteitä.

Tämän opinnäytetyön toimeksiantajana toimii Suomen GPS-mittaus Oy, joka muun muassa tekee ympäristölupaselvityksiä maa-ainestuotantoalueille. Lisääntynyt asukkaiden huolenaihe maa-aines-tuotantoalueilla tapahtuvan kivenmurskauksen aiheuttamista pölyhaitoista on lisännyt myös yrityk-sen halua pystyä arvioimaan luotettavasti pölypäästöjen leviämistä tuotantoalueen lähiympäristöön. Tämän työn tavoitteena onkin tutkia soveltuuko yrityksen käyttämä Cadna A -melumallinnusohjelma myös murskauksesta aiheutuvan pölyn leviämisen mallintamiseen. Cadna A on saksalaisen DataKus-tik GmbH:n kehittämä laskentaohjelma pääasiassa melupäästöjen mallintamista varten.

Työ toteutetaan tekemällä aluksi kirjallisuusselvitys, jossa selvitetään kuinka pölyhiukkaspäästöjä voidaan mallintaa ja minkälaisia lähtötietoja mallintamista varten tarvitaan. Lisäksi selvitetään hiuk-kaspäästöjen suurimpia lähteitä ja vaikutuksia ympäristöön ja ihmisten terveyteen. Tärkein vaihe työssä on selvittää soveltuuko melumallinnusohjelma Cadna A:n ilmanpäästölisäosa (Optio APL) ki-venmurskauksen pölypäästöjen mallintamiseen. Tämä vaihe toteutetaan selvittämällä mahdollisim-man kattavasti millaisia hiukkaspäästöjä prosessissa syntyy ja mitkä ovat mallinnusohjelman ominai-suudet ja rajoitukset sekä mitkä ovat ilmanpäästölisäosan hankintakustannukset. Ohjelman kustan-nuksien ja soveltuvuuden selvittyä voidaan tehdä päästös hankinnasta.

Työn tuloksena on tarkoitus tuottaa edustavat pölyhiukkaspäästöjen leviämismallit valituista testi-kohteista sekä laatia Cadna A-APL:n käyttöohje pölyn leviämisen mallintamista varten. Käyttöohjee-seen halutaan myös asian mukainen mallinnustuloksien raportointiohje. Käyttö- ja raportointiohjeen laadinnassa sekä ohjelman testauksessa apuna käytetään Anna-Maria Tirkkosen aikaisemmin Suo-men GPS-mittaus OY:lle opinnäytetyönä laatimaa melumallinnusohjetta. Tämän työn testimallinnuk-sia varten kohteina tullaan käyttämään samoja, Tirkkosen opinnäytetyössään käyttämiä kohteita.

2 ALAILMAKEHÄSSÄ OLEVAT HIUKKASET

2.1 Hiukkasten päästölähteet

Hiukkaspäästöjen syntyminen Suomessa jakaantuu pääasiassa liikenteen, turvetuotannon ja energiantuotannon päästöihin. Energiantuotannossa päästöt syntyvät puun, hiilen, turpeen ja nestemäisten polttoaineiden poltossa. (Alaviippola ja Pietarila 2011.)

Mekaanisten ilmiöiden, kuten tuulen ja hankauksen seurauksena ilmaan syntyy karkeita hiukkasia. Pienhiukkaset sen sijaan syntyvät kaasusta tiivistymällä. Esimerkiksi liikenteen nostattama katupöly lukeutuu karkeisiin hiukkasiin ja pakokaasupäästöt pienhiukkasiin. Hiukkasia, jotka ovat syntyneet suoraan hiukkasmuodossa, kutsutaan primäärihiukkasiksi ja ilmassa syntyneitä sekundäärihiukkasiksi. (Hiukkastieto.fi.)

Ilmakehän aerosolihiukkasia syntyy sekä luonnossa että antropogeenisesti eli ihmistoiminnan seurauksena (Taulukko 1). Luonnollisia päästölähteitä ovat esimerkiksi tulivuoret, aavikot ja kasvillisuus ja antropogeenisiä muun muassa polttoprosessit. Hiukkasia voi syntyä paikallisesti tai ne voivat tulla kaukokulkeumana pitkienkin matkojen päästä. Noin puolet Suomen pienhiukkasista ovat kulkeutuneet ilmavirtausten mukana Itä- ja Keski-Euroopasta. Suomen Ympäristökeskuksen (SYKE) vuonna 2009 julkaiseman arvion mukaan primäärisiä hiukkaspäästöjä syntyi vuonna 2007 noin 34 000 tonnia. **Error! Reference source not found.** voidaan huomata, että kotitalouksien pienpoltto on selvästi suurin pienhiukkasien tuottaja Suomessa. (Hiukkastieto.fi.)

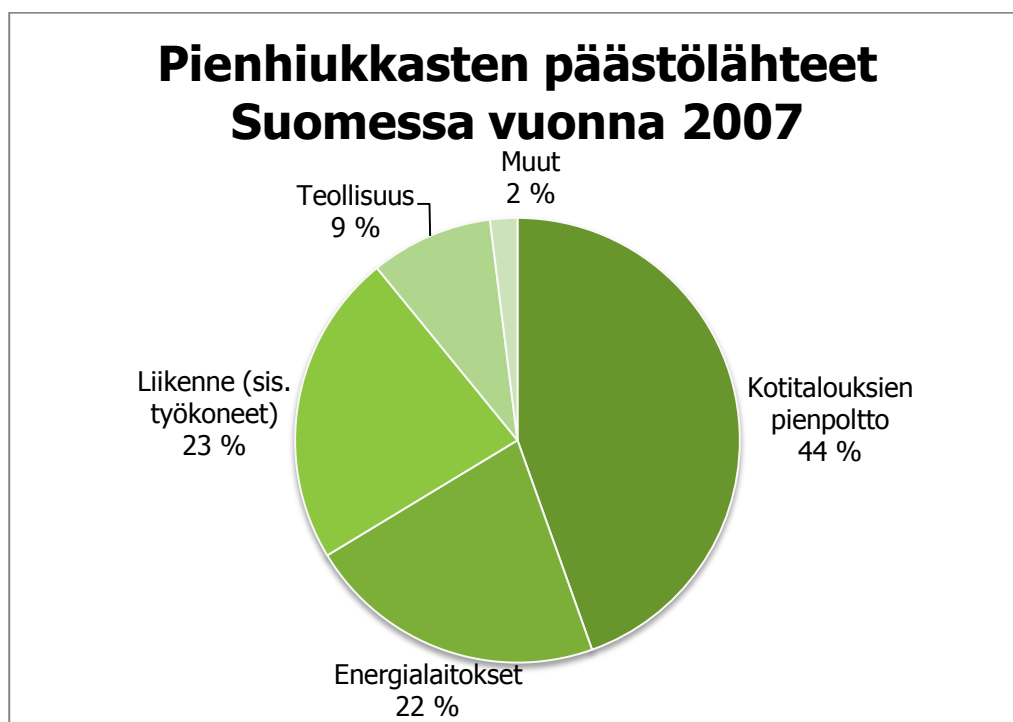
Taulukko 1 Luonnossa ja ihmisen toiminnasta syntyvät hiukkaspäästöt. (Pennanen ja Salonen 2006, 8.)

Hiukkaskoko	Ihmisen toiminnan synnyttämät hiukkaset	Luonnossa syntyvät hiukkaset
Karkeat hengitettävät hiukkaset (2,5 – 10 µm)	Liikenteen jarru-, rengas- ja nastapöly, asfalttipöly Hiekoitushiekan ja tiesuolan pöly Maansiirtopöly Teollisuuden, energiantuotannon, satamien jne. materiaalikäsitely	Tuulen kuljettama hiekkapöly Merisuola Kasvijäänteet, siitepölyosaset Homeitiöt, maaperän bakteerikomponentit (esim. endotoksiini)
Pienhiukkaset (< 2,5 µm)	Pienpolton ja liikenteen pakokaasujen nokipäästöt Energialaitosten lentotuhka Teollisuusprosessien suorat hiukkaspäästöt Monien lähteiden kaasumaisista hiilivedyistä muodostuvat orgaaniset hiukkaset ja rikkidioksidista ja typenoksideista muodostuvat epäorgaaniset hiukkaset	Metsä- ja maastopalojen ja tulivuoren purkausten nokipäästöt ja kaasupäästöistä muodostuvat orgaaniset ja epäorgaaniset hiukkaset Puiden ja muun kasvillisuuden hiilivetyypäästöistä muodostuvat orgaaniset hiukkaset

Puun pienpoltolla tarkoitetaan kotitalouksien puun polttoa, johon luetaan uunit, takat, liedet, kiukaat, vesipadat ja lämmityskattilat. Puun pienpolton suuri osuus (41 %) johtuu noin 3,7 miljoonasta

puukäyttöisestä tulisijasta. Osuus kuitenkin pienenee, kun päästökertoimet päivitetään nykyaikaisiin arvoihin. Noin puolet puun poltosta tapahtuu omakotitaloissa ja toinen puoli loma-asunnoilla ja maataloilla. (Pennanen ja Salonen 2006, 8.)

Kivenmurskaustoiminta luetaan yhdeksi osaksi teollisuutta, joka Kuvio 1 mukaan aiheuttaa 9 % kaikista Suomen pienhiukkaspäästöistä (Alaviippola ja Pietarila 2011, 6). Kuitenkin murskaustoiminta on vain murto-osa kaikesta Suomen teollisuudesta (Toivonen 2010, 85).



Kuvio 1 Suomen pienhiukkasten syntyminen vuonna 2007 (Alaviippola ja Pietarila 2011, 6) Kuvio Henri Rytkönen 2014

2.2 Käyttäytymismekanismit

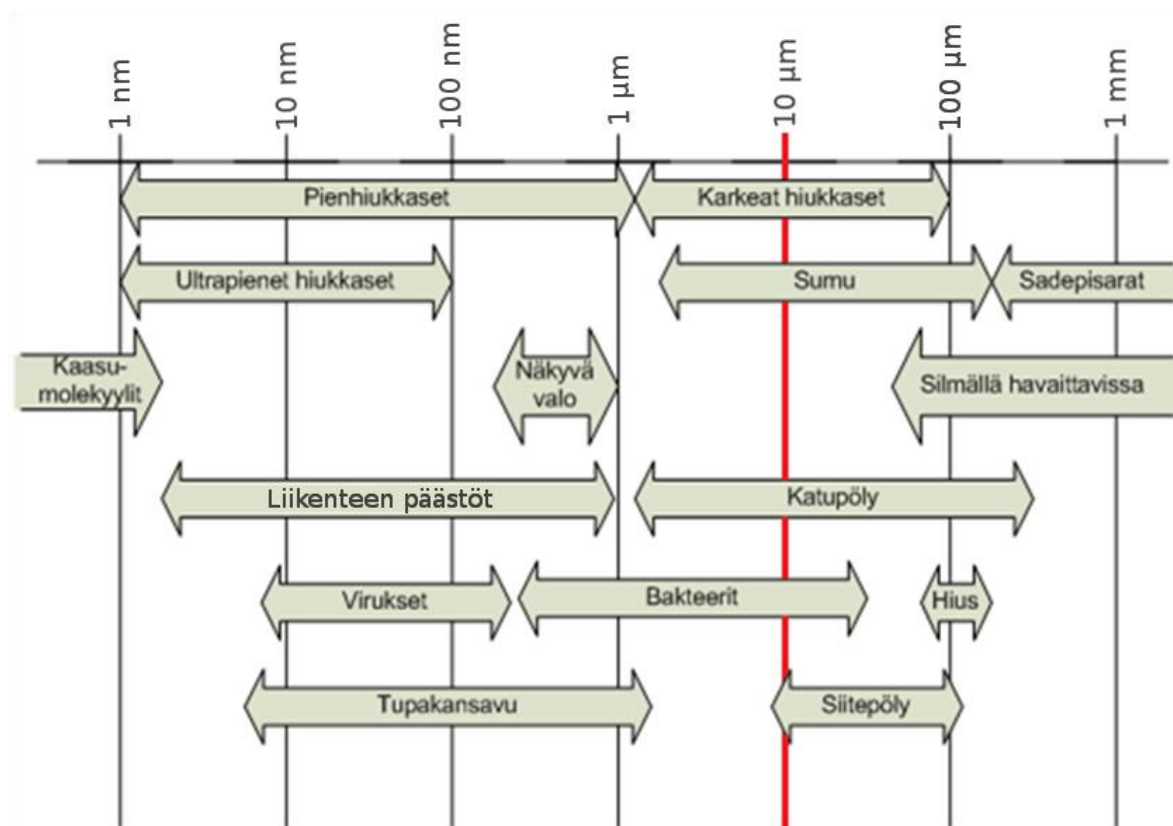
2.2.1 Hiukkaskokojakauma

Hiukkaskoon mittayksikkönä käytetään joko mikrometriä (μm) tai nanometriä (nm). Hiukkasten koot voidaan jaotella useisiin luokkiin niin, että pienimmät niistä ovat vain muutamien molekyylien muodostamia rypäitä. Suurimmat taas ovat jo silmin erotettavia pölyhitusia. Alarajan hiukkaskokoalueelle rajaavat hiukkasia muodostavien molekyylien koko, kun taas yläraja määräytyy hiukkasten ilmakehässä viettämästään ajasta eli viipymääjasta. Aerosolihiukkaset voidaan yleensä määritellä halkaisijaltaan yhdestä nanometristä sadan mikrometrin kokoisiksi. Aerosolihiukkasten koko on niiden käyttäytymisen kannalta keskeinen tekijä. Se vaikuttaa merkittäväällä tavalla niiden kulkeutumiseen ilman kautta ympäristöön. (Hiukkastieto.fi.)

Hiukkaset jaetaan yleensä pieniin ja karkeisiin hiukkasiin (Kuvio 2). Suurimmat hiukkaset eli halkaisijaltaan $2,5 - 100 \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{100-2,5}$) kokoisia kutsutaan karkeiksi ja alle $2,5 \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2,5}$) kokoisia pien-

hiukkasiksi. Hiukkasia, jotka ovat alle 10 µm kokoluokkaa (PM₁₀) kutsutaan hengitettäviksi hiukkasiksi. Hiukkasia jotka alittavat 100 nanometrin kokoluokan sanotaan ultrapieniksi tai nanohiukkasiksi. (Hiukkastieto.fi; Pennanen ja Salonen 2006, 10.)

Kuvio 2 havainnollistaa karkeiden hiukkasten (PM_{100-2,5}), pienhiukkasten (PM_{2,5}) ja ultrapienien hiukkasten sijoittumisen kokoluokittain. Havainnollistamista helpottamaan, on kuvaan lisätty myös muita yleisesti tunnettuja kokoluokkia, kuten näkyvän valon aallonpituus, virukset, bakteerit, tupakansavu, hius sekä silmän havaintoalueen raja. Hengitettävien hiukkasten (PM₁₀) alueen alkamisraja on havainnollistettu kuvaan punaisella viivalla.



Kuvio 2 Esimerkkejä tyypillisten aerosolihukkasten kokoluokista (Hiukkastieto.fi)

Hiukkaskokojakauma ilmoittaa hiukkasten määrän koon funktiona. Monodispersin eli saman kokoisista hiukkasista koostuvan aerosolin esiintyminen luonnossa on mahdotonta. Sitä voidaan tosin tuottaa laboratorio-olosuhteissa mittausrakenteiden kalibrointia varten. Ilmakehässä esiintyvä aerosoli sen sijaan koostuu aina erikokoisista hiukkasista ja sitä kutsutaankin polydispersiksi. Kokojakauma ilmoitetaan hiukkasten lukumäärän, massan tai pinta-alan avulla. Hiukkasten määrä koostuu suurimmaksi osaksi ultrapienistä hiukkasista, kun taas suurin massa koostuu karkeista hiukkasista. Laskettujen hiukkasten määrän ollessa tarpeeksi suuri, kokojakauma lähenee log-normaalia eli jakaumaa, joka on normaalijakauman muotoinen logaritmisella asteikolla kuvattuna. (Hiukkastieto.fi.)

Hiukkaskokojakauma ilmakehässä määräytyy hiukkasten lähteiden aerosolidynaamisten prosessien perusteella. Massakoko- ja lukumääräjakaumat ilmakehässä koostuvat yleensä useasta log-normaalista moodista. Moodit voidaan jakaa neljään luokkaan (Hiukkastieto.fi.):

- nukleaatiomoodiin (<10 nm), jotka muodostuvat kaasuista tiivistymällä,
- aitken-moodiin (muutamista kymmenistä hiukan yli sataan nanometriin),
- kertymä- eli akkumulaatiomoodiin (>100 nm – 1 µm) ja
- karkeaan moodiin (>2,5 µm).

Näiden jakaumien ylä- ja alarajat voivat paikasta ja olosuhteista riippuen vaihdella jonkin verran. (Hiukkastieto.fi.)

Verrattuna lukumääräjakaumiin massajakaumat painottuvat merkittävästi suurempiin kokoluokkiin, koska massa on verrannollinen tilavuuteen ja näin ollen halkaisijan kolmanteen potenssiin. Aerosolidynaamiset prosessit kuten hiukkasten koagulaatio ja kaasujen tiivistyminen ohjaavat kokojakaumia kohti suurempia hiukkasia. Hiukkasten poistuminen ilmakehästä tapahtuu depositiolla eli laskeuman avulla. Erilaisten depositioprosessien vaikutuksesta jakaumien huiput madaltuvat ja näin ollen ne pienentävät hiukkasten pitoisuutta ilmassa. (Hiukkastieto.fi.)

2.2.2 Hiukkasten liikkeet ilmassa

Ilmassa leijuu pääasiassa ilmavirtauksien mukana liikkuvia aerosolihiukkasia. Hiukkasten ilmavirtauksen seuraamiskyky riippuu niiden massan hitaudesta eli inertiaasta. Pienemmät hiukkaset reagoivat ilmavirtauksen muutoksiin suuria hiukkasia herkemmin. (Hiukkastieto.fi.)

Kun kappale on ilmassa, siihen vaikuttaa aina alaspäin suuntautuva painovoima. Lisäksi kappaleen liikkuessa vasten ilmavirtausta, siihen vaikuttaa liikettä jarruttava ilmanvastusvoima. Ilmanvastus on sitä voimakkaampi mitä suurempi kappaleen nopeus on. Kappaleen putoamisnopeus on vakio (asettumisnopeus), kun voimat ovat tasapainossa. Aerosolihiukkaset saavuttavat asettumisnopeutensa nopeasti, koska ne ovat verrattain pieniä massaansa nähden. Kuten Taulukko 2 voidaan huomata, asettumisnopeus (keskimääräinen putoamisnopeus) riippuu merkittävästi kappaleen halkaisijasta. (Hiukkastieto.fi.)

Taulukko 2 Hiukkasen halkaisijan vaikutus sen putoamisnopeuteen ilmassa (Hiukkastieto.fi)

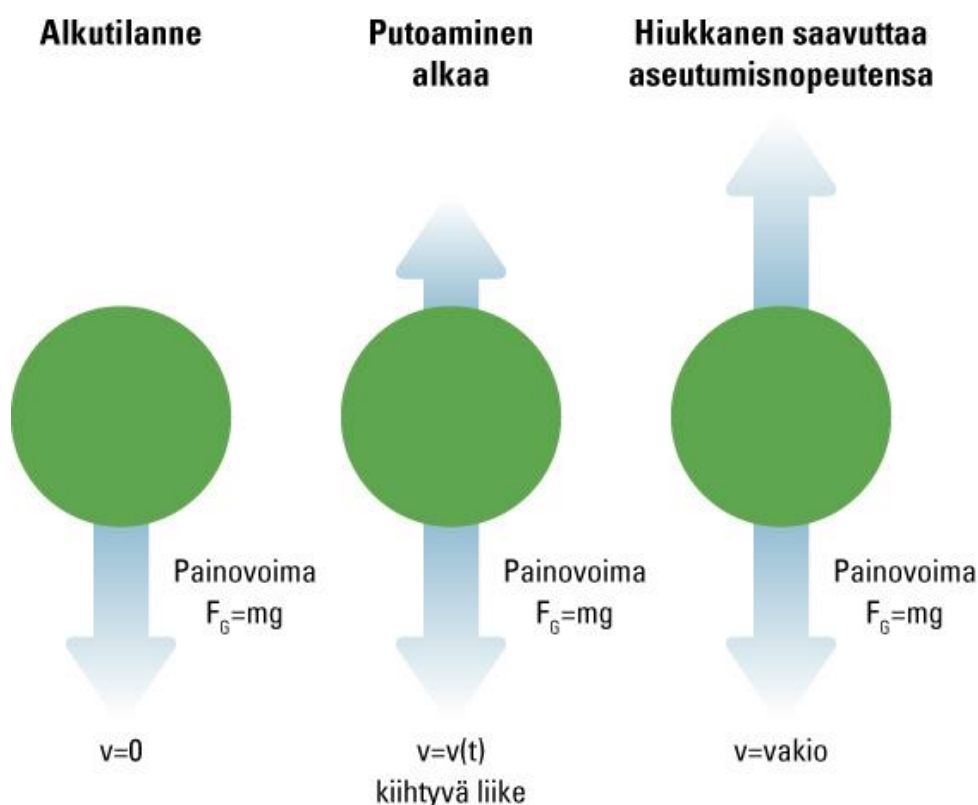
Hiukkasen halkaisija	Keskimääräinen putoamisnopeus
100 µm	25 cm/s
10 µm	3 mm/s
1 µm	0,03 mm/s

Asettumisnopeutta käytetään hiukkasen aerodynaamisen halkaisijan määrittämiseen. Aerodynaaminen halkaisija kuvaa hiukkasen kokoa, jolla on vastaava asettumisnopeus kuin pyöreällä hiukkasella, jonka tiheys on 1 g/cm³. (Hiukkastieto.fi.)

Sedimentaatiolla tarkoitetaan hiukkasen poistumista ilmasta putoamalla eli gravitaation vaikutuksesta. Sedimentaatio on kuitenkin merkityksetöntä diffuusion ja ilmavirran liikkeisiin verrattuna, koska pienhiukkasten putoamisnopeudet ovat sen verran pieniä. Sedimentaatio on kuitenkin merkittävä depositiomekanismi karkeille hiukkasille. Sedimentaation takia hiukkasten laskeutumisetä pinnalle kutsutaan kuivalaskeumaksi. (Hiukkastieto.fi.)

Depositioimekanismien tehokkuus vaikuttaa hiukkasten viipymäaikaan ilmassa. Viipymäaikaan vaikuttavat siis mm. hiukkasen koko, ilmavirtaukset ja korkeus maanpinnasta. Karkeat hiukkaset voivat poistua muutamassa tunnissa, kun taas pienten hiukkasten viipymä alailmakehässä voi olla päiviä tai viikkoja. Näin pitkässä ajassa pienhiukkaset voivat siirtyä kaukokulkeumana kauas syntypaikaltaan. Yläilmakehässä eli stratosfäärissä pienten hiukkasten viipymäaika voi olla jopa vuosia, jolloin ne kulkeutuvat koko pallonpuoliskolle. (Hiukkastieto.fi.)

Kuvio 3 on esitetty putoavaan hiukkaseen kohdistuvat voimat. Alkutilanteessa, kun nopeus $v=0$, hiukkanen on paikallaan. Tällöin siihen vaikuttaa voima F_G . Kun putoaminen alkaa, liike kiihtyy $v=v(t)$ ja hiukkaseen kohdistuu myös ilmanvastusvoima F_D . Hiukkasen putoamisnopeus on vakio, kun painovoima ja vastusvoima ovat samansuuruisia. (Hiukkastieto.fi.)



Kuvio 3 Putoavaan hiukkaseen vaikuttavat voimat (Hiukkastieto.fi)

2.2.3 Hiukkasten sähkövaraus

Pienhiukkaset kykenevät kuljettamaan yhtä tai useampaa sähkövarausta, jolloin ne ovat vuorovaikutuksessa sähkökentän kanssa. Noin 1 - 10 % ilmakehän hiukkasista ovat luonnollisesti varautuneita. Hiukkasten varautumiseen ilmakehässä vaikuttavat maaperän radioaktiivisista aineista, kuten radonista, tuleva ionisoiva säteily ja ilmakehän ulkopuolelta peräisin oleva kosminen säteily. Hiukkasten ja ionien jatkuva törmäily aerosolissa aiheuttaa hiukkasten varautumista ja vastaavasti varausten purkautumista. (Hiukkastieto.fi.)

Suomessa ionisoiva säteily voidaan jakaa kolmeen syntytapaan, jotka ovat kosmiset taustasäteet, radonin hajoamisesta peräisin oleva alfasäteily ja muista maaperän radioaktiivisista aineista syntyvä gammasäteily. Säteily ei suoranaisesti vaikuta pienhiukkasiin vaan ensisijaisesti kaasumolekyyleihin, jotka puolestaan varaavat pienhiukkaset törmätessään niihin. Hiukkanen voi myös, osuessaan vastakkaismerkkisesti varautuneeseen hiukkaseen, neutralisoitua. Myös staattista varautumista voi tapahtua, kun hiukkanen irtoaa kiinteästä pinnasta tai nestepinnasta mekaanisesti. (Hiukkastieto.fi.)

Hiukkasten ja sähkökentän vuorovaikutusta voidaan käyttää hyväksi mittaamisessa. Voidaan esimerkiksi tutkia kuinka niiden liike muuttuu sähkökentässä tai kuinka hiukkaset kuljettavat sähkövirtaa. Sähkövirran muutokset kertovat aerosolin hiukaspitoisuudesta ja hiukkasten liikkeen muutokset taas niiden kokoluokituksesta. Hiukkasten varaamista käytetään myös niiden suodattamiseen esimerkiksi sisäilmasta. (Hiukkastieto.fi.)

2.2.4 Valon ja hiukkasten keskinäinen vuorovaikutus

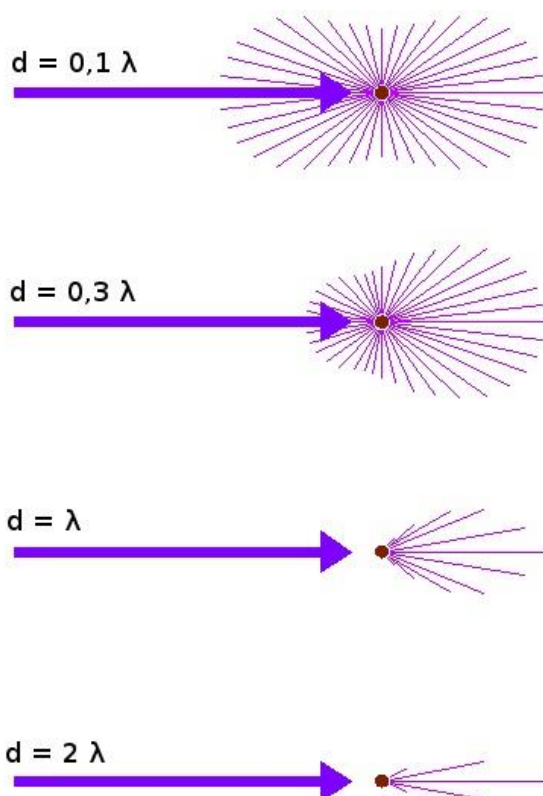
Näkyvä valo siroaa tai absorboituu törmätessään hiukkaseen. Sirronnasta puhutaan, kun kappale lähettää edelleen valoa heijastaen, taittaen ja taivuttaen valonsäteitä. Kun valo osuu hiukkaseen, joka koostuu absorboivasta aineesta, muuttuu osa energiasta esimerkiksi lämpöenergiaksi tai kemialliseksi energiaksi. Absorptio tapahtuu riippuen hiukkasen koostumuksesta, mutta kaikissa hiukkasissa tapahtuu valon sirontaa. (Hiukkastieto.fi.)

Hiukkasen koko suhteessa valon aallonpituuteen vaikuttaa voimakkaasti niiden keskinäiseen vuorovaikutukseen. Tässä suhteessa alle 50 nm:n kokoiset hiukkaset (ultrapienet hiukkaset) käyttäytyvät kuten kaasumolekyylit, koska ne ovat merkittävästi valon aallonpituutta pienempiä. Tässä kokoluokassa (ns. Rayleigh-alue eli elastisen sironnan alue) valo siroaa hiukkasesta symmetrisesti sekä eteen- että taaksepäin (valon tulosuuntaan nähden) eikä kappaleen muodolla juuri ole merkitystä. Valon aallonpituuden kanssa saman kokoluokan hiukkasilla (Mie-sironta alue) eteenpäin sironta on vahvasti dominoivaa. Hiukkasen halkaisijan ollessa suurempi kuin 1 μm , puhutaan geometrisen sironnan alueesta. Tällöin tulevaan valonsäteeseen nähden kappaleen asennolla ja muodolla sekä optisilla ominaisuuksilla on sironneen valon määrään nähden suuri vaikutus. (Hiukkastieto.fi; Korhonen 2012, 17.)

Kuvio 4 voidaan huomata, että valon sironta siirtyy enemmän eteenpäin mentäessä Rayleigh-alueelta kohti geometrisen sironnan aluetta.

Valon intensiteetti vaimentuu absorptioon ja sironnan seurauksena. Tätä ilmiötä kutsutaan ekstinktioksi, joka kuvaa sitä kuinka paljon valoa katoaa, kun se matkaa läheestä havainnoitsijalle. Ilmiön voimakkuus riippuu hiukkasen tai molekyylin kemiallisesta koostumuksesta. Ekstinktio on helposti huomattavissa autereena eli näkyvyyden heikkenemisenä. Aerosolin kykyä vaimentaa valoa kuvataan optisella tiheydellä. (Hiukkastieto.fi; Korhonen 2012, 21.)

Edellä mainittujen ilmiöiden perusteella voidaan huomata, että kappaleen koko ja koostumus vaikuttavat sen optisiin ominaisuuksiin. Hyvänä esimerkkinä hiukkasten aiheuttamista valoilmioista voidaan pitää iltaruskoa, joka aiheutuu valon sirotessa ilmakehän pienhiukkasista ja kaasumolekyyleistä. Siirronnalla on myös suuri merkitys maapallon ilmastoon, koska se vaikuttaa maapallon säteilytaseeseen. Ekstinktio ja sironta ovat myös yleisesti aerosolihiukkasten ominaisuuksien, kuten hiukkasten kokojakauman ja määrän, mittaamiseen käytettyjä tapoja. (Hiukkastieto.fi.)



Kuvio 4 Kappaleen (hiukkanen) halkaisijan ja aallonpituuden suhteen vaikutus valon sirontaan. Kuviossa valon tulosuunta on esitetty nuoliilla. (Korhonen 2012, 18.) Kuvio Henri Rytönen 2013

2.2.5 Hiukkasten laskeuma

Kuivalaskeuma

Kuivalaskeumaan vaikuttavia tekijöitä ovat hiukkasen koko, tiheys ja muoto sekä laskeutumispinnan ominaisuudet ja ilman turbulentsisuus. Maan pinnalla, muutamien metrien korkeuteen yltävän ilmakerroksen turbulentsisuus vaikuttaa erityisesti alle 10 µm kokosiin hiukkasiin (PM₁₀), kun taas niitä suuremman kokoluokan hiukkasiin painovoima vaikuttaa merkittävämmiin. Kuivalaskeuman vuo (F_k) ilmoittaa kuinka paljon hiukkasia laskeutuu aikayksikössä pinta-alaa kohti ja se on verrannollinen pintailmassa leijuvien hiukkasten pitoisuuteen (c_a) kaavan 1 mukaisesti:

$$F_k = v_d * c_a , \quad (1)$$

jossa F_k on kuivalaskeuman vuo (g/(m²/s)), v_d depositionopeus ja c_a hiukkasten pitoisuus ilmassa. (Toivonen 2010, 31.)

Yli 10 µm kokoluokan hiukkaset deponoituvat laskeutumalla ja niiden depositionopeus vastaa keskimäärin niiden asettumisnopeutta v_{TS} . Tunnettaessa hiukkasen lähtökorkeus h ja tuulen nopeus U korkeuteen h asti, hiukkasten kulkema matka x on mahdollista laskea kaavasta:

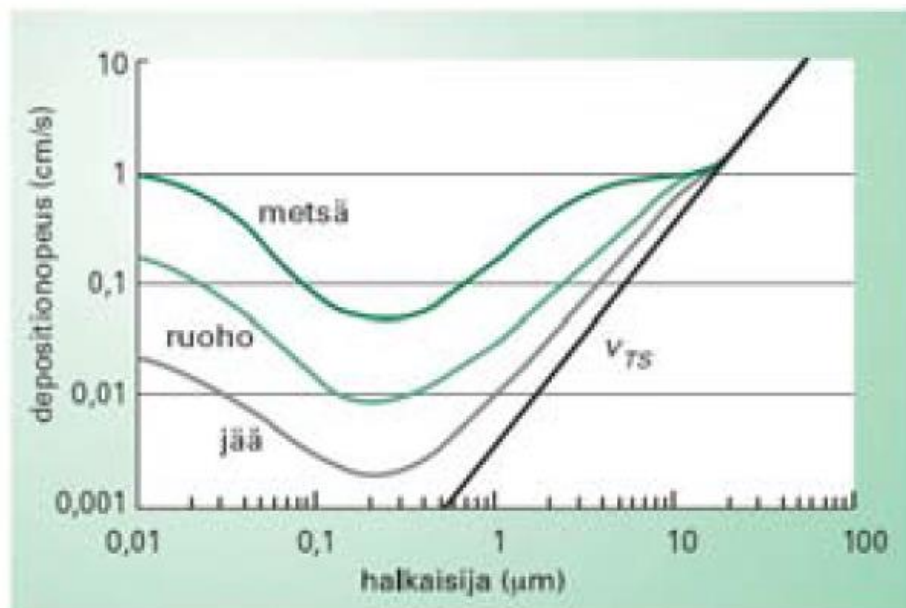
$$x = \frac{U h}{v_{TS}} . \quad (2)$$

Kaavassa 2 ei oteta huomioon yksittäisen suuren hiukkasen kulkeutumisenopeuteen suuresti vaikuttavaa ilman pystysuuntaista liikettä. (Toivonen 2010, 32.)

Alle 10 µm kokoluokan hiukkaset deponoituvat kahdessa vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa ne kulkeutuvat muutaman millimetrin päähän pinnasta pyörteilevän ilman vaikutuksesta. Toisessa vaiheessa, vakaassa ilmakerroksessa, 1 µm:ä suuremmat hiukkaset jatkavat matkaansa kohti pintaa, kiinnittyen siihen joko sivuamisen tai törmäyksen vaikutuksesta. Pienempien hiukkasten kulkeutuminen pintaa kohti tapahtuu diffuusion avulla. (Toivonen 2010, 32.)

Ilman stabiilisuus on riippuvainen ilman ja maan pinnan lämpötilasta sekä tuulen nopeudesta. Alilmakehän stabiilisuus ja pinnan rosoisuus vaikuttavat pintailman pyörteilyyn, jonka voimakkuus taas vaikuttaa hiukkasten depositionopeuteen. Koska päivällä ilman ollessa epävakaampaa, aiheutuu turbulentsisuutta paksussa ilmakehässä, jonka seurauksena laskeutuminen on verrattain voimakkaampaa päivällä kuin yöllä. Vastaavasti yöllä laskeutuminen on vähäisempää, johtuen ilman pystysuuntaisten virtauksien ja pyörteilyn heikkenemisestä. Metsässä hiukkasten depositionopeus voi olla moninkertaisesti suurempaa kuin samankokoisilla hiukkasilla avonaisessa maastossa, kuten jäällä. Tämä johtuu siitä, että metsässä pinta on huomattavasti rosoisempaa kuin meren, järven tai lammen jäällä. Kuitenkin karkeisiin hiukkasiin, joiden aerodynaaminen halkaisija on enemmän kuin 20 µm, ei il-

man turbulentsuudella tai pinnan rosoisuudella ole merkittävää vaikutusta. Tätä ilmiötä on havainnollistettu Kuvio 5. (Toivonen 2010, 32.)



Kuvio 5 Hiukkasen halkaisijan vaikutus depositionopeuteen alailmakehässä eri rosoisuuspinnoilla (Toivonen 2010, 33)

Märkälasseuma

Märkälasseuma muodostuu, kun veden ja hiukkasen muodostama yhdistelmä laskeutuu maan pinnalle. Hiukkasia voi napata ilmassa mukaansa vesi- tai sumupisarat, lumihitaleet sekä pilvessä matkaavat lumikiteet. Lumisateen vaikutus hiukkasten poistamiseen ilmasta on kuitenkin heikkoa, vaikka lumi olisikin suhteellisen märkää. Pienhiukkanen voi lisäksi toimia ytimenä, johon vesipisara tiivistyy. Laskeumaa tarkastellessa oletetaan pisarat haihtumattomiksi. Kuten kuivalasseumassa, märkälasseumassakin on havaittavissa kaksi eri laskeutumisvaihetta. Ensimmäisessä vaiheessa pisara kaappaa hiukkasen mukaansa ja toisessa vaiheessa tämä hiukkasen ja pisaran muodostama yhdistelmä laskeutuu maan pinnalle. Hiukkasten ja pisaran toisiinsa tarttumisen massamäärää kuvataan kaavalla

$$W_{p,r}^i = \Lambda_{ip} * C_{i,p} , \quad (3)$$

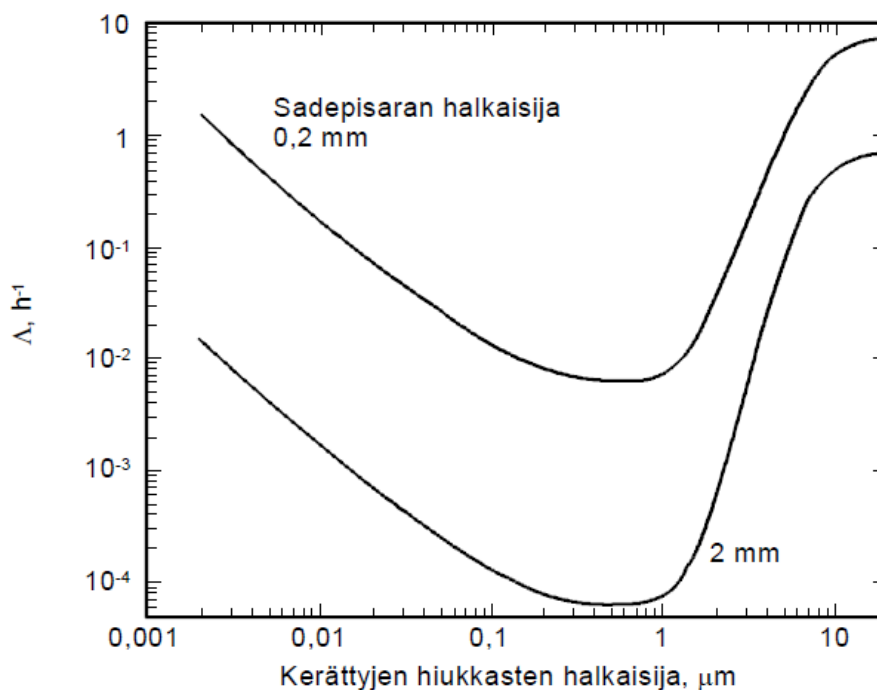
jossa $W_{p,r}^i$ on massamäärä (g/(mg*h)), Λ_{ip} pesukerroin (1/h) ja $C_{i,p}$ hiukkaspitoisuus ilmassa (g/mg). (Toivonen 2010, 33.)

Sateen aiheuttama hiukkasen märkälasseuma pinta-alaa kohden tunnissa, saadaan kaavasta

$$F_m = \int_0^h C(z,t) * \Lambda(z,t) dz , \quad (4)$$

jossa F_m on märkälasseuma ($g/(m^2 \cdot h)$), C hiukkaspitoisuus korkeudella z , Λ pesukerroin korkeudella z ja h pilven yläpinnan korkeus. (Toivonen 2010, 33.)

Pesukerroin kuvaa märkädeposition tehokkuutta eli sateen kykyä kaapata hiukkasia pois ilmasta. Sen arvoon vaikuttavat sateen sijainti ja rankkuus, kuten myös pisaran ja hiukkasten toisiinsa kiinnittymiseen johtaneiden kohtaamisien määrä. Hiukkasen koolla on suuri vaikutus kiinnittymiseen. Suuren hiukkasen kulku ilmavirtauksen mukana muuttaa suuntaansa hitaammin kuin pieni hiukkanen. Kuitenkin ilmavirta ohjautuu sitä helpommin hiukkasen ohi mitä pienempi se on. Kun hiukkasen koko pisaraan verrattuna kasvaa, törmäämisen todennäköisyyskin kasvaa. Kuvio 6 voidaan huomata kuinka hiukkasen halkaisijan kasvaessa yhdestä mikrometristä kymmeneen, pesukertoimen arvo kasvaa räjähdymäisesti. (Toivonen 2010, 34.)



Kuvio 6 Hiukkaskoon vaikutus pesukertoimen Λ arvoon eri sadeepisaroiden halkaisijoilla sateen voimakkuuden ollessa 1 mm/h (Toivonen 2010, 34)

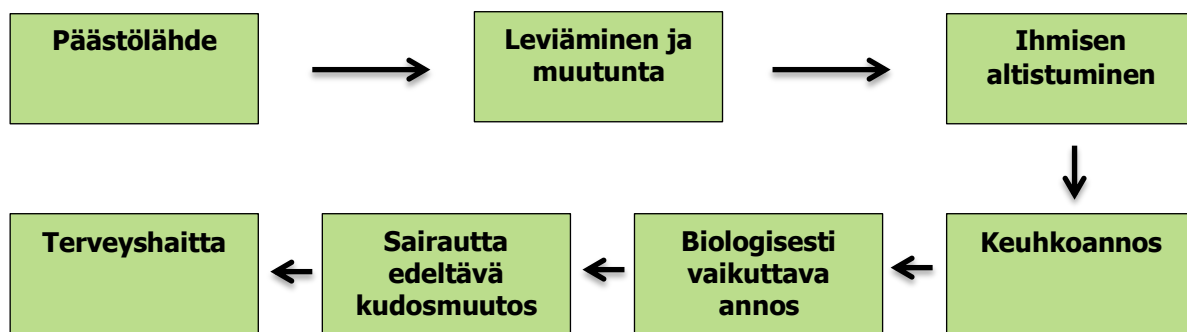
Tyypillinen sadepisaran koko maan pinnan läheisyydessä on 0,5 - 5 mm, mutta tiikusateessa koko voi olla noin 0,1 mm. Pienten hiukkasten on osuttava tarkasti pisaran keskelle, etteivät ne ohjautu ilmavirtauksen mukana sen ohi. 1 μm kokoluokan hiukkanen joutuu kohtaamaan jopa tuhansia pisaroita, kunnes törmäys tapahtuu. Vastaavasti suuret, kokoluokaltaan 20 μm :n hiukkaset törmäävät miltein varmasti ensimmäiseen vastaan tulevaan pisaraan sen koosta riippumatta. Myös sateen rankkuus lisää pesukertoimen arvoa. Näin ollen rankka, pitkä kestoinen tiikusade poistaa pienhiukkasia ilmasta kaikkein tehokkaimmin. Hiukkaspitoisuuden väheneminen ilmasta voidaan laskea kaavalla

$$C = C_0 e^{-At} , \quad (5)$$

jossa C on hiukkaspitoisuus sateen jälkeen ja C_0 ennen sadetta. Kaavan avulla voidaan laskea kuinka pitkäkestoinen ja voimakas sade vaaditaan pölyhiukkasten poistamiseen ilmasta. Esimerkiksi, jos sadepisarat ovat halkaisijaltaan 1 mm kokoisia ja sateen voimakkuus on 1 mm/m²h, poistuu puolet 10 µm kokoluokan hiukkasista 50 minuutin kuluessa, kun taas 3 µm hiukkasien kohdalla sama tapahtuu vasta 10 tunnin kuluttua. (Toivonen 2010, 34 - 35.)

2.3 Hiukkaspäästöjen terveysvaikutukset

Alilmakehän hiukkasmaiset saasteet muodostavat monimuotoisen seoksen, jonka koostumus vaihtelee paljon ajan ja paikan mukaan. Paikalliset päästöt (ns. primäärihiukkaset) vaikuttavat seoksen sisältämien hiukkasten jakaumaan, kokoon ja kemialliseen koostumukseen. Myös ilmakehän hiukkasten toissijainen muodostuminen, kulkeutuminen ja muuntuminen ovat merkittäviä. Hiukkasten siirtyminen ulkoa sisätiloihin vaikuttaa osaltaan ihmisen altistumiseen (keuhkoannos). Osaltaan myös ihmisen perimä, elämäntavat, sairaudet ja muut elinympäristön tekijät vaikuttavat heti tai myöhemmin ilmaantuviin terveydellisiin haittoihin. (Pennanen ja Salonen 2006, 7.)



Kuvio 7 Ilman epäpuhtauksien terveysvaikutusten vaiheet (Pennanen ja Salonen 2006, 7)

Ilmassa leijuvien hiukkasten vaikutukset terveyteen ulottuvat lievistä ja ohimenevistä oireista pysyviin sairauksiin ja jopa kuolemaan. Suuri määrä ihmisiä kokee satunnaisesti lieviä vaikutuksia, kun taas vakavia haittoja kokevien määrä on selvästi pienempi. Vakavin terveyshaitta on eittämättä ennenaikainen kuolema ja useimmiten se tapahtuu pitkään jatkuneesta altistumisesta pienhiukkasille. Pienhiukkasten aiheuttamia pitkäaikaisia sairauksia ovat esimerkiksi keuhkosityöpä, keuhkoahauma, astma ja sepelvaltimotauti. Tällaisten sairauksien takia pienhiukkasilla on suuri vaikutus kansanterveyteen ja sitä kautta kansantalouteen. (Pennanen ja Salonen 2006, 7.)

Ihmisen terveydelle vaarallisia hiukkasia sisältäviä lähteitä ovat erityisesti liikenteen ja puun pienpoltton päästöt. On arvioitu, että pienhiukkasille altistuminen voi lyhentää ihmisen elinaikaa noin kymmenellä vuodella. Riski on nimenomaan pitkään sydän- ja hengityselinasairauksista kärsineillä henkilöillä. Kun otetaan huomioon vielä astmaatitot ja pienet lapset, jotka kärsivät pienhiukkasten aiheut-

tamista jatkuvista haitoista, puhutaan vähintään joka viidennestä kansalaisesta. Terve, tupakoimaton aikuinen kuitenkin kestää pienhiukkasaltistumista melko hyvin. (Huttunen 2006.)

Taulukko 3 on koottu hiukkasten kulkeutumisen- ja käyttäytymisreittejä elimistössä. Ultrapienet hiukkaset (kiinteät) voivat ihmisen elimistöön joutuessaan kulkeutua keuhkorakkuloiden kautta verenkiertoon ja muihin elimiin, kuten esimerkiksi sydämeen. On myös arveltu, että ne voisivat jopa kulkeutua nenän hajuepiteeliltä lähteviä hermoja pitkin aivoihin. Pienten hiukkasten poistuminen pienistä keuhkoputkista ja keuhkorakkuloista on hidasta, mikä lisää kudoksien annoksia helpommin kuin suuremmat hiukkaset. Karkeat hengitettävät hiukkaset taas menevät isompiin värekarvallisiin keuhkoputkiin, josta ne siirtyvät nieluun kiinnittyneinä yskösilmaan ja sitä kautta edelleen nieltynä vatsalaukuun. Koska pitkäaikaiset hengityssairaudet muuttavat värekarvojen kuljetusta ja hengitysteiden rakennetta, hiukkasten poistuminen keuhkoista voi olla sairaalla ihmisellä hitaampaa kuin terveellä. (Pennanen ja Salonen 2006, 13.)

Taulukko 3 Hiukkasten kulkeutuminen ja käyttäytyminen elimistössä kokoluokittain (Pennanen ja Salonen 2006, 12)

Hiukkasten kokoluokka	Kulkeutumisen vaiheet elimistössä
Karkeat hengitettävät hiukkaset (2,5 – 10 µm)	Kulkeutuvat isompiin värekarvallisiin keuhkoputkiin Poistuvat tuntien tai vuorokausien kuluessa
Pienhiukkaset (< 2,5 µm)	Kulkeutuvat pieniin värekarvattomiin keuhkoputkiin ja keuhkorakkuloihin Kiinteät hiukkaset poistuvat niistä kuukausien, joskus vasta vuosien kuluessa Kuljetuksen tekevät hiukkasten kuljetukseen erikoistuneet valkosolut (makrofagit)
Ultrapienet hiukkaset (< 0,1 µm)	Kulkeutuvat keuhkorakkuloihin ja niistä osittain verenkiertoon Suuri lukumäärä Makrofagit eivät tunnista ultrapieniä hiukkasia, mutta hengitysteitä verhoavat epiteelisolut ottavat niitä sisään

Kivenmurskaustoiminta aiheuttaa paikallista hengitettävien hiukkasten (PM₁₀) pitoisuusarvojen kohoamista, mutta pääasiassa ne ovat karkeita hengitettäviä hiukkasia (PM_{2,5-10}). Suurin osa toiminnan aiheuttamista päästöistä on kuitenkin hengitettäviä hiukkasia suurempia hiukkasia, jotka laskeutuvat nopeasti lähelle päästölähdettään, eivätkä näin ollen pääse leviämään toiminta-alueen ympäristöön. Lisäksi kivenmurskauslaitosten toiminta sijoittuu yleensä harvaan asutuille alueille ja niiden toiminta on jaksottaista, joten pienhiukaspäästöjen terveysvaikutukset jäävät paikallisestikin melko olemattomiksi. Pitkään murskauksen parissa työskennelleillä henkilöillä kuitenkin on riski sairastua hiukkasten aiheuttamiin vakaviin sairauksiin, jos henkilökohtaisista hengityssuojauksista ei huolehdita asianmukaisesti. (Toivonen 2010, 84 - 85.)

Kiviaineksesta riippuen murskauksessa syntyvän pölyn koostumus, pitoisuus ja kokojakauma vaihtelevat paljon. Kivipölyn haitallisuuteen hiukkaskoon lisäksi vaikuttaa myös merkittävästi kiteisen piok-

sidin määrä hiukkasten alveolijakeessa, joka on hiukkasten keuhkorakkuloihin asti helpoiten pääsevä jae. Maankuoressa esiintyy paljon piioksideita. Myös muita haitallisia aineksia ja alkuaineita, kuten lyijyä ja berylliumia voi esiintyä. Yleisin ja merkityksellisin piioksidin muoto Suomen kalliassa on kvartsi. Sitä esiintyy muun muassa graniitissa, kvartsiitissa ja hiekkakivessä. (Toivonen 2010, 85 - 86.)

Taulukko 4 on koottu hengitettävillä hiukkasilla altistumisen aiheuttamia terveydellisiä haittoja. Useimmiten terveydellisillä haitoilla ja yhdyskuntailman hiukkasten pitoisuudella on suora yhteys. Ei ole kuitenkaan voitu todentaa mitään selvää kynnyspitoisuutta vaikutusten alkamiselle. Monien tutkimusten yhdistetyt tulokset osoittavat, että päivittäinen PM_{2,5}-pitoisuus vaikuttaa ihmisten kuolleisuuden lisääntymiseen noin kaksi kertaa suuremmin kuin saman suuruinen PM₁₀-pitoisuus. Useiden vuosien keskiarvoja tarkasteltaessa kuolleisuuden lisäys kasvaa moninkertaiseksi. Pääkaupunkiseudulla tehtyjen mittausten perusteella päivittäiset PM₁₀-pitoisuuden vaihtelut korreloivat kuolleisuuslaskujen kanssa. Hiukkasmäärien vaihtelut alle 2,5 µm kokoluokissa linkittyvät lasten ja aikuisten astmaan sekä ikääntyneiden sepelvaltimotaudin pahenemiseen. (Pennanen ja Salonen 2006, 15.)

Taulukko 4 Hengitettävien hiukkasten aiheuttamia haittoja kokoluokittain (Pennanen ja Salonen 2006, 15)

Hiukkasten kokoluokka	Lyhytaikainen altistuminen	Pitkäaikainen altistuminen
Karkeat hengitettävät hiukkaset (2,5 – 10 µm)	Astma ja keuhkohtaumatauti pahentuvat Hengitystieinfektiot	Keuhkohtaumatauti?
Pienhiukkaset (< 2,5 µm)	Astma ja keuhkohtaumatauti pahentuvat Hengitystieinfektiot Sepelvaltimotauti ja aivoverenkierrosairaudet pahentuvat	Elinika lyhenee Keuhkohtaumatauti Verisuonten kalkkeutuminen voimistuu Astma? Allergia?
Ultrapienet hiukkaset (< 0,1 µm)	Astma pahentuu Sepelvaltimotauti pahentuu	Ei tutkimustietoja

2.4 Hiukkasten ympäristövaikutukset

Aerosolihiukkaset vaikuttavat maapallon ilmastoon. Vaikutus tapahtuu pääasiassa kahdella tavalla. Ensimmäinen tapa on niin sanottu suora ilmastovaikutus, jossa hiukkasten sijainnilla ja optisilla ominaisuuksilla voi olla joko lämmittävä tai viilentävä vaikutus. Tällöin ne joko sirottavat tai absorboivat auringon säteilyä. Toista tapaa kutsutaan epäsuoraksi ilmastovaikutukseksi, jolloin hiukkaset toimivat pilvipisaroiden tiivistymisytimenä ja edesauttavat näin pilvien muodostumista. Hiukkaspitoisuudella on vaikutus pilven elinikään ja koostumukseen ja näin ollen pilven heijastamaan säteilyyn. (Hiukkastieto.fi.)

Hiukkaslaskeumalla on suuri vaikutus paikalliseen ilmastoon ja veden kiertokulkuun. Sen vaikutuksesta lumi- ja jääpeitteen pinnan heijastussuhde voi muuttua ja näin ollen jäätiköiden sulaminen nopeutuu. Kaiken kaikkiaan hiukkaspitoisuuden kasvulla ajatellaan olevan ilmasto viilentävä vaikutus. Myös kasvit voivat tuottaa merkittävän määrän hiukkasia. Ne esimerkiksi tuottavat eloperäisiä primäärihiukkasia, jotka yleisemmin tunnetaan siitepölynä. Lisäksi ilmaan pääsee erilaisia haihtuvia orgaanisia yhdisteitä (VOC). Kasiperäisten kaasujen reaktioissa ilmakehässä, muodostuu tiivistymiskykyisiä höyryjä, jotka puolestaan muodostavat pienhiukkasia. Toisaalta kasvit myös poistavat pienhiukkasia ympäröivästä ilmasta käyttäen lehvästöjään depositioalustoina. (Hiukkastieto.fi.)

Hiukkaset huonontavat näkyvyyttä vaimentaen valoa, kun valon säteet ohjautuvat pois reitiltään valonlähteestä kohti vastaanottajaa osuessaan ilmassa leijuviin hiukkasiin. Aerosolin valon vaimennuskykyä kuvaava optinen tiheys riippuu hiukkasten optisista ominaisuuksista ja pitoisuudesta. 0,1 - 2 μm kokoiset hiukkaset vaimentavat valoa kaikkein tehokkaimmin. Verratessa samaa vesimäärää, joko muodostuneena vesipisaroista ($>1 \text{ mm}$) tai 1 μm kokoisista hiukkasista (sumu), vaimentaa hiukkasten muodostama sumu valoa tuhat kertaisesti vesipisaroihin nähden. (Hiukkastieto.fi.)

Hiukkaset voivat myös kuljettaa mukanaan radioaktiivista säteilyä tai raskasmetalleja. Esimerkiksi Tshernobylin ydinvoimalaonnettomuus aiheutti säteilyä, joka ulottui Suomeen asti pienhiukkasten kulkeuman johdosta. Vaikutukset näkyvät edelleen suomalaisten vuotuisessa säteilyannoksessa. Osa raskasmetalleista on pieninä määrinä välttämättömiä hivenaineita eliöstölle, mutta suurina määrinä myrkyllisiä. Raskasmetallit sitoutuvat eliöiden elimistöön ja sitä kautta rikastuvat ravintoketjussa. Elohopea, kadmium ja lyijy ovat ongelmallisimpia raskasmetalleja ympäristön kannalta. (Hiukkastieto.fi.)

3 KIVIAINESTUOTANNOSSA SYNTYVÄ PÖLY

3.1 Pölyvät työvaiheet

Murskausprosessi on yleensä suurin yksittäinen louhosalueen pölypäästölähde, koska siinä murskataan materiaaliin kohdistuu iskuista, ilmavirroista, tärinästä ja pudotuksesta johtuvia suuria voimia. Murskauksessa syntyneen hienoaineksen määrä ja murskaussuhde vaikuttavat pölypäästön määrään. Syntyvän hienoaineksen määrä riippuu halutun tuotteen rakeisuusjakaumasta ja muotovaatimuksista. Käytettävät laitteet ja kalliaines vaikuttavat näihin tekijöihin. Suurimmat hiukkaspäästöjä aiheuttavat prosessin vaiheet ovat ne, joissa materiaali putoaa. Tällaisia vaiheita ovat murskaimen syöttöaukko, kuljettimen kuormauskohdat, pudotus kiviainekasoihin ja seulojen alkupää. Sitä enemmän hiukkaspäästöjä syntyy, mitä enemmän hienoainesta pudotettava materiaali sisältää. Myös koteloinnin sisällä voi tapahtua hiukkasten irtoamista materiaalin pinnalta. Tämä johtuu syntyvistä ilmanpaineiskuista, jos kotelointia ei ole tehty tarpeeksi tilavaksi. (Toivonen 2010, 43.)

Tuulisissa ja kuivissa olosuhteissa itse murskaamista enemmän pölypäästöjä aiheuttavat työmaajoneuvojen liikkuminen, materiaalin pudotukset ja tuulen aiheuttama eroosio. Hiukkaspäästöihin vaikuttavat myös työmaaliikenteen määrä, pudotuskorkeudet, materiaalin ylivuodot, hienoaineksen määrä käsiteltävässä materiaalissa sekä varastokasojen ikä. (Toivonen 2010, 44.) Mitä hienommaksi kivimateriaali murskataan, sitä enemmän syntyy hiukkasia. Näin ollen tarkasteltaessa pölyhiukkasten syntymistä murskauksen eri vaiheissa, hiukkasten määrä on suurempi jälkimurskauksessa kuin esimurskauksessa. (Opasnet.org: Metallimalmin murskausprosessin pölypäästöt.)

3.2 Kivipölyn syntyminen murskauksessa

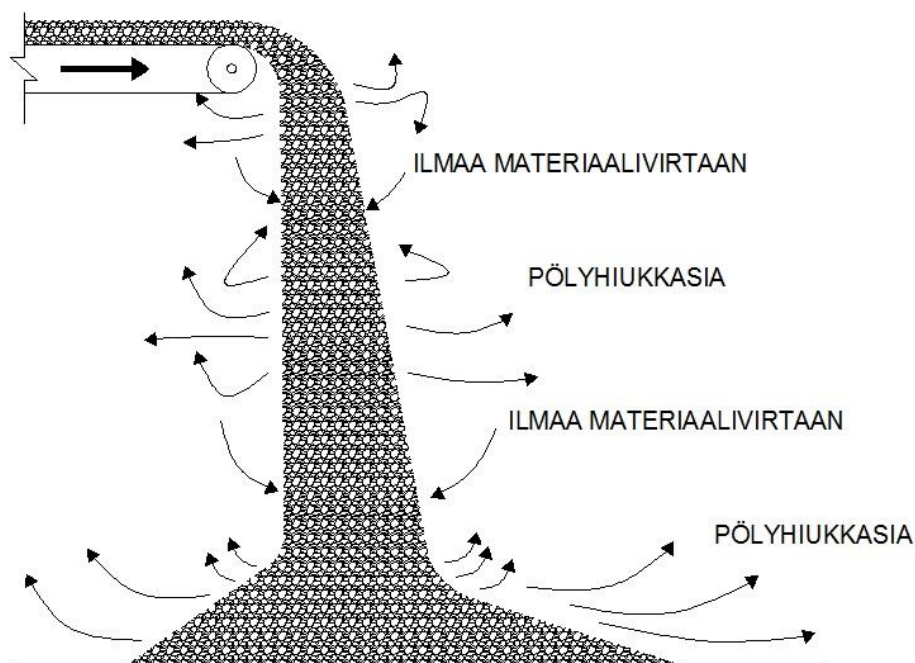
Mitä enemmän kivimateriaalia murskataan, sitä enemmän syntyy hienoainesta, joka puolestaan ilmavirtojen vaikutuksesta muodostaa pölypäästöjä. Kun kivimateriaalia murskataan iskemällä, puristamalla tai räjäyttämällä, siitä lohkeaa tai hankautuu irti hiukkasia. Kiviaineksesta syntyvien hiukkasten määrän voidaan sanoa olevan suoraan verrannollinen käytettyyn energiamäärään. (Opasnet.org: Metallimalmin murskausprosessin pölypäästöt.)

Murskauksen pölypäästöjen määrä ja laatu ovat riippuvaisia murskauksessa käytetystä tekniikasta ja kivilajista. Kiviaineksen kovuus, raekoko, kosteus ja tiheys vaikuttavat merkittävästi hiukkasten syntyvyyteen, kuten myös kiven mineraalirakenne ja syötteen koko. Käytettävän tekniikan osalta vaikuttavia tekijöitä ovat läpäisyaste, murskan tyyppi, kosteusprosentti, koon pienennyssuhde ja hienoainepitoisuus. Lisäksi käytettäessä puristukseen perustuvaa murskaustekniikkaa, pölyhiukkasten syntyminen on iskuun perustuvaa tekniikkaa vähäisempää. Murskattavan kivilajin ja käytetyn tekniikan lisäksi pölyn synty miseen ja leviämiseen vaikuttavat merkittävästi myös vuodenajoille (kevät, talvi, syksy, kesä) tyypilliset sääolosuhteiden muutokset, kuten lämpötila, ilman kosteus, sademäärät ja tuulen nopeus. (Opasnet.org: Metallimalmin murskausprosessin pölypäästöt.)

Kun hiukkaset kiinnittyvät toisiinsa ja materiaalin pintaan, vaikuttaa niihin adheesiovoima, joka on moninkertainen painovoimaan nähden. Kappaleen halkaisijan kasvu vaikuttaa adheesiovoimaan suoraan verrannollisesti, joten hiukkasen koolla ja muodolla sekä materiaalin ja ilman kosteudella on tässä tapauksessa merkittävä vaikutus. Hiukkasen ja materiaalin pinnan väliin muodostuu nestettä, kun hiukkanen absorptoi sitä itseensä. Muita adheesiovoimaa lisääviä tekijöitä ovat nestekerroksen pintajännitys, tarttuvien pintojen välisen pinta-alan lisääntyminen, lämpötila ja kiinnittymispinnan karkeus. (Matti Toivonen 2010, 39.)

Jos materiaalin pinnalla oleviin hiukkasiin vaikuttaa adheesiovoimia suurempia voimia, kuten tärinää, ilmavirtauksia ja materiaalin iskeytymistä, pölyhiukkaset irtoavat. Mitä suurempia iskeytyvät kappaleet ovat, sitä suurempi on iskeytymisessä vapautuva voima ja näin pölyhiukkaset lähtevät tehokkaammin liikkeelle pinnoilta. Pölyhiukkasen halkaisija vaikuttaa kappaleeseen kohdistuvan voiman suuruuteen. Kappaleen halkaisijaan nähden adheesiovoima on suoraan verrannollinen, ilmavirtauksen aiheuttama voima on verrannollinen sen toiseen potenssiin ja tärinän sekä iskeytymisen aiheuttama voima taas kolmanteen potenssiin. Näin ollen, kun kappaleen halkaisija kasvaa, tuulen ja tärinän vaikutus kasvaa suhteessa adheesioon, mikä johtaa siihen, että suuremmat hiukkaset irtoavat pienempiä hiukkasia helpommin materiaalin pinnalta. Hiukkasen koon kasvaessa tarpeeksi, alkaa maan vetovoima muuttua dominoivaksi muihin voimiin nähden, jolloin hiukkasen pysyminen materiaalin pinnalla voimistuu. Esimerkiksi tuuli kykenee harvoin nostattamaan yli 50 µm kokoista pölyhiukkasta. (Matti Toivonen 2010, 39.)

Irtonaisen kiviaineksen pudotessa esimerkiksi hihnakuljettimen loppupäästä, tuulen ja materiaalin putoamisen synnyttämät ilmavirtaukset irrottavat pölyhiukkasia kivimateriaalin pinnasta (Kuvio 8). Pudotessaan kiviaines syrjäyttää ilmaa, mikä muodostaa materiaalivirrasta pois päin työntyvää ilmavirtausta vieden irtoavia pölyhiukkasia mukanaan. Samalla materiaalivirta laajenee, kun se indusoi eli vetää ympäröivää ilmaa mukaansa. Tämä yhdessä tuulen vaikutuksen kanssa voimistaa pölyhiukkasten irtoamista kiviaineksen pinnalta. Uusia hiukkasia syntyy ja ne irtoavat pinnoilta, kun materiaalivirta iskeytyy putoamiskohtaan. Tällöin syrjäytyneen ilman ja materiaalivirran mukanaan tuoman ilman vaikutuksesta pölyäminen voimistuu. (Matti Toivonen 2010, 39 - 40.)



Kuvio 8 Pölyn muodostuminen kiviaineksen pudotessa (Toivonen 2010, 40) Kuvio Henri Rytönen 2014

Putoavan materiaalin määrän lisääntyessä, materiaalin raekoon pienentyessä ja pudotuskorkeuden kasvaessa materiaalivirran indusoiman ilman määrä lisääntyy. Tuuli voi merkittävästi lisätä pölyn leviämistä materiaalivirran putoamiskohdassa, kuten myös pudotuskorkeuden kasvattaminen ja pudotusalueen koventaminen. Materiaalivirran kosteuden lisääminen vähentää pölyn muodostumista, kuten myös materiaalivirran suurentaminen, jolloin hiukkasten muodostuminen pienenee. Myös virtaavan ilman lisääntymistä ja ilmanpaineiskuja aiheuttaa irtoavan kiviaineksen pudotessa. Tämä on syytä ottaa huomioon pölynkeräyksen ja koteloinnin suunnittelussa. (Matti Toivonen 2010, 40.)

3.3 Murskauksen pölyn hiukkaskokojakauma

Yleisin murskauksen aiheuttamien hiukkaspäästöjen arviointitapa on käyttää päästökertoimia. Suurin osa päästökertoimista on johdettu malminmurskausprosessien mittaustuloksista. Epätarkkuutta päästöarvioon kertoimien avulla aiheuttavat tapauskohtaiset erot. (Opasnet.org: Metallimalmin murskausprosessin pölypäästöt.)

$$KHM = k * M * A \quad (6)$$

jossa, KHM = kokonaishiukkasmäärä (g/vrk)
 k = murskausvaihekohtainen hiukkaspäästökerroin eri kosteuspitoisuudessa (g/ton)
 M = syötteen määrä / tunti (tonnia/h)
 A = työtunnit vuorokaudessa

(Opasnet.org: Metallimalmin murskausprosessin pölypäästöt.)

Tarvekiven murskaus poikkeaa malmintuotantoprosessista huomattavan paljon. Tavoiteltu lopputuote esimerkiksi on yleensä karkeaa louhetta tai enimmillään sepelimurskeen kokoluokkaa. Lisäksi

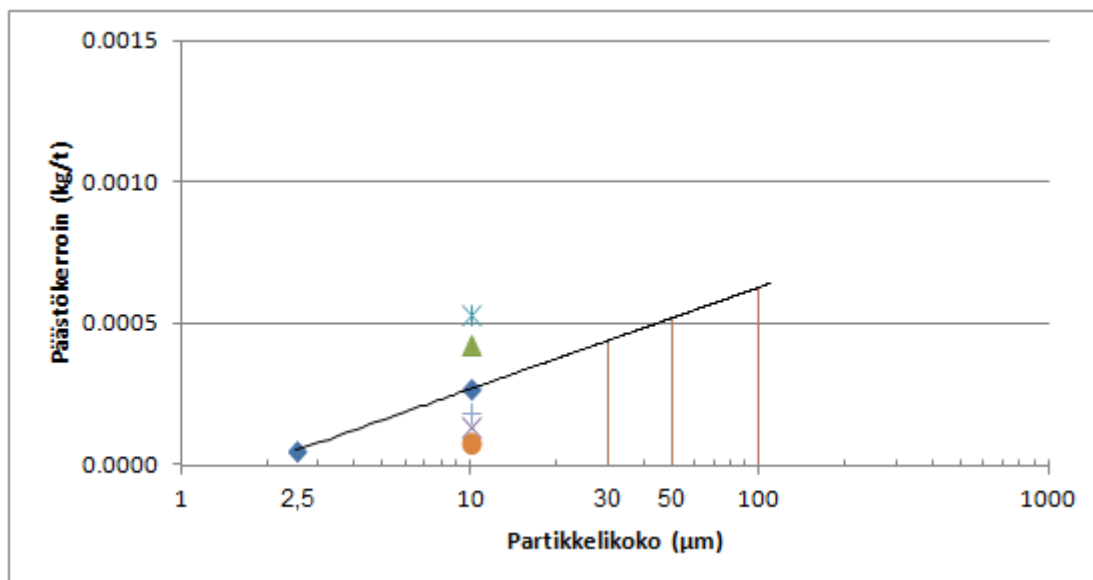
tarvekiven murskaustoiminnan ajoittuminen on yleensä satunnaisempaa ja lyhytkestoisempaa. Myös yksilölliset murskausratkaisut ja paikalliset erot luovat epätarkkuutta päästöarvion tekemiseen päästökertoimien avulla. Huomioitavaa on myös se, että eri mineraalit rikkoutuvat eri tavalla. Tästä johtuen murskauksessa muodostuvan kivipölyn koostumus voi poiketa merkittävästi louhitun emäkallion koostumuksesta. (Opasnet.org: Tarvekiven murskauksen päästöt.)

Murskattavan materiaalin kosteuspitoisuudella on huomattava vaikutus pölypäästöihin. Kivimateriaalin pinnalle kertyneestä kosteudesta johtuen pienhiukkaset kiinnittyvät suurempien kivien pinnoille aiheuttaen pölypäästöjen pienemisen. Tämä ilmiö kuitenkin heikkenee tai häviää kokonaan tietyissä olosuhteissa haihtumisen johdosta. Maantieteellisistä ja ilmastollisista olosuhteista johtuen kiven kosteuspitoisuus voi vaihdella lähes nolasta useisiin prosentteihin. Tyypillisesti kostea kivimateriaali sisältää yli 1,5 % vettä. (U. S. EPA: AP42, 11.19.2-1.)

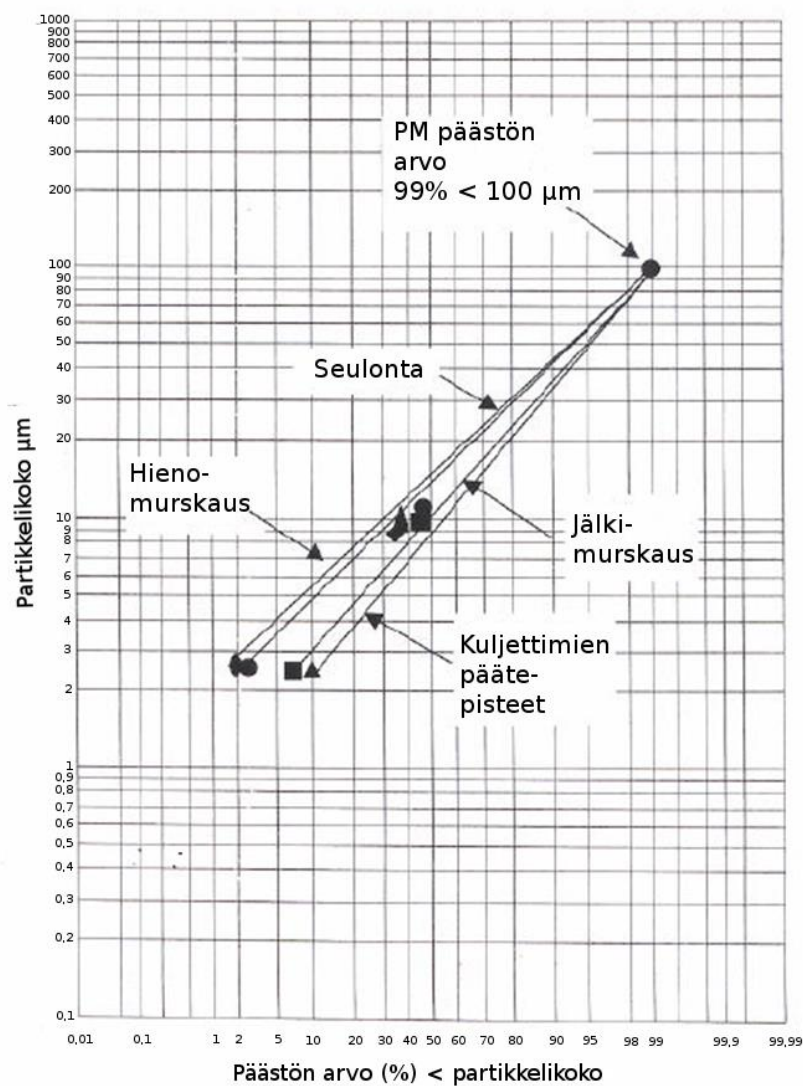
Yhdysvaltalainen ympäristönsuojelujärjestö U.S. EPA on koonnut kivenmurskauksen päästökertoimia useista kiven murskausprosessikohteista saatujen mittaustulosten perusteella. Tutkimusten perusteella on tultu siihen tulokseen, että PM_{10} - ja $PM_{2,5}$ -päästöt kalkkikiven ja graniitin murskauksessa ovat yhdenmukaisia. Kalkkikiven ja graniitin murskaukset edustavat tyypillisiä tarvekiven murskausprosesseja, joten niiden perusteella kehitettyjen päästökertoimienkin voidaan sanoa edustavan tyypillisiä murskausprosessien pölypäästöjä. (U. S. EPA: AP42, 11.19.2-1.)

EPA:n tutkimustuloksien perusteella arvioituja päästökertoimia ei voitu luotettavasti arvioida esi- ja välimurskauksille, mutta sen sijaan jälkimurskaukselle kertoimet voitiin määrittää. Jälkimurskauksen päästökertoimia voidaan kuitenkin käyttää esi- ja välimurskauksien päästöjen ylärajana, koska pölypäästöjen määrä lisääntyy prosessin edetessä esimurskauksesta jälkimurskaukseen. (U. S. EPA: AP42, 11.19.2-1.)

EPA:n tutkimuksen päästökertoimet määritettiin sekä kontrolloiduille, että kontrolloimattomille päästöille. Tässä yhteydessä kontrolloimattomalla päästöllä tarkoitetaan pölypäästöä, johon ei ole käytetty mitään keinoja niiden vähentämiseksi, kun taas kontrolloidulla tarkoitetaan pölypäästöä tilanteessa, jossa raakamateriaalin kosteuspitoisuutta on lisätty vesisumuttimien avulla. Päästöt arvioitiin kontrolloiduksi, kun raakamateriaalin kosteuspitoisuus oli suurempi tai yhtäsuuri kuin 1,5 % ja kontrolloimattomaksi, kun kosteuspitoisuus jäi alle 1,5 %. EPA:N tutkimuksen tulokset on todettu olevan yhdenmukaisia muiden kontrolloitujen murskausprosessien testien kanssa. Kontrolloidut PM -päästökertoimet (PM_{30} , PM_{50} ja PM_{100}) on laskettu graafisen kuvaajan (Kuvio 9) avulla PM_{10} - ja $PM_{2,5}$ -kertoimien mukaisesti. Kuvan päästökertoimien trendiviiva on piirretty $PM_{2,5}$ arvon ja PM_{10} keskiarvon mukaisesti. PM_{30} , PM_{50} ja PM_{100} ovat kaikki hiukkaskokoluokituksia, joita käytetään yhdessä tai useammassa USA:n valvontavirastossa määritettäessä kokonaisleijumaa (TSP). Kuvio 9 mukaiset päästökertoimet on tarkastettu sijoittamalla ne logaritmiseen nomogrammiin (Kuvio 10), joka todistaa, että jako noudattaa odotetusti luonnollista logaritmia. (John Richards 2003.)



Kuvio 9 PM-päästökertoimien laskenta kontrolloidulle jälkimurskaukselle (Richards 2003) Kuvio Henri Rytönen 2014



Kuvio 10 Logaritminen nomogrammi laskettujen päästökertoimien tarkistusta varten (Richards 2003) Kuvio Henri Rytönen 2014

Kontrolloimattomat PM₁₀₀-päästökertoimien arvot (Taulukko 5) on laskettu kontrolloiduista arvoista Kuvio 9 mukaisesti. Kontrolloidun PM₁₀-päästön hiukkasten poistotehokkuus kontrolloimattomaan verrattuna on laskettu Taulukko 5 mukaisista arvoista, jolloin tehokkuudeksi saadaan 77,7 %. PM₁₀ poistotehokkuuden perusteella on laskettu kontrolloimaton päästökerroin kokonaisleijumalle (TSP). Kontrolloimattoman kokonaisleijuman päästökerroin voidaan laskea kaavalla

$$TSP_{e.kont} = \frac{TSP_{kont}}{(100 \% - PM_{10} \text{ Tehokkus } \%) / 100 \%} \quad (2)$$

jossa $TSP_{e.kont}$ = kontrolloimattoman kokonaisleijuman päästökerroin
 TSP_{kont} = kontrolloidun kokonaisleijuman päästökerroin
 $PM_{10} \text{ Tehokkus } \%$ = kontrolloidun PM₁₀-päästön hiukkasten poistotehokkuus kontrolloimattomaan verrattuna.

Taulukko 5 esiintyvä luokka (A - E) ilmoittaa päästökertoimen laskennan luotettavuuden perustuen referenssikohteiden määrään. A tarkoittaa luotettavinta ja E epäluotettavinta luokkaa. TSP-päästökertoimet on määritelty luotettavuudeltaan E-luokkaan, koska ne perustuvat vähäisiin testeihin ja kuvaajan mukaan tehtyihin arvioihin PM_{2,5} ja PM₁₀ mukaisiin arvoihin verraten. PM_{2,5} on määritetty myös luotettavuudeltaan E-luokkaan, koska luotettavia testituloksia ei sen osalta ole kuin yhdestä referenssikohteesta. (Richards 2003.)

Taulukko 5 Keskimääräiset päästökertoimet murskaukselle kokoluokittain, luotettavuusluokka-asteikolla A - E, A luotettavin. Kontrolloitu murskaus = raakamateriaalin kosteuspitoisuus $\geq 1,5 \%$, kontrolloimaton murskaus = raakamateriaalin kosteuspitoisuus $< 1,5 \%$. (Richards 2003.)

Prosessi	Referenssikohteiden määrä (luotettavuusluokka)	Keskimääräinen päästökerroin (kg/t)
Kontrolloimaton jälkimurskaus (PM _{2,5})	1 (E)	0,00005
Kontrolloitu jälkimurskaus (PM ₁₀)	4 (C)	0,00027
Kontrolloimaton jälkimurskaus (PM ₁₀)	5 (C)	0,0012
Kontrolloitu jälkimurskaus (TSP)	3 (E)	0,0006
Kontrolloimaton jälkimurskaus (TSP)	3 (E)	0,0027

3.4 Murskauksen ympäristövaikutukset

Ympäristöluvan saanti kivenmurskaustoiminnalle edellyttää ehdottomasti, ettei toiminta saa aiheuttaa terveyshaittaa. Sen lisäksi myös viihtyvyys- ja omaisuushaitat on pysyttävä kohtuullisissa rajois-

sa. Murskauksesta koetaan aiheutuvan haittaa ympäristölle, vaikka ympäristölupaharkinta väittäisikin muuta. Tämä ilmenee toimintaa kohtaan tehdystä valituksista, jotka pääasiassa kohdistuvat omaisuus- ja viihtyvyyshaittoihin. Vaikka pölypäästöt ovat tänä päivänä yksi merkittävä huolenaihe toiminnan aiheuttamien ympäristöhaittojen osalta, ei se kuitenkaan ole yhtä merkittävä kuin esimerkiksi meluhaitat, joille asetetut raja-arvot ylittyvät tavallisesti herkemmin. Viihtyvyyshaittojen erottaminen toisistaan ei ole aivan yksinkertainen asia, koska toiset ihmiset ovat herkempiä kuin toiset ja voivat kokea tilanteet eri tavalla. Toiselle ihmiselle voi jo aiheutua terveyshaittoja tilanteessa, jossa toinen kokee sen vain viihtyvyyshaittana. Esimerkiksi viihtyvyyshaittana koettavat hajuhaitat voivat johtaa erilaisiin oireisiin kuten unettomuuteen ja päänsärkyyn. (Toivonen 2010, 81.)

Viihtyvyyshaitat ovat siis ensisijaisia kivenmurskauksen aiheuttamia ympäristöhaittoja, jotka jokainen ihminen voi kokea hyvin eritavalla. Viihtyvyyshaitan voi kokea esimerkiksi epämiellyttävänä hajuina tai makuina, narskumisena hampaissa, pölyn nielemisestä johtuvana epämiellyttävänä kokemuksena sekä ympäristön rumentumisena. Viihtyvyyshaittojen lisäksi toiminta voi aiheuttaa omaisuushaittoja, joihin luetaan muun muassa rakennusten, esineiden ja asuntojen likaantuminen. Kyseiset erilaisten materiaalien likaantumiset voidaan kylläkin lukea myös viihtyvyyshaitaksi, jotka jokainen ihminen kokee hyvin eritavalla. Näin ollen viihtyvyyshaittojen arvioimiselle ei voi määrittää mitään tarkkaa mittaria. Vaikka haitta ei viihtyvyyden kannalta aluksi olisikaan merkittävä, voi se usein ja tasaisesti toistuvana kehittyä sellaiseksi. Ulkoilmassa kulkeutuvat pölyhiukkaset kulkeutuvat myös ilmanvaihdon kautta sisätiloihin, jolloin sisäilman hiukkaspitoisuus saattaa kasvaa ja pölyn kertyminen huonekalujen ja muiden esineiden päälle voi lisääntyä. (Toivonen 2010, 82.)

Pölyn aiheuttama likaantuminen aiheutuu sen laskeutumisesta ja kiinnitymisestä materiaalien pinnoille. Tällaisia pintoja voivat olla esimerkiksi ikkunat, ikkunalaudat, seinät ja vaatteet. Tästä aiheutuu taloudellista haittaa, koska pintojen puhdistamistarve kasvaa ja sitä myötä materiaalin kuluminen nopeutuu. Myös maan arvon aleneminen voi olla taloudellinen seuraus viihtyvyyshaittojen lisääntymisen johdosta. Pölyhiukkasten laskeutuminen pinnoille aiheuttaa haitta myös kasveille. Kasvien yhteyttäminen vaikeutuu pölyhiukkasten tarttuessa kasvin pintakalvon päälle, jolloin yhteyttämisspinta-ala supistuu. Kosteuden vaikutuksesta tapahtuu reaktioita, joiden seurauksena kasvi saattaa vaurioitua epäpuhtauksien päästessä tunkeutumaan kasvisolukon sisään. Pölyhiukkaset voivat lisäksi lisätä hapanta laskeumaa ympäristöön. (Toivonen 2010, 83.)

3.5 Lainsäädännölliset ohjauskeinot

3.5.1 Ympäristönsuojelulaki, ympäristönsuojeluasetus ja valtioneuvoston asetus

Ympäristönsuojelulain keskeisenä tavoitteena on estää ympäristön pilaantumista, turvata kaikille terveellinen ja viihtyisä sekä kestävä ja monimuotoinen elinympäristö, lisätä kansalaisten vaikutusmahdollisuuksia ja torjua ilmaston muutosta sekä edistää kestävä kehitystä. Lakia sovelletaan toimintaan, josta aiheutuu tai saattaa aiheutua ympäristön pilaantumista. Ympäristön pilaantumisen ehkäisemiseksi on lisäksi noudatettava, mitä muussa laissa säädetään. (Ympäristönsuojelulaki 2000, 1 §.)

Ympäristön pilaantumisen vaaraa aiheuttavassa toiminnassa on periaatteena

- ennaltaehkäisy ja haittojen minimointi
- varovaisuus ja huolellisuus
- parhaan käyttökelpoisen tekniikan periaate
- ympäristön kannalta parhaan käytännön periaate
- pilaantumisen vaaraa aiheuttavan toiminnan harjoittaja vastaa vaikutuksien ennaltaehkäisystä ja ympäristöhaittojen poistamisesta tai rajoittamisesta mahdollisimman vähäisiksi. (Ympäristönsuojelulaki 2000, 4 §.)

Valtioneuvoston asetuksella voidaan antaa säännöksiä ympäristön pilaantumisen vaaran ehkäisemiseksi mm. asfalttiaseman, kivenmurskaamon, kivenlouhimon tai muun kivenlouhinnan tapauksessa. (Ympäristönsuojelulaki 2000, 12 §.)

Valtioneuvoston asetuksessa säädetään kivenlouhimon, muun kivenlouhinnan ja kivenmurskaamon ympäristönsuojelun vähimmäisvaatimuksista silloin, kun toimintaan on oltava ympäristölupa. Toiminta ei saa sijoittaa alle 400 metrin päähän melulle tai pölylle erityisen alttiista kohteista, kuten sairaalasta, päiväkodista, hoito- tai oppilaitoksesta. Kivenlouhimo, muu kivenlouhinta ja kivenmurskaamo on lisäksi sijoitettava siten, että melua tai pölyä aiheuttavan toiminnon etäisyys asumiseen tai loma-asumiseen käytettävään rakennukseen tai sen välittömässä läheisyydessä sijaitsevaan oleskeluun tarkoitettuun piha-alueeseen tai muuhun häiriölle alttiiseen kohteeseen on vähintään 300 metriä. (Valtioneuvoston asetus kivenlouhimojen, muun kivenlouhinnan ja kivenmurskaamojen ympäristönsuojelusta 2010, 1 §, 3 §.)

Kivenmurskaamo voidaan sijoittaa alle 300 metrin päähän häiriöille alttiista kohteesta ainoastaan, jos toiminnanharjoittaja voi sijoittamalla toiminta rakennukseen tai muita teknisiä keinoja käyttäen luotettavasti ja ympäristölupaviranomaisen hyväksymällä tavalla osoittaa, että toiminta häiriöille alttiissa kohteessa ei ylitä 7 §:ssä tarkoitettuja melutason arvoja. Lisäksi toiminnasta ei saa aiheutua sellaista ilmanlaadun heikkenemistä, joka vaarantaa 5 §:ssä tarkoitettun ilmanlaadusta annetun valtioneuvoston asetuksen noudattamisen. Tukitoiminta-alue voidaan sijoittaa lähemmäksi kuin 300 metrin päähän häiriöille alttiista kohteesta. (Valtioneuvoston asetus kivenlouhimojen, muun kivenlouhinnan ja kivenmurskaamojen ympäristönsuojelusta 2010, 3 §.)

Pölylähteet on sijoitettava teknisten mahdollisuuksien mukaan toiminta-alueen alimmalle kohdalle. Kiven porauksessa syntyvän pölyn leviämistä on estettävä sijoittamalla porausvaunuihin pölynkeräyslaitteet tai käyttämällä muuta pölyn leviämisen estämisen kannalta parasta käyttökelpoista tekniikkaa. Kuormattavan ja murskauslaitteiston kuljettimelta varastokasaan putoavan kiviaineksen pölyämistä on estettävä säätämällä putoamiskorkeus mahdollisimman pieneksi, kiinnittämällä murskauslaitteiston kuljettimien päähän pölyämistä estävät suojat tai käyttämällä muuta pölyn leviämisen estämisen kannalta parasta käyttökelpoista tekniikkaa. Jos kivenmurskaamo sijoitetaan alle 500 metrin päähän asumiseen tai loma-asumiseen käytettävästä rakennuksesta tai sen välittömässä lähe-

sydessä sijaitsevasta oleskeluun tarkoitettu piha-alueesta tai muusta häiriöille alttiista kohteesta, on pölyn joutumista ympäristöön estettävä kastelemalla tai koteloimalla päästölähteet kattavasti ja tiiviisti taikka käyttämällä muuta pölyn torjumisen kannalta parasta käyttökelpoista tekniikkaa. Varastokasat ja ajoneuvojen kuormat on tarvittaessa kasteltava ja pölyn leviäminen ajoneuvoista toiminta-alueen ulkopuolelle on estettävä. (Valtioneuvoston asetus kivenlouhimojen, muun kivenlouhinnan ja kivenmurskaamojen ympäristönsuojelusta 2010, 4 §.)

Ilmanlaadusta alueilla, joilla asuu tai oleskelee ihmisiä ja joilla ihmiset saattavat altistua ilman epäpuhtauksille säädetään ilmanlaadusta annetussa valtioneuvoston asetuksessa (Valtioneuvoston asetus kivenlouhimojen, muun kivenlouhinnan ja kivenmurskaamojen ympäristönsuojelusta 800/2010). Terveyshaittojen ehkäisemiseksi ja vähentämiseksi hiukkasten pitoisuudet eivät saa ylittää Taulukko 6 esitettyjä raja-arvoja. Hiukkasten mallintamisen sallittu epävarmuus vuosikeskiarvolla on 50 %. (Valtioneuvoston asetus ilmanlaadusta 2011, 4 §, Liite 8.)

Taulukko 6 Valtioneuvoston ilmanlaatuasetuksen (2011/38) raja-avot ilman hiukkaspitoisuuksille (Valtioneuvoston asetus ilmanlaadusta 2011, 4 §)

Aine	Keskiarvon las- kenta-aika	Raja-arvo $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Sallittujen ylitysten määrä kalente- rivuodessa (vertailujakso)
Hengitettävät hiukkaset (PM_{10})	24 tuntia kalenterivuosi	50 40	35 -
Pienhiukkaset ($\text{PM}_{2,5}$)	kalenterivuosi	25	-

Taulukko 7 on esitetty ilmanlaatudirektiivin 2008/50/EY tämän hetkinen ohjeellinen tavoitearvo pienhiukkasiin ($\text{PM}_{2,5}$) vuosi keskiarvolle sekä tulevaisuudessa voimaan tulevat raja-arvot. Ilmanlaatudirektiivissä on annettu laatutavoitteet mallintamisen sallitulle epävarmuudelle, joka määritetään enimmäispoikkeamana mitatuista ja mallinnetuista raja-arvoihin verrannollisista pitoisuuksista. Tapahtumien ajoitusta ei oteta huomioon. Kuten valtioneuvoston ilmanlaatuasetuksessa, hiukkaspitoisuuksien eli $\text{PM}_{2,5}$ ja PM_{10} mallintamisen laatutavoite vuosikeskiarvolla on 50 %. Vuorokausikeskiarvoille ei direktiivissä ole määritetty sallittua epävarmuutta, koska lyhytaikaisten hiukkaspitoisuuksien arvioiminen mallien avulla on vaikeaa. (Alaviippola ja Pietarila 2011.)

Taulukko 7 Ilmanlaatudirektiivin (2008/50/EY) mukaiset tavoite- ja raja-arvot pienhiukkasilta (Alaviippola ja Pietarila 2011)

	$\text{PM}_{2,5}$ vuosikeskiarvo	Voimaantulovuosi
Ohjeellinen tavoitearvo	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	2010
Raja-arvo	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	2015
Raja-arvo	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	2020

3.5.2 Maa-aineslaki ja -asetus

Maa-aineslakia sovelletaan kiven, soran, hiekan, saven ja mullan ottamiseen pois kuljetettavaksi taikka paikalla varastoitavaksi tai jalostettavaksi. Lain tavoitteena on ainesten otto ympäristön kestävää kehitystä tukevalla tavalla. Maa-aineslakia ei sovelleta, jos kyseessä on

- kaivoslakiin (1965/503) perustuvaa ainesten ottamista
- rakentamisen yhteydessä irrotettujen ainesten ottamista ja hyväksikäyttöä, kun toimenpide perustuu viranomaisen antamaan lupaan tai hyväksymään suunnitelmaan
- sellaista ainesten ottamista vesialueella, johon vesilain (1961/264) mukaan vaaditaan aluehallintoviraston lupa. (Maa-aineslaki 1981, 1 §, 2 §.)

Maa-aineslain mukaan aineksia ei saa ottaa niin, että siitä aiheutuu kauniin maisemakuvan turmelumista, luonnon merkittävien kauneusarvojen tai erikoisten luonnonesiintymien tuhoutumista, huomattavia tai laajalle ulottuvia vahingollisia muutoksia luonnonolosuhteissa tai tärkeän tai muun vedenhankintakäyttöön soveltuvan pohjavesialueen veden laadun tai antoisuuden vaarantuminen, jolle ei siihen ole saatu vesilain mukaista lupaa. (Maa-aineslaki 1981, 3 §.)

Maa-ainesten ottamista varten on saatava lupa, ellei aineksia oteta omaa tavanomaista kotitarvekäyttöä varten asumiseen tai maa- ja metsätalouteen. Käytön tulee liittyä rakentamiseen tai kulkuyhteyksien kunnossapitoon. Lupaa haettaessa on ainesten ottamisesta ja ympäristön hoitamisesta sekä, mikäli mahdollista, alueen myöhemmästä käyttämisestä esitettävä ottamissuunnitelma. Tämä ei kuitenkaan ole tarpeen, jos hanke laajuudeltaan ja vaikutuksiltaan on vähäinen. Ottamissuunnitelman sisällöstä ja rakenteesta säädetään tarkemmin valtioneuvoston asetuksella. (Maa-aineslaki 1981, 4 §, 5 §.)

Ottamissuunnitelmaan kuuluvat selostus ja sitä täydentävät kartat ja piirroksot. Ottamissuunnitelmassa on osoitettava maa-aineslain 11 §:n 2 momentissa ja tarvittaessa myös sanotun pykälän 3 momentissa tarkoitetut seikat ja 5 §:n 2 momentissa tarkoitetut selvitykset alueen luonnonolosuhteista ja hankkeen ympäristövaikutuksista. (Valtioneuvoston asetus maa-ainesten ottamisesta 2005, 2 §.)

Suunnitelmaa laadittaessa on tarvittavassa laajuudessa selvittävä vallitsevat luonnonolosuhteet, ainesten määrä ja laatu sekä hankkeen vaikutukset ympäristöön ja luonnonolosuhteisiin. Ympäristövaikutusten arviointimenettelystä annetussa laissa (468/94) tarkoitettua hanketta koskevaan lupahakemukseen on liitettävä ympäristövaikutusten arviointiselostus. (Maa-aineslaki 1981, 5 §.)

Ympäristövaikutusten arviointimenettelyä sovelletaan hankkeisiin ja niiden muutoksiin, joista Suomi velvoittavan kansainvälisen sopimuksen täytäntöönpanemisen edellyttää arviointia taikka joista saattaa aiheutua merkittäviä haitallisia ympäristövaikutuksia Suomen luonnon ja muun ympäristön erityispiirteiden vuoksi. Ympäristövaikutusten arviointimenettelyssä arvioitavista hankkeista ja niiden

muutoksista säädetään tarkemmin valtioneuvoston asetuksella. (Laki ympäristövaikutusten arviointimenettelystä 1994, 4 §.)

Ympäristövaikutusten arviointia sovelletaan, kun kiven, soran tai hiekan ottoon suunniteltu louhinta- tai kaivalueen pinta-ala on yli 25 hehtaaria tai otettava ainesmäärä vähintään 200 000 kiintokuutiometriä vuodessa. (Valtioneuvoston asetus ympäristövaikutusten arviointimenettelystä 2006, 6 §.)

4 PÖLYN LEVIÄMISEN MALLINTAMINEN

4.1 Mallintaminen

Ilman epäpuhtauksien arviointia varten on kehitetty erilaisia leviämismalleja, joilla voidaan mallintaa muun muassa ilmassa leijuvien pölyhiukkasten leviämistä ja pitoisuuksia. Niillä voidaan jäljitellä pölyhiukkasten leviämistä tuulen mukana päästölähteen ympäristöön, ilman sekoittumista pysty- ja vaakasuunnassa sekä laskeumaa, jonka avulla epäpuhtaudet poistuvat ilmakehästä. Mallien tarkkuuteen vaikuttavat merkittävästi mallien ominaisuudet sekä lähtötietojen tarkkuus. Myös säätietojen sopivuus eri tilanteisiin tulee ottaa huomioon arvioitaessa mallin luotettavuutta. (Toivonen 2010, 102.)

Mallintamisen yhtenä merkittävänä etuna on, että sen avulla voidaan erottaa jokin tietty toiminta ympäristöstään ja arvioida vain sen aiheuttamia vaikutuksia ympäristöön laajallakin alueella. Mallintamisen rinnalla voidaan käyttää myös mittauksia, jotka kuvaavat tilannetta mallintamiseen verrattuna paljon suppeammalla alueella. Niiden avulla mallin luotettavuutta voidaan kuitenkin arvioida ja kehittää tarkemmaksi. On kuitenkin muistettava mittaustuloksia tarkastellessa ottaa huomioon myös kaikki varsinaisen kohteen ulkopuoliset päästölähteet, joilla voi olla vaikutusta tuloksiin. Hyöty toimii myös toisin päin, jolloin laskettua mallia voidaan käyttää esimerkiksi suunniteltaessa mittausverkkoa. (Toivonen 2010, 102.)

Epäpuhtauksien leviämismallit voidaan luokitella esimerkiksi aikariippuvuuden mukaan. Tällöin mallit voidaan jakaa stationaarisiin ja muuttuviin malleihin. Yleensä epäpuhtauksien mallinnuksessa käytetään stationaarista menetelmää. Stationaarisessa mallissa kaikki muuttujat ja parametrit pysyvät vakiona jokaisen tarkastelujakson aikana. Yleisin käytetty tarkastelujakso on yksi tunti. On myös olemassa erikseen laajoille alueille leviävien päästöjen mallintamista varten kehitettyjä malleja sekä päästölähteen lähialueiden pitoisuuksia kuvaavia malleja, joiden soveltuvuus ulottuu yleensä noin 30 km päähän. (Toivonen 2010, 102.)

Stationaarisia malleja kutsutaan Gauss-malleiksi, koska ne olettavat, että leviävän päästövanan pitoisuudet noudattavat normaalijakaumaa tuulensuuntaa vastaan sekä pysty- että vaakasuunnassa. Mitä enemmän etäisyyttä päästölähteeseen kertyy ja mitä labiilimpi säätilanne vallitsee, sitä laajempi on päästövana ja myös pysty- ja vaakasuuntaiset leviämisparametrit ovat suurempia. Myös maanpinnan laatu ja karkeus vaikuttavat pitoisuuksien muutokseen päästölähteestä kauemmaksi mentäessä. (Toivonen 2010, 103.)

4.2 Leviämismallien lähtötiedot

4.2.1 Päästöt

Lähtötietojen tarkkuudella on merkittävä rooli mallinnustulosten luotettavuudessa. Vaikka käytettävä malli olisikin luotettava, ovat mallilla saadut pitoisuusarvot epäkelvoja, jos lähtöarvot ovat epätark-

koja. Myös meteorologiset tiedot, joita käytetään lähtötietoina, tulisivat olla edustavia ja sopivia koh- teessa vallitseviin olosuhteisiin. (Toivonen 2010, 103.)

Luotettavien päästötietojen hankinta leviämismallintamista varten on työlästä ja tietojen saannin vaativuus riippuu toiminnan luonteesta. Esimerkiksi energiantuotannon päästöistä on olemassa pal- jon tietoa polttoaineiden kulutuksen seurannan ja päästömittaustietojen ansiosta. Päästölähteet pi- täisi selvittää mallilaskelmia varten siten, että saadaan tieto päästön hiukkaskokojakaumasta ja ajal- lisista vaihteluista. Päästölähteen luonne tulee myös määrittää. Päästölähteet voidaan luokitella joko piste-, viiva- tai aluelähteiksi. Tämä luokittelu tulee miettiä mallinnuksen mittakaavan mukaan. (Toi- vonen 2010, 103.)

Usein mallintaminen tapahtuu tilanteessa, jossa mitattua päästötietoa ei ole. Tällöin päästön suu- ruus tulee pystyä arvioimaan esimerkiksi alueella tehtyjen hiukkasmittauksien perusteella. Näin mal- lilaskelmia voidaan iteroida eli muokata siten, että saadut pitoisuudet vastaavat mitattuja pitoisuuksia. Yksi tapa arvioida murskeen tuotantoalueella syntyviä päästöjä olisi ajatella koko alue yhtenä isona päästölähteenä ja lisäksi mitata hiukkaspitoisuuksia alueen reunoilla jokaisesta ilmansuunnas- ta. Kuitenkin luotettavien lähtötietojen saamiseksi mittauksia tulisi tehdä usean kuukauden ajan. (Toivonen 2010, 103 - 104.)

4.2.2 Sääolosuhteet

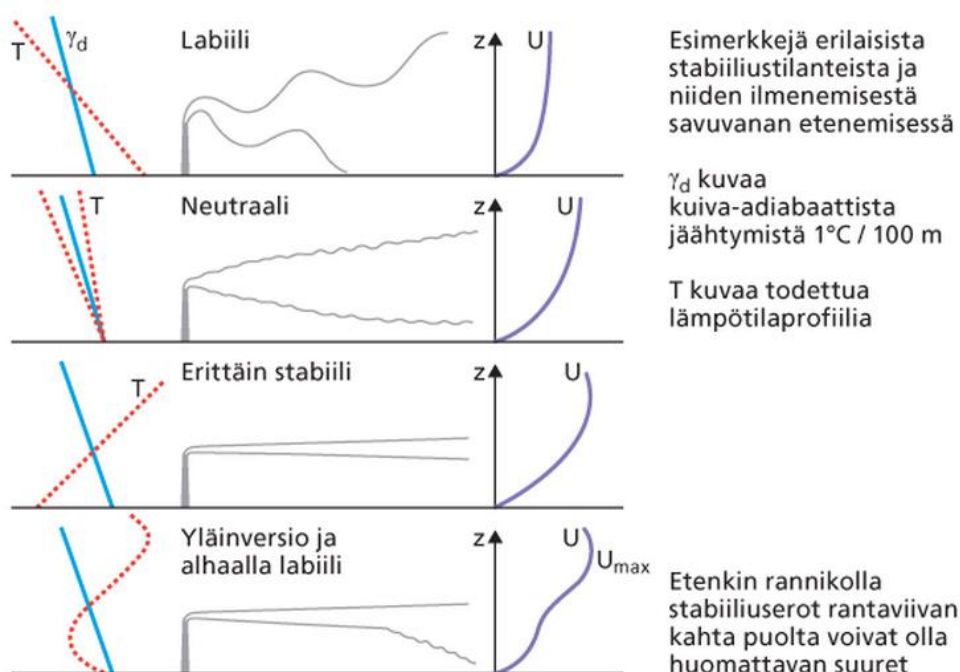
Meteorologiset muuttujat ovat merkittäviä epäpuhtauksien leviämiseen vaikuttavia tekijöitä. Esimer- kiksi maaston muodot ja meren läheisyys vaikuttavat sääolosuhteisiin. Mallilaskelmia varten tarvitta- vista meteorologisista syöttötiedoista merkittävimpiä ovat tuulen nopeus ja suunta. Harvoin päästö- alueelta on kuitenkaan olemassa riittävän pitkältä ajanjaksolta saatavia meteorologisia tietoja, jolloin mallilaskelmien tulokset voivat vääristyä merkittävästi. Lisäksi, koska tuulen nopeudet vaihtelevat eri korkeuksilla, maanpinnalta mitatut tiedot eivät vastaa korkeammalla vallitsevia olosuhteita. (Toivo- nen 2010, 104.) Tuulen nopeuden lisääntyessä, päästölähteen aiheuttama hiukkaspitoisuus ilmassa pienenee. Tämä johtuu siitä, että tuulen nopeus on hiukkasten matka-aikaa päästölähteestä vas- taanottopisteeseen määrittävä tekijä niin myötä- kuin vastasuuntaan. Tuulen nopeus on myös sitä suurempi mitä kauempana maan pinnasta ollaan, joten hiukkasten kulkeutumisenopeutta ei voida ar- vioida maanpinnan läheisyydessä mitatun tuulen nopeuden perusteella. (Toivonen 2010, 27.)

Tuulen nopeuden lisäksi hiukkaspilven leviämiseen vaikuttavat myös ilman pystysuuntaiset virtauk- set, niin sanottu sekoittumiskorkeus eli epäpuhtauksien sekoittumisen yläraja ja alilmakehän stabiili- suus, josta on harvoin olemassa tarkasteltavaa kohdetta vastaavia mittaustietoja. Varsinkin ennen leviämislaskelmissa tarvittavia päästöviuhkan laajenemista kuvaavia hajonta- ja turbulenssiparamet- reja on määritetty Pasquillin stabiilisuusluokituksen avulla. Nykyisin mallit ovat kehittyneet ja le- viämisparametreja pystytään arvioimaan säähavainnoista ilmakehän niin sanottujen rajakerrosteori- oiden avulla. Niillä voidaan kuvata paremmin ilmakehän tilaa. (Toivonen 2010, 104.)

Meteorologisessa mielessä tuulen suunnalla tarkoitetaan suuntaa, josta tuuli puhaltaa. Eli pohjoistuuli puhaltaa siis pohjoisesta päin. Tuulen suunta esitetään yleensä vain vaakasuuntaisen komponentin avulla, koska siihen verrattuna pystysuuntainen komponentti on suuruudeltaan merkityksetön. Tuulen suunnan ilmaiseminen on mahdollista myös kompassisuuntana, jolloin ilman suuntien tilalla käytetään asteita (esimerkiksi etelätuuli = 180°). Paikallisesti tarkasteltuna tuulen suunta voi vaihdella useita kertoja minuutin sisällä tai jopa kerran sekunnissa. Päästöpilveä ympäristössä tehokkaimmin levittääkin juuri tällaiset pyörteiset ilmavirtaukset. (Toivonen 2010, 27 - 28.)

Stabiilisuudella tarkoitetaan ilman tasapainotilaa, joka kuvaa ilmakehän pystysuuntaista sekoittumisherkkyyttä. Stabiilisuutta on mahdollista havainnollistaa kuvitteellisella pystysuuntaiseen liikkeeseen laitettavalla ilmapaketilla. Ilman ollessa stabiilissa tilassa paketti pyrkii lähtöasetelmaansa, kun taas neutraalin tilanteen vallitessa paketti jää paikkaan jonne se on laitettu. Labiilissa eli epästabiilissa tilanteessa paketin liike jatkaa samaan suuntaan johon se on laitettu menemään. Parhaat mahdolliset tilanteet ilman sekoittumisen kannalta ovat neutraali ja labiili tilanne. Kuvio 11 on kuvattu ilman eri stabiilisuustilanteita. (Suomen tuuliatlas 2008.)

Säätilanteen stabiilisuus riippuu ilmakerroksien lämpötiloista, joihin vaikuttavat muun muassa tuulen nopeus ja auringon säteily. Auringon lämmittäessä päivällä maanpintaa, maa lämpenee yläpuolista ilmaa voimakkaammin, jolloin maanpintaa lähimpänä olevaan kerrokseen muodostuu labiili tilanne. Tuulen nopeuden kasvaessa lämpötilaerot pienenevät, koska ilmakerrokset sekoittuvat tehokkaammin, ja ilmamassaan muodostuu neutraali tila. Ilman tila muuttuu stabiiliksi, kun alin ilmakerros viilenee. Lämpötila voi ylös mentäessä jopa nousta, jolloin puhutaan erittäin stabiilista tilanteesta. Pilvetön yö on otollinen aika stabiilin tilan syntymiselle. Pilvisuus mahdollistaa neutraalin tilan muodostumista, koska alin ilmakerros ei pääse jäähtymään niin voimakkaasti. (Toivonen 2010, 30.)



Kuvio 11 Savuvanan käyttäytyminen eri stabiilisuustilanteissa sekä eri tilanteille tyypillisiä vertikaali tuuliprofiileja (Suomen tuuliatlas 2008)

Pasquillin stabiilisuusluokat ovat yksi hyvä tapa kuvata ilman stabiilisuutta. Tässä menetelmässä stabiilisuusluokat on jaettu kuuteen eri luokkaan (A-F). Epävakainta tilannetta kuvaa luokka A ja stabiilinta tilannetta luokka F. Nämä stabiilisuusluokat määritellään meteorologisten parametrien mukaisesti, kuten Taulukko 8 voidaan nähdä. (Toivonen 2010, 30.)

Taulukko 8 Suomessa käytössä oleva Pasquill-luokitus (α on auringon korkeuskulma, N on pilvisyys 1/8 osina ilmoitettuna; 0 kuvaa selkeää ja 8 pilvistä taivasta) (Toivonen 2010, 31)

Luokitus lumettomana aikana									
Tuulen nopeus 10 m korkeudella (m/s)	Päivä	Päivä $35^\circ < \alpha < 60^\circ$		Päivä $20^\circ < \alpha < 35^\circ$		Päivä $5^\circ < \alpha < 20^\circ$		Yö $\alpha < 5^\circ$	
	N>7	N≤4	N>4	N≤4	N>4	N≤4	N>4	N≤4	N>4
<2	D	A	B	B	C	C	D	F	F
2 - 3	D	B	C	C	D	D	D	F	E
3 - 5	D	B	C	C	D	D	D	E	D
5 - 6	D	C	D	D	D	D	D	D	D
>6	D	D	D	D	D	D	D	D	D

4.2.3 Alueen maasto

Yksinkertaisimmissa ohjelmissa ei oteta huomioon maanpinnan muotoja, vaan ympäristön maastonkorkeudet huomioidaan niin sanottujen rosoisuusparametrien avulla. Ne kuvaavat maaston karkeutta eri ympäristöissä kuten vesistö, pelto, taajama-alue tai metsäalue. Rosoisuusparametrit eivät kuitenkaan kuvaa esimerkiksi tuotantoalueella sijaitsevia kallioseinämiä tai muitakaan ympäristön maastonmuotoja, jotka kuitenkin ovat merkittäviä muuttujia pölyn leviämisen kannalta. (Toivonen 2010, 104 - 105.)

Nykyisiin mallintamisohjelmiin voidaan liittää topografiaa kuvaavia tiedostoja, jolloin maanpinnan muodot ja laatu saadaan kuvattua hyvin tarkasti. Syöttötietoina leviämismallille voidaan syöttää esimerkiksi digitaalinen maastonkorkeusmalli, joka perustuu tarkkoihin mittauksiin. (Toivonen 2010, 105.)

4.3 Mallintamisen soveltuminen kivenmurskauksessa

Leviämismallien käyttöä kivenmurskausalalla rajoittaa se, että luotettavien lähtötietojen arviointi on haastavaa. Syöttötiedoikseen laskentamallit tarvitsevat tiedot päästölähteiden hiukkaspäästömääristä ja toiminnan ajallisista vaihteluista esimerkiksi tunneittain. Tällaisten päästötietojen tarkka arviointi murskaustoiminnan mallilaskelmia varten on hyvin vaikeaa tai käytännössä mahdotonta, koska käytettävät laitteistot ovat monimutkaisia päästölähteitä. Lisäksi toiminta-alueella on muitakin päästölähteitä varsinaisen toiminta-ajan ulkopuolella. Tällaisia päästölähteitä ovat esimerkiksi työmaali-

kenne, varastokasat, räjäytykset ja poraukset, jotka ovat lisäksi erittäin vaikeasti arvioitavissa. Näiden tekijöiden vuoksi kirjallisuudesta löytyvien päästökertoimien käyttö ei ole tarpeeksi luotettavaa murskaustoiminnan mallilaskelmia varten. Jos päästölähteet lisäksi sijaitsevat ympäristöään alempana, eivät mallilaskelmat yleensä pysty niitä hallitsemaan. Tällaisessa tapauksessa murskaustoiminnan päästöjä ei ole mahdollista mallintaa luotettavasti. (Toivonen 2010, 105.)

Koska mallilaskelmilla ei välttämättä saada luotettavia tuloksia, ei toiminnan vaikutusta ympäristöön niiden perusteella pystytä arvioimaan. Tästä syystä hiukkaspitoisuuksien vertailua ei voida tehdä asianmukaisesti esimerkiksi ilmanlaadun ohje- ja raja-arvoihin. Leviämismallit saattavat myös arvioida toiminnan aiheuttamat ympäristövaikutukset yläkanttiin, jolloin esimerkiksi ympäristölupaa haettaessa voivat epävarmuustekijät johtaa hankkeen kaatumiseen. EU:n direktiivi ja ilmanlaatuasetus vaativat mallinnuksella arvioidulta hiukkasien vuosipitoisuusarvolta vähintään 50 % tarkkuuden. Direktiivi ei määrittele lyhempiä ajanjaksoja koskevien arvojen tarkkuuksia. (Toivonen 2010, 105 - 106.)

4.4 Leviämismallinnusohjelma Cadna A-APL

Leviämismallinnusohjelma Cadna A (Computer Aided Noise Abatement) on ympäristömelun laskentaohjelma, jonka on tuottanut saksalainen DataKustik GmbH. Ohjelmalla pystytään laskemaan ja mallintamaan hyvin erilaisten kohteiden melupäästöjä. Mallinnuskohteita voivat olla teollisuuden, tie-, rautatie- ja lentoliikenteen sekä erilaisten tapahtumien ja vapaa-ajan toimintojen aiheuttamat melupäästöt. Laskennan ja mallinnuksen tulokset pystytään havainnollistamaan karttapohjalla, jossa melutasot on esitetty omalla värillään tai maustavalkotulosteessa rastereilla. (Tirkkonen 2013, 6.)

Optio Cadna A-APL laajentaa Cadna A -ohjelmiston kattavuutta ilmansaasteiden vaikutuksen laskenta-, arviointi- ja esitysmahdollisuuksilla. Optio mahdollistaa laskennat, jotka perustuvat Euroopan unionin direktiiveihin 1999/30/EC ja 2000/69/EG. Cadna A-APL pohjautuu tietokonemalliin AUSTAL2000, jonka on kehittänyt Saksalainen ympäristönsuojelujärjestö UBA. Cadna A-APL:n perusominaisuuksia ovat (Datakustik 2010.)

- käytettävissä olevat ilmanpäästökomponentit:
 - kaasumaiset komponentit: bentseeni, F, NH₃, NO, NO₂, NO_x, SO₂, tetrakloorietyleeni,
 - hiukkaset (4 hiukkaskokoluokkaa jokaiselle): As, Cd, Hg, Ni, Pd, Tl, PM₁₀ (pienhiukkaset), ja
 - haju
- ilmanpäästövaikutuksia kuvaavat kartat perustuen olemassa oleviin melumallikarttoihin
- vuotuisten tai monivuotisten meteorologisten tilastotietojen tuonti (*.akt, *.akterm)
- aikasarjojen luonti piste-, viiva- ja aluepäästöille
- aikasarjojen tuonti sattumanvaristen liikennetilanteiden päästöille Mobilev GL 2.0-ohjelmistopakelistä

- vaihtoehtoinen liikenteen standardisoitujen päästökertoimien käyttö perustuen yleisesti hyväksytyihin päästötietoihin (Tieliikenteen päästökertoimien käsikirja (HBEFA), versio 2.1, 2004)
- päästölähteiden, tarkkojen maastotietojen ja muiden olennaisten melumallinnustarkoituksiin käytettävien digitaalimallien tietojen tuonti. (Datakustik 2010.)

Lisäksi tunnettujen Cadna A-ominaisuuksien täysi toimivuus säilyy myös optio Cadna A-APL:ssä. Näitä ominaisuuksia ovat useiden laskenta-alueiden ja PCSP:n (Program Controlled Segmented Processing) yhdistäminen, ruudukkomainen pitoisuusvaihteluiden esitys tai päästöpitoisuuksien esitys objektien ("Level Box") avulla. Malli laskee hiukkaspitoisuuden vastaanottopisteessä aina 1,5 m:n korkeudella. Näin ollen hiukkasten laskeuman mallintaminen ei ole mahdollista. (Datakustik 2010.)

Cadna A-APL:n ilmanpäästöjen laskentapohjana käyttämä tietokonemalli Austal2000 on virallinen referenssimalli, joka pohjautuu saksalaiseen ilmanlaadun ohjearvoihin (Ta Luft). Malli toteuttaa siinä ja etenkin liitteessä 3 annettuja ohjeita ja suosituksia. Malli on langrangelainen, saksalaisen ohjeistuksen VDI 3945/3 kanssa yhdenmukainen hiukkasmalli. Ohjelma kykenee laskemaan ilmassa leijuvan materiaalin kulkeutumista alailmakehässä (noin 2000 metrin korkeuteen) paikallisesti sekä alueellisesti (noin 150 km etäisyydelle). (EIONET 2009.)

Ohjelmalla pystytään laskemaan esimerkiksi rikkidioksidin, typen oksidien ja hiukkasten pitoisuuksia. Meteorologisina tietoina tarvitaan tuulen nopeus ja suunta sekä ilmakehän stabilisuus. Ohjelmisto myös huomioi muun muassa rakennukset, maanpinnan muodon vaikutukset ja kuivadeposition. Ajallisena resoluutiona voidaan käyttää tuntia tai päivää, kuitenkin niin, että pisin mallinnettava ajanjakso on yksi vuosi. Horisontaalinen resoluutio määräytyy tilanteen mukaan ja on 15 - 200 metrin luokkaa, kun vertikaalinen resoluutio on muutamasta metrillä joihinkin kymmeneen metriin maanpinnasta ylöspäin. (EIONET 2009.)

Austal2000-malli on validoitu yleisesti käytetyillä kokeellisilla tiedostoilla (Prairie-Gras, tuulitunneli). Malli on säädetty saksalaisten ohjearvojen (VDI 3945/3) mukaisiksi ja on osa Saksan asetuksia, kuten TA Luft ja GIRL. Saksalainen ohjeistus (VDI 3945/3) kuvaa mallityypin ja määrittelee joukon varmennustestejä, jotka mallin laskennan tulee läpäistä. Austal2000 täyttää nämä kyseiset vaatimukset. Merkityksellisiä referenssikokeita ovat olleet maatalouskohteiden, teollisuuskohteiden ja voimalaitosten päästöjen leviämismallinnusprojektit. (EIONET 2009.)

5 OHJELMAN TESTAUS JA TYÖOHJEEN LAADINTA

5.1 Cadna A-APL:n soveltuvuuden selvittäminen ja testaus

Opinnäytetyössä tutkittiin Cadna A-APL ilmanpäästölisäosan soveltuvuutta kivenmurskauksesta aiheutuvan pölyn leviämisen mallintamisessa aluksi etsimällä tietoa eri lähteistä ohjelman ominaisuuksien selvittämiseksi. Selvityksen kohteina olivat muun muassa palveluntarjoajan omat kotisivut sekä mahdolliset tutkimukset, joissa olisi käytetty kyseistä ohjelmaa. Koska tarpeeksi kattavaa tietoa ohjelman soveltuvuudesta ei löytynyt, otettiin yhteyttä suoraan ohjelman saksalaiseen palveluntarjoajaan lisätietojen selvittämiseksi. Yhteydenoton tuloksena saatiin lisätietoa ohjelman ominaisuuksista sekä hintatarjous Cadna A:n suomalaiselta maahantuojalta.

Taustaselvitysten perusteella Cadna A-APL -lisäosa päätettiin vuokrata määräajaksi testimallinnuksia varten. Lisäosa vuokrattiin testauskäyttöön kuukaudeksi aikavälille 17.3.2014 - 18.4.2014. Kuukauden testausjakson aikana tarkoituksena oli saada tuotettua edustavat mallit kahdesta testikohteesta. Testikohteiksi valittiin Pielavedellä sijaitseva Laajakummun maa- ja kiviainesalue sekä Karttulassa sijaitseva Rukasmäen kallioalue. Kyseiset kohteet valittiin tähän työhön, koska niistä löytyi valmiit melumallit. Samoja melumallinnuksissa käytettyjä lähtöaineistoja voitiin siis hyödyntää pölyn leviämistä mallinnettaessa, eikä näin ollen niitä tarvinnut luoda uudestaan. Koska tilaajalla on tarkoitus alkaa tehdä pölyn leviämismallinnusta melumallinnuksen rinnalla, on tämä käytäntö luonnollinen vaihtoehto.

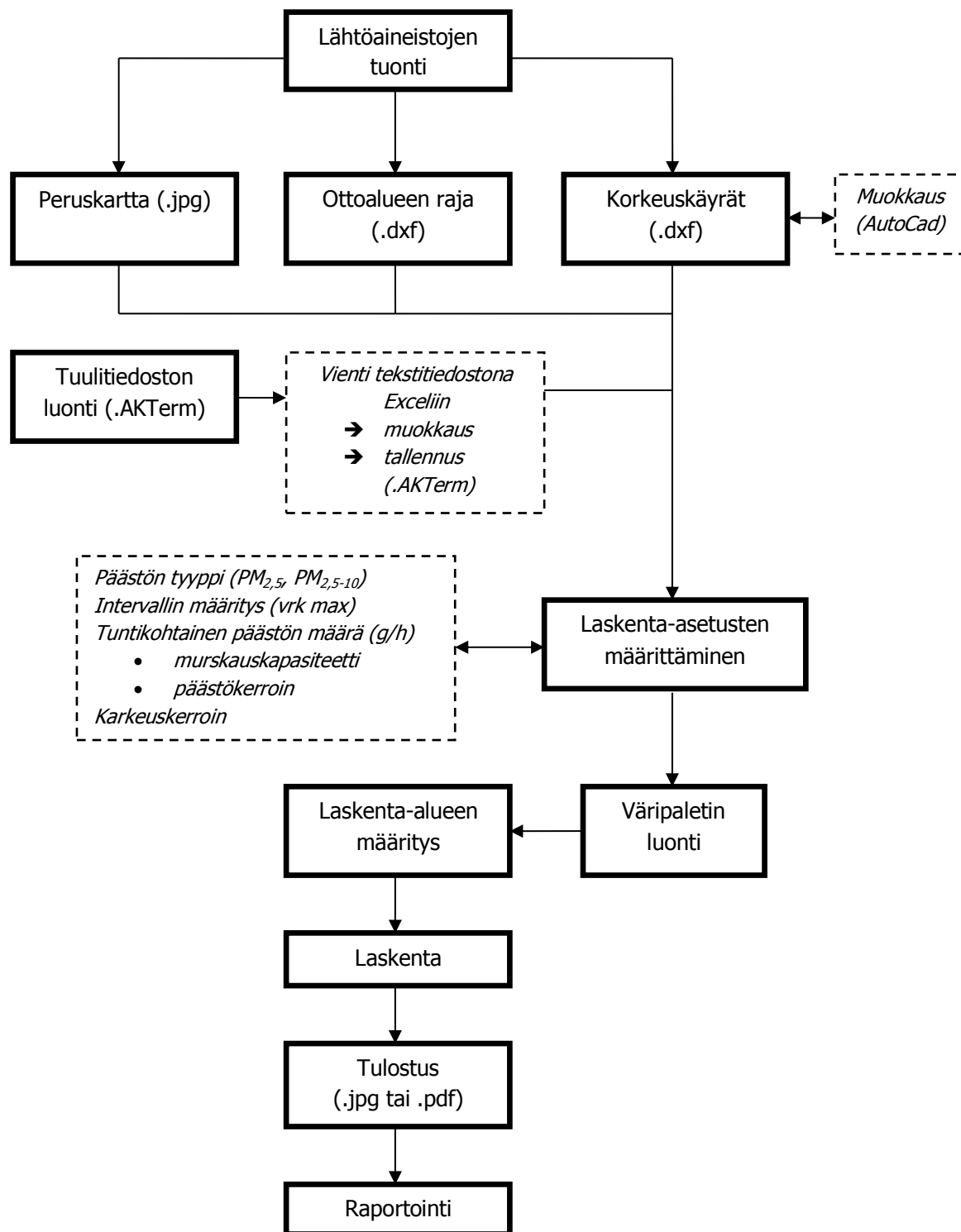
Cadna A-APL:n testauksessa apuna käytettiin ohjelman englannin kielistä manuaalia sekä Anna-Maria Tirkkosen opinnäytetyönään laatimaa Cadna A:n melumallinnuskäyttöohjetta. Testikohteiden lähtöaineistoina mallinnusta varten oli käytössä alueen peruskarttapohja, korkeuskäyrätiedosto ja maa-aineksen ottoalueen raja. Uutena aineistona pölyhiukkasten leviämisen mallintamista varten tarvittiin luoda kohteen sääolosuhteita asian mukaisesti kuvaava tuulitiedosto.

5.2 Mallinnuksen kulku

Murskauspölyn leviämisen mallintamisen lähtöaineistoiksi tarvitaan peruskartta alueesta, maa-ainesten ottoalueen raja sekä maanpinnan muotoja esittävä korkeuskäyrätiedosto. Testimallinnuksia varten nämä kaikki olivat valmiina käytössä, koska ne oli luotu jo kohteiden melumallinnusta tehtäessä. Ainoastaan korkeuskäyrätiedostoa tuli muokata siten, että alimman viivan korkeuden arvo oli nolla ($z = 0$). Tämä muokaus on tarpeellinen, koska Cadna A-APL ei välttämättä laske mallia, jos maanpinnan korkeus on liian suuri. Näiden lähtötietojen lisäksi tarvitaan myös tuulitiedosto kuvaamaan mallinnuskohteen sääoloja. Cadna A-APL:n mukana tulee valmiita tuulitiedostoja, joiden muokkaaminen kohteeseen sopivan säätilan simuloimiseksi onnistuu kätevästi viemällä ne tekstitiedostona Exceliin.

Kuvio 12 on esitetty mallinnuksen kulku pääpiirteittäin vuokaavion muodossa. Tarkempi suomenkielinen ohje pölynleviämisen mallintamisesta Cadna A-APL:llä on toimitettu tilaajalle ja sitä ei ole lupa

esittää tässä opinnäytetyössä. Murskauspölyn leviämisen mallintamisen käyttö- ja raportointiohjeen sisällysluettelo on esitetty liitteissä (Liite 8).

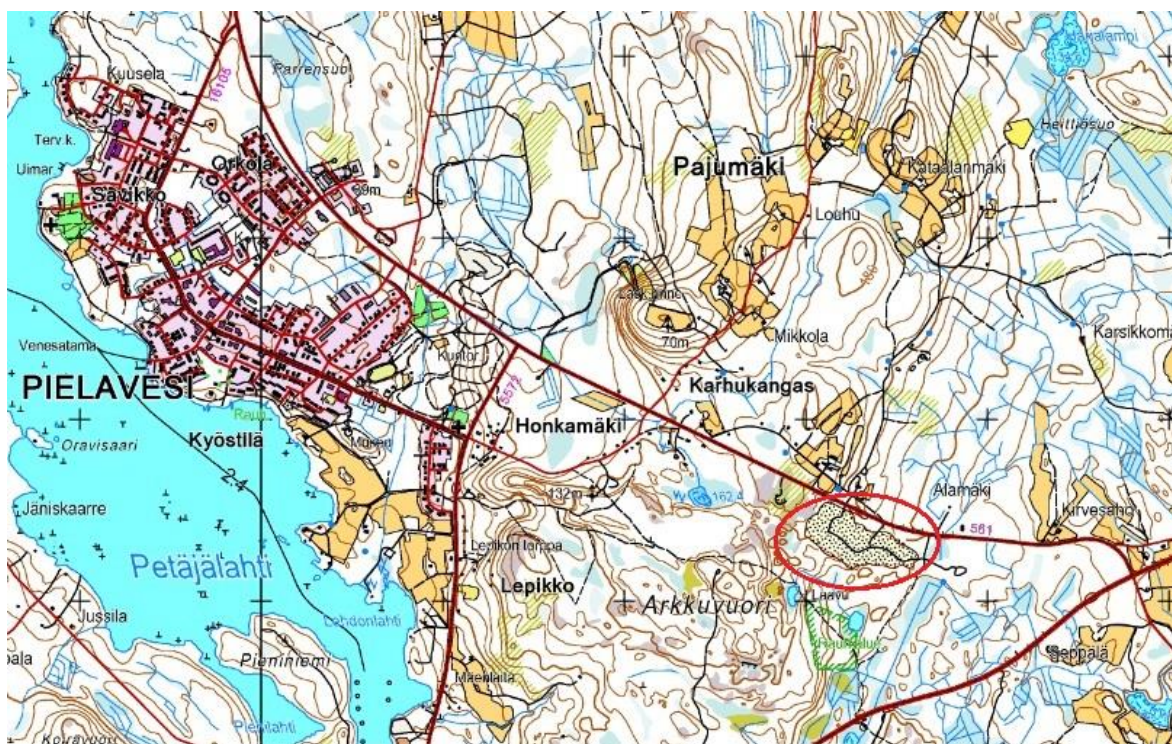


Kuvio 12 Mallinnuksen kulku vuokaaviona esitettynä

5.3 Mallinnuskohde 1: Laajakummun maa- ja kiviainesalue, Pielavesi

5.3.1 Mallinnuskohteen 1 kuvaus

Mallinnuksen testikohde sijaitsee Pielaveden kunnan Karjalan kylässä (Kuvio 13), tiloilla Kivikangas 2:54 ja Louhikko 2:63 ja ne kuuluvat luvan haltian omistukseen. Yhteenlaskettu pinta-ala tiloilla on 11,6 ha ja alue on merkitty maakuntakaavassa sora- ja hiekanottoalueeksi (EO). Häiriölle alttiita kohteita ovat alueen koillis- ja pohjoispuolella 100 - 150 metrin etäisyydellä sijaitsevat asuinkiinteistöt ja eläinsuoja, länsipuolella sijaitseva Pielaveden kunnan pohjavedenottamon Honkamäen pohjavesialue (luokka I), joka rajoittuu tilaan Louhikko 2:63 sekä alueen länsipuolelle sijoittuva 6,1 hehtaarin kokoinen luonnonsuojelualue. Myös lounaispuoli on merkitty maakuntakaavassa ulkoilun ohjaustarvealueeksi, jolla on luonnonsuojeluarvoja. Alueen luoteispuoli (tila; Louhikko 2:63) on korkeaa, kallioista ja vähäpuustoista mäenharjannetta. (Pielaveden kunta 2009.)



Kuvio 13 Laajakummun maa-ainesten ottoalue (punainen ympyrä). Kuvan korkeuskäyrät ilmaisevat maanpinnan korkeuden muutoksen 5 m:n välein. (Paikkatietoikkua.fi.)

Toiminta alueella on louhintaa, murskausta sekä varastointia. Alueelta otetaan murskattavaa materiaalia 5,8 ha kokoiselta alueelta ja toimintaa on tarkoitus harjoittaa kymmenen vuoden ajan vuosina 2008 - 2018 vuosittain 1 - 4 kuukauden ajan arkipäivinä klo 06.00 - 22.00. Sora- ja kalliomurskeiden arvioidut valmistusmäärät on esitetty Taulukko 9. (Pielaveden kunta 2009.)

Taulukko 9 Arviot valmistettavien sora- ja kalliomurskeiden määristä (Pielaveden kunta 2009)

Tuotteet	Tuotannon kes- kiarvo (t/d)	Tuotannon maksimi (t/d)	Tuotannon kes- kiarvo (t/a)	Tuotannon maksimi (t/a)
Sora- /kalliomursketta	2 500	5 000	60 000	120 000

Kallion louhintaa ja murskausta tapahtuu keskimäärin 10 - 40 päivänä vuodessa yleensä koostuen useasta lyhyestä toimintajaksosta. Murskeet varastoidaan alueen murskaamon läheisyyteen varastokasoihin, joista poiskuljetus tapahtuu ympäri vuoden markkinoiden mukaan. Yhdellä räjäytyskerralla kalliota irtoaa keskimäärin 3 500 - 5 500 kiinto-m³ eli 10 000 - 15 000 tonnia, joka murskataan 1 - 2 viikon kuluessa. Murskaimet sijoitetaan murstakattavan kohteen läheisyyteen varastokasojen ja kallioseinämien väliseen tilaan ja ne tuottavat mursketta keskimäärin 2 500 tonnia vuorokaudessa ja 35 000 tonnia vuodessa. (Pielaveden kunta 2009.)

Alueen vieressä kulkee asfalttipäällysteinen maantie 561. Tiet maantieltä toiminta-alueelle ovat sen sijaan sorapintaisia ja niitä kastellaan pölyämisen estämiseksi tarvittaessa. Teillä on raskasta liikennettä keskimäärin 5 - 20 käyntiä päivässä sekä raskasta huoltoliikennettä (varaosat ja polttoaineet), koneliikennettä ja henkilöautoliikennettä. Liikenne ajoittuu lähinnä klo 06.00 - 22.00 väliselle ajalle. (Pielaveden kunta 2009.)

Kohteen toiminnasta aiheutuu pölypäästöjä, joita pyritään rajoittamaan parhaalla mahdollisella tavalla. Keinoja ovat suojaukset, poravaunujen pölynsidontalaitteistot ja murskaustoiminnasta aiheutuvan pölyn sidonta vesikastelulla. Pakkasella vesikastelu ei ole mahdollista, joten käytetään pressuja suojaamaan pölyviä kohteita tuulelta. Myös varastokasat pyritään sijoittamaan siten, että pölyn leviäminen lähiasutusalueille estyisi. (Pielaveden kunta 2009.)

Toiminnassa syntyvää pölyä voi joissakin sääolosuhteissa kulkeutua lähiasutusalueille haitallisissa määrin. Pölypäästöt voivat muodostua ympäristön pilaantumista, terveyshaittaa tai kohtuutonta rasi- tusta naapureille aiheuttaviksi, jos ei käytetä tehokkaita pölyntorjuntakeinoja. Ympäristökeskuksen mukaan liikenteestä ja murskauksesta aiheutuvat pölypäästöt tulee minimoida edellä mainituilla keinoilla. Koska kivenotto- ja murskaustoiminta sijoittuu Honkamäen pohjavesialueen välittömään läheisyyteen (kaakkoispuoli), tulee kasteluvesien käyttöön kiinnittää erityistä huomiota. Kivenotto- ja murskaustoiminnan tapahtuessa pohjavesialueella tai sen vaikutusalueella, on kasteluun käytettävä vain puhdasta vettä. Pölynsidonnassa syntyviä hulevedet tulee imeyttää maaperää, eikä niitä saa johtaa suoraan vesistöön. (Pielaveden kunta 2009.)

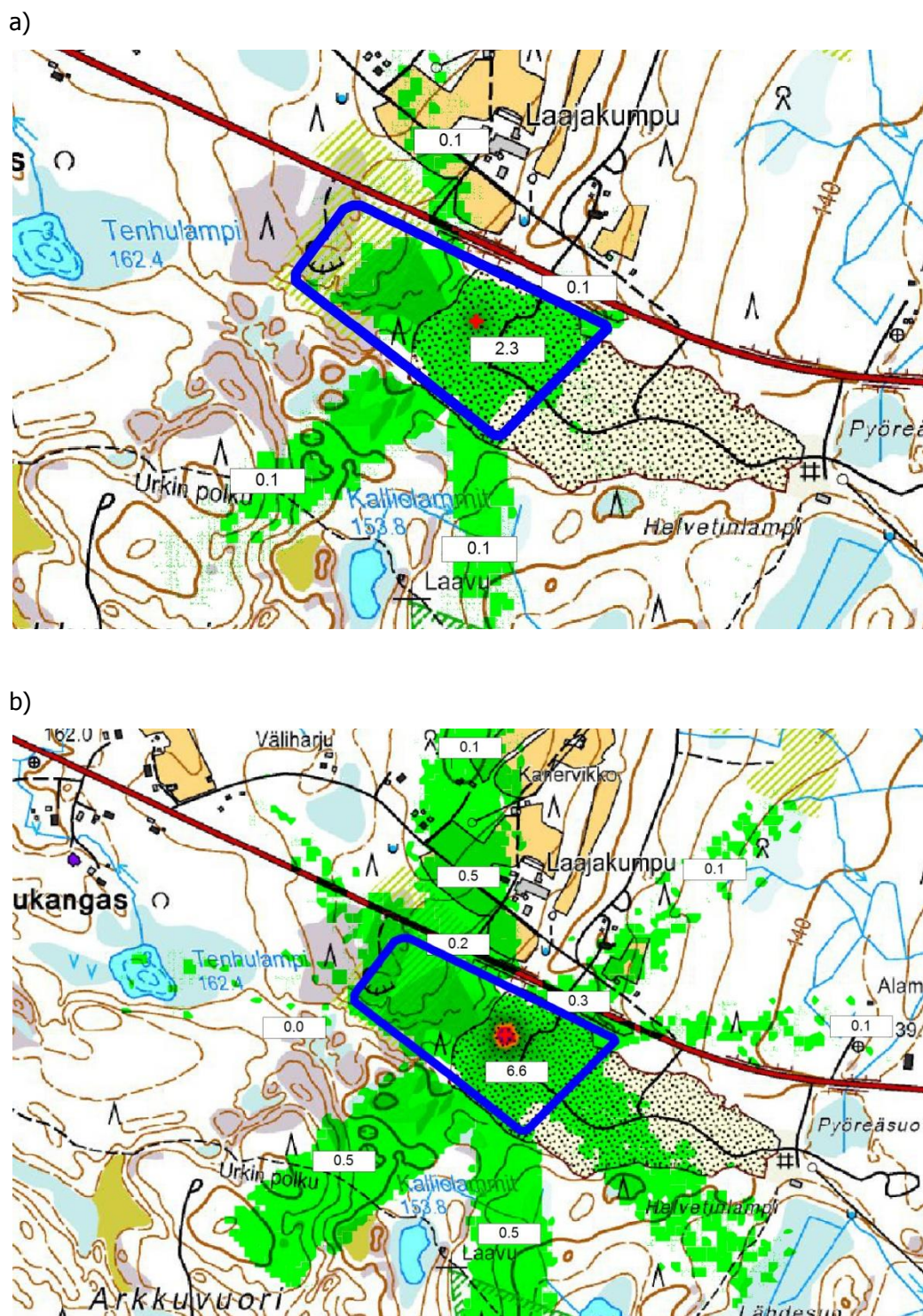
Kunnan terveydensuojeluviranomaisen lausunnon mukaan pitkät sateettomat jaksot ja liikenne voivat lisätä pölyn määrää lähiympäristössä pölysuojauksista huolimatta. Pölyn leviämistä tulee siis rajoittaa niin, että siitä ei aiheudu terveyshaittaa alueen lähiasukkaille. (Pielaveden kunta 2009.)

Alueen läheisyydessä on viisi asuttua omakotitaloa ja lypsytila. Kiven murskauksesta voi arvioiden mukaan aiheutua pölyhaittaa lähialueen asukkaille ja maanviljelijän karjalle. Osa maatilan pelloista sijaitsee alueen toiminnasta aiheutuvan pölyn vaikutusalueella. Näin ollen karja joutuu esimerkiksi syömään kivipölyn likaamaa heinää ja rehua. Maastoon laskeutuva kivipöly muodostaa terveysriskin, koska se ei sitoudu helposti muuhun maa-ainekseen. Hienojakoinen kivipöly kulkeutuu ihmisten ja eläinten elimistöön hengityksen kautta sekä ilmastonin kautta sisätiloihin. Ottotoiminnasta aiheutuvia laskeumamääriä, radioaktiivisuutta tai muita terveyshaittoja ei ole tutkittu ympäristölupaa varten. (Pielaveden kunta 2009.)

5.3.2 Murskauspölyn leviämismallit kohteessa 1

Laajakummun maa- ja kiviaineksen ottoalueen kivenmurskauksen aiheuttamista pölypäästöistä päädyttiin tekemään kaksi mallinnustilannetta, joissa tuulen nopeus oli ensimmäisessä 3 m/s ja toisessa 6,2 m/s. Tuulen nopeudet näihin tilanteisiin valittiin Kuopion seudun tuulitilastojen perusteella. 3 m/s on Ilmatieteen laitoksen Kuopion alueen (sisämaan) kuukausittainen keskiarvo, joka vaihtelee varsin vähän. 6,2 m/s on Suomen sääpalvelun vuoden 2012-2014 mitattujen kuukauden suurimpien tuulen nopeuksien keskiarvo. Molemmista tilanteista luotiin malli sekä pienhiukkasten (PM_{2,5}) että karkeiden hengitettävien hiukkasten (PM_{2,5-10}) leviämiseksi. Koska malli laskee nämä kaksi kokoluokkaa erikseen, saadaan kaikkien hengitettävien hiukkasten (PM₁₀) pitoisuusarvot vastaanottopisteissä laskemalla molempien tilanteiden arvot yhteen.

Kuvio 14 ja Kuvio 15 on esitetty nämä edellä mainitut tilanteet. Kaikissa tätä opinnäytetyötä varten tehdyissä testimallinnuksissa on käytetty väripalettia, joka ilmaisee alle 20 µg/m³:n hiukkaspitoisuudet kirkkaan vihreällä värillä. Tästä suurempiin pitoisuuksiin mentäessä väri muuttuu tummemmaksi tasaisin välein. Värin muutoksen raja-arvot väripaletissa on valittu vallitsevien ja tulevaisuudessa voimaan astuvien lainmukaisten raja-arvojen mukaan. Suuremmat kuvat molempien testikohteiden mallinnustilanteista selitteineen löytyvät liitteistä.

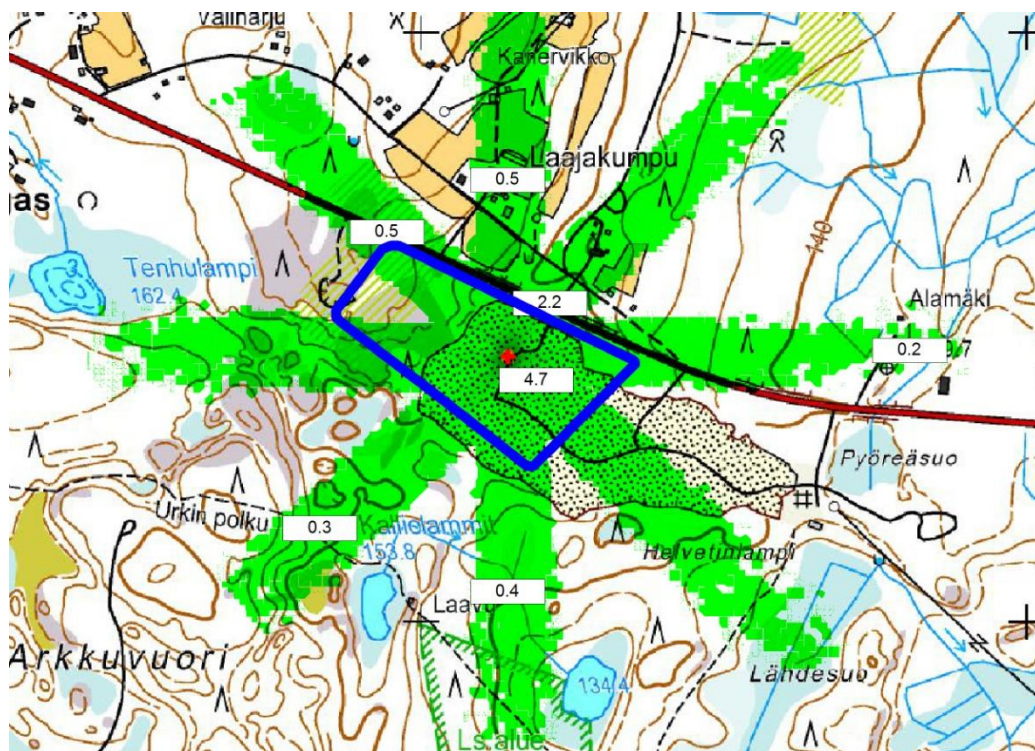


Kuvio 14 Laajakummun maa- ja kiviaineksen ottoalueen murskaimen aiheuttaman a) $PM_{2,5}$ -hiukkaspäästön ja b) $PM_{2,5-10}$ -hiukkaspäästön leviäminen 8 ilmansuuntaan tuulen nopeuden ollessa 3 m/s . Kuvassa on esitetty hiukkaspäästöjen vuorokauden maksimiarvoja ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) eri vastaanottopisteissä.

a)



b)

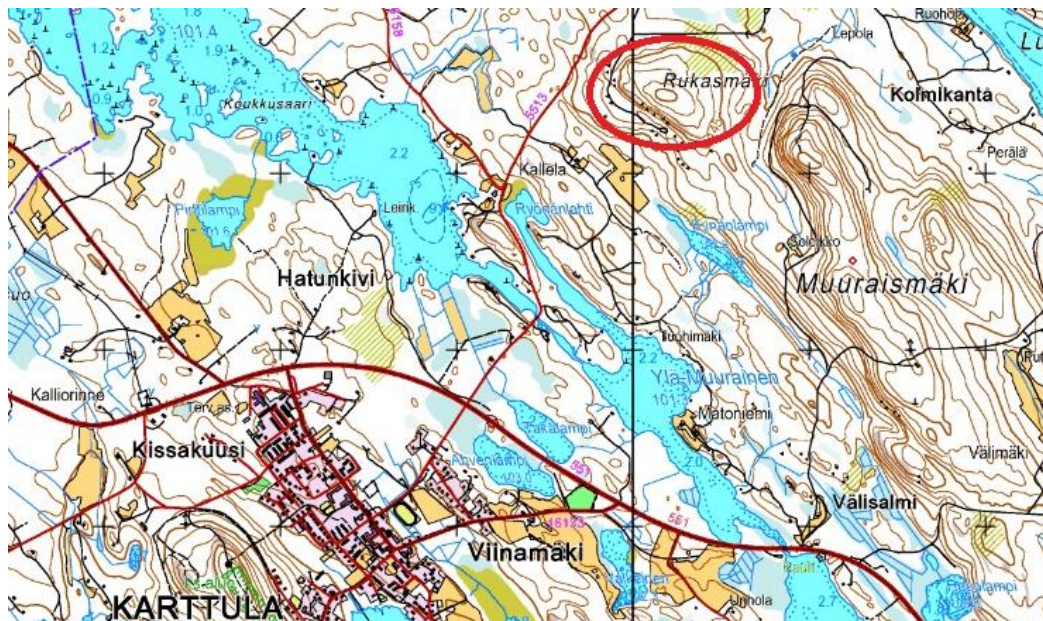


Kuvio 15 Laajakummun maa- ja kiviaineksen ottoalueen murskaimen aiheuttaman a) PM_{2,5}-hiukkaspäästön ja b) PM_{2,5-10}-hiukkaspäästön leviäminen 8 ilmansuuntaan tuulen nopeuden ollessa 6,2 m/s. Kuvassa on esitetty hiukkaspäästöjen vuorokauden maksimiarvoja (µg/m³) eri vastaanottopisteissä.

5.4 Mallinnuskohde 2: Rukasmäen maa- ja kiviainesalue, Karttula

5.4.1 Mallinnuskohteen 2 kuvaus

Mallinnuksen toinen testikohde sijaitsee Karttulan kylässä tilalla RN:o 474:1:46 osoitteessa Lamperilantie 281 (Kuvio 16). Luvan hakija on jättänyt 3.12.2012 kohteesta ympäristölupahakemuksen, joka koskee kivenlouhinta- ja murskaustoimintaa. Samassa yhteydessä alueelle on haettu myös maa-aineslain mukaista maa-ainesten ottolupaa. (Kuopion kaupunki 2013.)



Kuvio 16 Rukasmäen maa-ainesten ottoalue (punainen ympyrä). Kuvan korkeuskäyrät ilmaisevat maanpinnan korkeuden muutoksen 5 m:n välein. (Paikkatietoikkuna.fi.)

Rukasmäen maa-ainesalue on merkitty Kuopion seudun maakuntakaavassa ja Pohjois-Savon maakuntakaavassa maa-ainesten ottoalueeksi. Kivenlouhimoalueen ympäristö on luonnontilaista metsätalousaluetta, jolla on myös haja- ja loma-asutusta. Lähin luonnonsuojelualue (Pörönmäen yksityinen luonnonsuojelualue) sijaitsee 3,4 km päässä. Maa-ainesalue ei sijoitu pohjavesialueelle, koska lähin sijaitsee 1 500 m etäisyydellä lounaaseen sijoittuvalla Hatunkiven alueella (II-luokan pohjavesialue). Sektorissa kaakko-luode 420 - 850 m:n etäisyydellä sijaitsee lähimmät yksittäiset asuin-kiinteistöt. Muita ympäristövaikutuksille alttiita kohteita, kuten kouluja tai päiväkoteja, ei lähialueella sijaitse. (Kuopion kaupunki 2013.)

Rukasmäen maa-ainesalue sijoittuu 2,8 km päähän taajamasta Karttulan keskustaajaman koillispuolelle. Luontoselvityksen perusteella Rukasmäen alue on suurimmaksi osaksi tuoretta kangasmetsää, mutta myös kuivan kangasmetsän piirteitä on havaittavissa. Selvityksen yhteydessä ei erityisen tärkeitä luontotyyppisiä, uhanalaisia kasveja tai lähteitä löydetty. Alueen ympärysmetsät ovat pääasissa metsätalouksikäytössä olevia varttuneita kasvatusmetsäkiitä. Kivenlouhimo siis sijoittuu maa- ja

metsätalousalueelle, jossa ei sijaitse muita merkittävästi ympäristön tilaan vaikuttavia toimintoja. Alueen ilmanlaadun ja melutilanteen on arvioitu olevan hyvä. (Kuopion kaupunki 2013.)

Rukasmäen maa-ainesalueella tullaan harjoittamaan kiven louhintaa ja louheen murskausta sekä valmiin murskeen kuormaamista ja varastointia. Kiviainesta on tarkoitus ottaa 170 000 kiinto-m³ eli noin 510 000 tonnia. Vuosittainen ottomäärä on keskimäärin 17 000 m³ktr. Yksittäisen vuoden ottomäärään vaikuttaa vallitsevan vuoden kiviaineksen kysyntä. Nykyisellään alueen maanpinta vaihtelee noin tasolla +128.00 - +152.00 ja alin ottotaso on +131.00. Kalliokivenotto on tarkoitus aloittaa maa-ainesalueen eteläpäästä pohjoiseen edeten. (Kuopion kaupunki 2013.)

Toiminnan aikana kiviainesta louhitaan 1 - 2 kertaa vuodessa kahden viikon ajan kerrallaan. Eri kivilajitteiksi murskattavaa kiinteää kalliota louhitaan yhden louhintajakson aikana enimmillään 50 000 tonnia. Pysyvää murskauslaitosta alueelle ei sijoiteta, vaan murskaus tapahtuu aliurakoitsijoiden murskauslaitteistoilla. Tyypillisesti ne ovat 2 - 3 vaiheisia (esi- ja jälkimurskaus) liikuteltavia Lokotrack-tyyppisiä murskaimia. Ensimmäisessä vaiheessa käytetään ottorintauksen mukana liikutettavaa esimurskainta, jota seuraa yksi tai useampi jälkimurskain sekä seulavaunu. Louhinnan tavoin kalliokiven murskausta harjoitetaan 1 - 2 kertaa vuodessa (30 000 - 50 000 t/kerta) ja tyypillisesti yksi murskaisjakso kestää 2 - 4 viikoa. Murskeita murskain tuottaa enimmillään n. 3 000 t vuorokaudessa. Varastointi maa-ainesalueelle tapahtuu lajikkeittain. Taulukko 10 on esitetty maa-ainesalueella tapahtuvien eri toimintojen toiminta-ajat. (Kuopion kaupunki 2013.)

Taulukko 10 Ilmoitetut toiminta-ajat Karttulan kohteessa (Kuopion kaupunki 2013)

Toiminta	Toiminta-aika
Kallion poraus	ma - pe klo 7.00 - 21.00
Kallion räjäytykset	ma - pe klo 8.00 - 18.00
Louheen rikotus	ma - pe klo 8.00 - 18.00
Murskaus	ma - pe klo 7.00 - 22.00
Valmiiden murskeiden lastaus ja kuljetukset	ma - pe klo 6.00 - 22.00

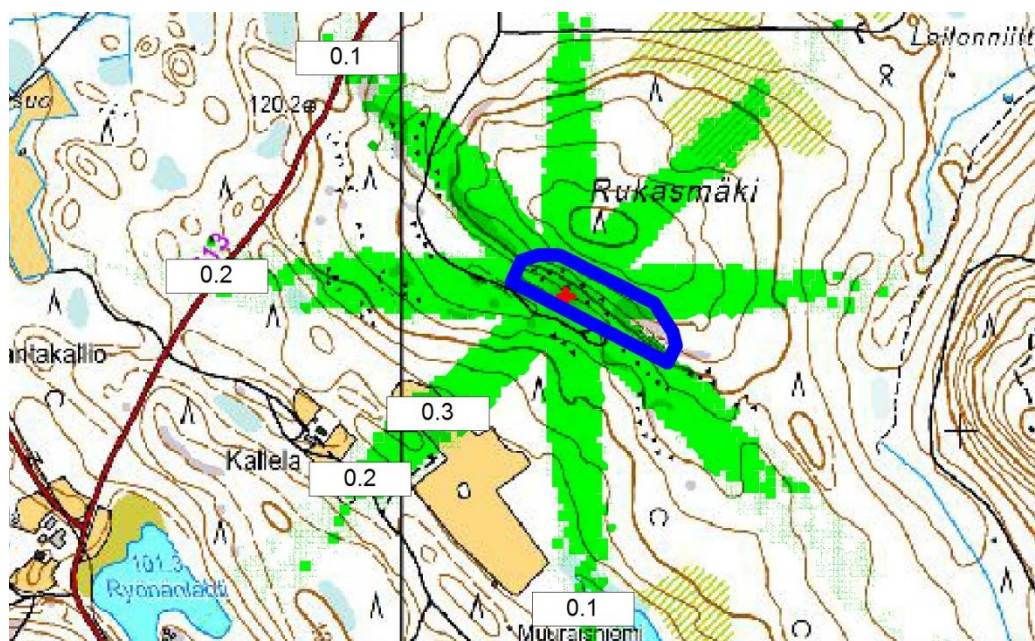
Murskaustoiminnassa pyritään käyttämään uusinta ja parasta mahdollista tekniikkaa, jolloin minimoidaan toiminnan mahdollisesti aiheuttamat melu- ja pölypäästöt. Käytettäessä uusimpia työkonemalleja vähennetään ilmanpäästöjä, joiden raja-arvot kiristyvät asteittain lähivuosina VNa 398/2005 mukaisesti. Toiminnasta aiheutuu pölypäästöjä (prosessipäästöt) kalliokiven louhinnassa, murskauksessa ja valmiiden tuotteiden lastauksessa. Työmaaliikenne ja ulkopuolinen kuljetusliikenne aiheuttavat myös tietyissä olosuhteissa pölypäästöjä (hajapäästöt). Suurin osa tuotannon aiheuttamisesta pölypäästöistä on yli 10 µm kokoluokka, jonka seurauksena ne laskeutuvat lähelle syntypaikkaansa. (Kuopion kaupunki 2013.)

Porausvaunuissa on pölynkeräyslaitteistot, joihin poraussoija eli kallioporauksen pöly kerätään ja kuljetetaan muualle kuin suoraan räjäytyspaikalle. Louhinnasta ja lastauksesta aiheutuva pöly on sen verran suurijakoista, ettei se leviä haitallisesti ympäristöön. Murskainten kuljettimet ovat varustettu pölynerottimilla ja koteloitu. Prosessin eri vaiheisiin voidaan syöttää vettä sitomaan pölyä, mutta kuitenkin vain pakkaskauden ulkopuolella. Murskatun kiviaineksen pölyämistä vähennetään murskekasoja kastelemalla ja säätämällä putoamiskorkeutta. Murskainten sijoittamisella varastokasojen ja kallioseinämän läheisyyteen on suuri vaikutus syntyvän pölyn leviämisen minimoinnissa. Myös työmaateitä on syytä kastella. Ympäristöluvan hakijan mukaan murskainten nykyaikaisilla pölyntorjuntamenetelmillä taataan se, ettei VN:n (38/2011) mukaisia raja-arvoja tulla ylittämään maa-aineesalueen lähimmällä kiinteistöllä noin 420 m päässä alueesta lounaan suuntaan. (Kuopion kaupunki 2013.)

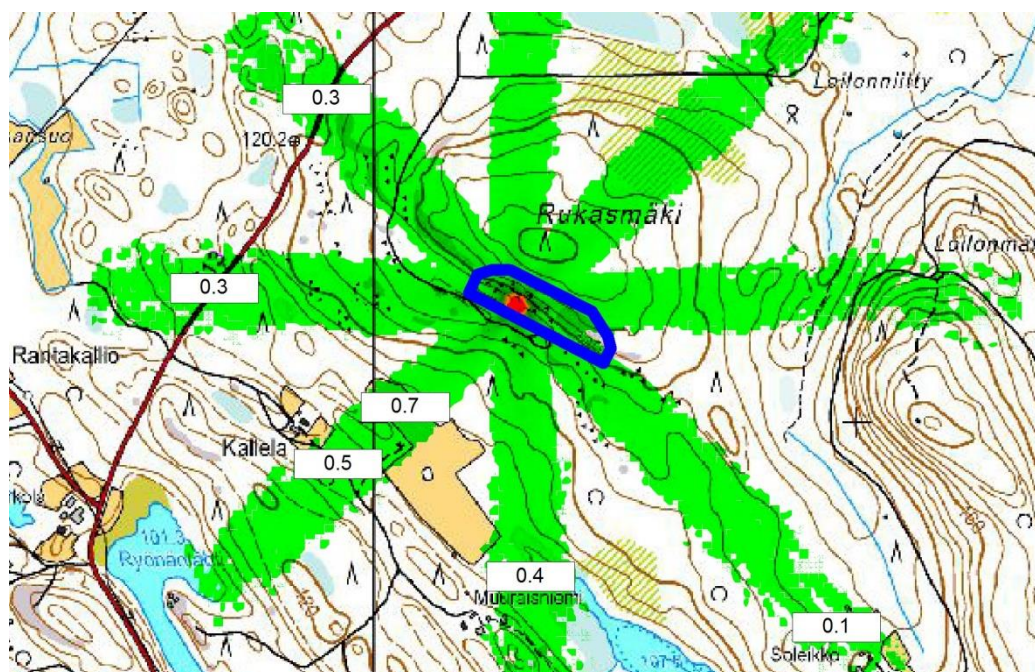
5.4.2 Murskauspölyn leviämismallit kohteessa 2

Rukasmäen maa- ja kiviaineksen ottoalueen kivenmurskauksen aiheuttamista pölypäästöistä tehtiin mallinnustilanteet ainoastaan tuulen nopeuden ollessa 3 m/s, koska ohjelma ei tuottanut mallia tuulen nopeuden ollessa yli 6 m/s. Myös tälle testikohteelle luotiin malli sekä pienhiukkasten ($PM_{2,5}$) että karkeiden hengitettävien hiukkasten ($PM_{2,5-10}$) leviämiseksi (Kuvio 17). Lisäksi luotiin tilanne, jossa tuuliolosuhteet ovat samat (3 m/s), mutta murskauksen pölypäästöjä ei kontrolloida millään päästöjen torjuntakeinoilla (Kuvio 18). Tähän tilanteeseen käytettiin Taulukko 5 mukaista kontrolloimattomille PM_{10} -päästöille laskettua päästökerrointa, joka on selvästi kontrolloitua suurempi.

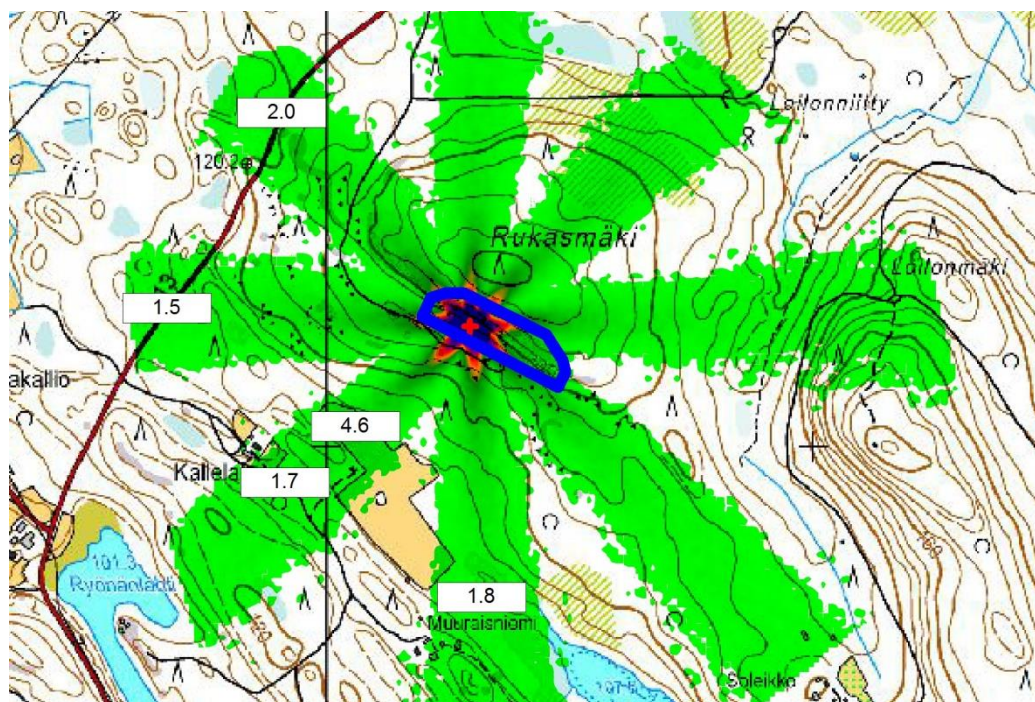
a)



b)



Kuvio 17 Rukasmäen maa- ja kiviaineksen ottoalueen murskaimen aiheuttaman a) $PM_{2,5}$ -hiukkaspäästön ja b) $PM_{2,5-10}$ -hiukkaspäästön leviäminen 8 ilmansuuntaan tuulen nopeuden ollessa 3 m/s. Kuvassa on esitetty hiukkaspäästöjen vuorokauden maksimiarvoja ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) eri vastaanottopisteissä.



Kuvio 18 Rukasmäen maa- ja kiviaineksen ottoalueen kontrolloimattoman (ilman pölyntorjuntamenetelmiä, kuten kastelua tai koteloiteja) murskauksen aiheuttaman $PM_{2,5-10}$ -hiukkaspäästön leviäminen 8 ilmansuuntaan tuulen nopeuden ollessa 3 m/s. Kuvassa on esitetty hiukkaspäästöjen vuorokauden maksimiarvoja ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) eri vastaanottopisteissä.

5.5 Tulokset ja niiden arviointi

Hiukkaspitoisuudet kaikissa mallinnustilanteissa jäivät alle $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ suuruisiksi sekä $\text{PM}_{2,5}$ että PM_{10} (yhteenlaskettu arvo) kokoluokkien osalta kaikkien ottoalueiden läheisyydessä sijaitsevien asutusten vastaanottopisteissä. Ainoa poikkeus on Rukasmäen mallinnustilanne, jossa mallinnettiin pölyhiukkasten leviämien kontrolloimattoman päästön päästökertoimella. Tämä tilanne ei kuitenkaan todellisuudessa pääse tapahtumaan, koska päästöt pyritään aina minimoimaan asian mukaisilla pölyntorjuntamenetelmillä.

Taulukko 6 esitetyt valtioneuvoston ilmanlaatuasetuksen (38/2011) raja-arvot ilman hiukkaspitoisuuksille ovat PM_{10} :n osalta 24 tunnin keskiarvona $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja vuosikeskiarvona $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Nämä pitoisuudet eivät pelkän murskauksen osalta pääse ylittymään. Myöskään $\text{PM}_{2,5}$ pitoisuusarvot eivät yllä asetuksen raja-arvoon, joka on vuosikeskiarvona $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$. 24 tunnin raja-arvoa ei pienhiukkasille ole asetuksessa määritetty. Myöskään Taulukko 7 esitetty ilmanlaatudirektiivin (2008/50/EY) mukainen vuonna 2020 voimaan astuva raja-arvo $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ei pääse ylittymään murskauksen pölypäästöjen osalta.

Tässä työssä arvioitiin vain kivenmurskauksen aiheuttamaa pölyhiukkasten leviämistä ottoalueen lähiympäristöön. Alueella kuitenkin on muitakin pölyhiukkaspäästöjä aiheuttavaa toimintaa, kuten räjäytys-, poraus- ja kuljetustoimintaa. Näistä räjäytysten ja porausten aiheuttamat pölypäästöt ovat kuitenkin verrattain pieniä. Mallinnuskohteista päätettiin luoda ainoastaan 24 tunnin maksimiarvo, koska murskaustoiminta tuotantoalueella on niin vähäistä vuositasolla tarkasteltuna, etteivät vuosikeskiarvolle asetetut raja-arvot pääse millään ylittymään. Kuitenkin tilanteen vaatiessa myös hiukkasten leviämisen mallintaminen vuositasolla tarkasteltuna on mahdollista.

Kuten tämän työn testimallinuksista voidaan huomata, kivenmurskauksesta aiheutuvan pölyn leviäminen ottoalueen ulkopuolelle on verrattain pientä. Tämä johtuu siitä, että murskauksessa syntyy pääasiassa vain karkeita hiukkasia, jotka laskeutuvat lähelle syntypaikkaansa. Pölyhiukkasten aiheuttamaa haittaa ottoalueen ympäristössä arvioitaessa jäävät haitat selvästi pienemmiksi kuin toiminnan aiheuttaman melun ja tärinän haittavaikutukset. Pölyhiukkasten haittavaikutukset aiheuttavat enemmän viihtyvyyshaittaa kuin suoranaista terveyshaittaa.

5.6 Mallinnustulosten luotettavuuden arviointi

Laajakummun mallinnuskohteen osalta ohjelma kykeni laskemaan mallin moitteettomasti eri tuulen nopeuksilla ottaen huomioon maanpinnan muotojen vaihtelut. Rukasmäen mallinnuskohteen kohdalla ohjelma ei kuitenkaan pystynyt laskemaan pölyhiukkaspitoisuuksia tuulen nopeuden ollessa yli 6 m/s . Tämä johtuu todennäköisesti maanpinnan muotojen suuremmasta vaihtelusta Laajakummun kohteeseen verrattuna. Lisäksi korkeuskäyrätiedosto oli Rukasmäen kohdalla raskaampi korkeuskäyrien suuremmasta piirtotiheydestä johtuen.

Koska päästökertoimien määrittäminen pelkästään kivenmurskaukselle on hyvin vaikeaa, johtuen alueella tapahtuvasta muusta toiminnasta, ei työssä käytettyihin päästökertoimiin (Taulukko 5) voitaisiin luottaa vaan ne ovat enemmän suuntaa-antavia arvioita. Jotta Cadna A-APL -ohjelmalla luotujen hiukkaspäästömallien luotettavuutta voitaisiin arvioida paremmin, olisi hyvä tehdä hiukkaspäästömittauksia kyseisissä kohteissa ja verrata tuloksia mallien tuottamiin hiukkaspitoisuusarvoihin.

Tuotetut mallit näyttävät vastaavan ennakkokäsitysten mukaisia tilanteita. Hiukkaspitoisuudet ottoalueen ympäristössä jäävät oletusten mukaisesti pieniksi, johtuen päästöjen pienistä määristä. Lisäksi maanpinnan muodot estävät oletetusti ja tehokkaasti pölyhiukkasten leviämisen tietyille alueille. Ohjelmalla tuotettujen mallien luotettavuutta arvioitaessa on käytettävä maalaisjärkeä, koska pieni virhe laskenta-asetuksissa tai lähtöaineistoissa voi aiheuttaa suuren virheen lopullisissa tuloksissa.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää ja tutkia soveltuuko tilaajan käyttämän Cadna A - melumallinnusohjelman ilmanpäästölisäosa (Cadna A-APL) maa-ainesten ottoalueilla tapahtuvan kivenmurskauksen pölypäästöjen mallintamiseen. Ohjelman testauksen pohjalta oli tarkoitus myös laatia suomenkieliset käyttö- ja raportointiohjeet tilaajan käyttöön pölyn leviämismallinnusta varten. Käyttöohjeiden tuli olla selkeästi ymmärrettävät, joten ne tehtiin yirtyksellä jo käytössä olevan melumallinnuskäyttö- ja raportointiohjeen pohjalle. Ohjeiden valmistumisen jälkeen ne testattiin yrityksen työntekijän toimesta. Testauksen ja virheiden korjauksen jälkeen ohjeet voitiin todeta selkeiksi ja toimiviksi.

Mallinnustuloksien perusteella voidaan todeta, että Cadna A-APL:ää voidaan käyttää kivenmurskauksessa syntyvien pölypäästöjen leviämisen mallintamiseen. Mallin laskentaa varten saadaan luotua halutunlaiset tuuliolosuhteet ja ohjelma ottaa huomioon myös maanpinnan muodot, jotka ovat olennaisessa osassa pölyn leviämisen kannalta. Pölyn leviämismallien tuottaminen Cadna A-APL:llä on helppoa ja yksinkertaista, kun käytössä on valmis melumalli kohteesta. Tällöin ei tarvitse luoda uusia lähtöaineistoja alusta alkaen, mikä nopeuttaa pölyn leviämismallin luontia. Tämä on myös käytännöllinen menettelytapa, koska maa-ainestuotantoalueiden ympäristövaikutusten arvioinnissa mallinnetaan joka tapauksessa ensin toiminnan aiheuttamat melupäästöt.

Mallilaskelmien luotettavuutta ei voida todeta suoralta kädeltä, vaan sitä varten täytyisi vielä tehdä hiukkaspäästömittauksia mallinnetuissa kohteissa, jolloin tuloksia vertailemalla voitaisiin todeta onko mallinnustulokset luotettavia. Tuotettuja malleja voidaan kuitenkin käyttää ympäristövaikutusten arvioinnin tukena, koska tulokset näyttävät puoltavan kirjallisuusselvityksen mukaista käsitystä, jonka perusteella kivenmurskaustoiminnassa syntyy pääasiassa karkeita pölyhiukkasia, jotka laskeutuvat lähelle syntypaikkaansa. Tämän perusteella voidaan myös todeta, että maa-ainesten ottoalueilla tapahtuva kivenmurskaus ei aiheuta terveyshaittaa alueen ympäristössä. Toiminnan aiheuttamat pölyhiukkaspäästöt voivat aiheuttaa enemmänkin viihtyvyyshaittaa, jonka haitallisuutta on vaikea arvioida, koska jokainen ihminen kokee viihtyvyyshaitan eri tavalla.

Tässä työssä ei otettu huomioon muita päästölähteitä, vaan keskityttiin ainoastaan kivenmurskauksen aiheuttamiin pölypäästöihin. Testimallinnusten perusteella ohjelmalla on kuitenkin potentiaalia myös muun toiminnan pölypäästöjen mallintamiseen. Murskauksen jälkeen seuraavaksi suurin pölypäästölähde maa-ainesten ottoalueella on työmaaliikenne. Koska Cadna A-APL on suunniteltu myös liikenteen hiukkaspäästöjen mallintamiseen, voisi seuraavaksi tutkia sen soveltuvuutta ottoalueiden työmaaliikenteen pölypäästöjen mallinnukseen. Myös muiden päästölähteiden lisääminen mallilaskelmiin on yksinkertaista.

Epävarmuutta laskelmissa aiheuttavat lähtötietojen tarkkuus ja ajantasaisuus. Varsinkin päästöker toimien arvioiminen kivenmurskauksen aiheuttamille päästöille on hyvin vaikeaa, koska maa-ainesten ottoalueilla on myös muuta toimintaa kuten räjäytyksiä, porausta sekä työmaaliikennettä. Kivenmurskauksen aiheuttamia pölypäästöjä on tutkittu hyvin vähän, joten luotettavien päästöker-

toimien löytäminen tämän työn toteuttamista varten osoittautui haastavaksi. Päästökertoimia löytyi pääasiassa vain malmikivenmurskaukselle, mutta tervekivenmurskauksen toiminnan luonteen erilaisuuden takia, eivät ne tuntuneet soveltuvat tämän työn tarkoituksiin. Lopulta päädyttiin käyttämään U.S.EPA:n tarvekivenmurskaukselle määrittämiä päästökertoimia, jotka osoittautuivat parhaiksi arvioiksi mitä tällä hetkellä on tarjolla.

Mielestäni tämä opinnäytetyö onnistui hyvin, koska tilaajan asetettamat tavoitteet saavutettiin. Työ oli haastava, koska aikaisempaa kokemusta kivenmurskaustoiminnasta tai hiukkaspäästöjen mallintamisesta ei ollut. Kuitenkin perusteellisen kirjallisuusselvityksen pohjalta sain hyvät lähtökohdat työn toteuttamiseksi. Tarpeeksi luotettavien päästökertoimien löytyminen oli avainasemassa tämän työn toteutumisen kannalta.

Suurimmaksi haasteeksi lopulta osoittautui selvittää Cadna A-APL:n soveltuvuus tämän työn tarkoituksiin. Soveltuvuutta ei voitu suoraan todeta löytyvän tiedon perusteella, vaan ohjelmaa oli päästävä itse testaamaan. Ohjelman käytön opetteleminen vei oman aikansa, koska aikaisempaa kokemusta samantyyppisen ohjelman käytöstä ei juuri ollut. Lopulta ohjelman käytön sisäistämisen jälkeen, testausjakson aikana saatiin tuotettua asianmukaiset mallit valituista testikohteista. Testausjakson aikana myös laadittiin ja todettiin toimiviksi tilaajan haluamat suomenkieliset käyttö- ja raportointiohjeet kuten oli suunniteltu.

LÄHTEET

ALAVIIPPOLA, Birgitta ja PIETARILA, Harri. 2011. Ilmanlaadun arviointi Suomessa. Ilmatieteen laitos. [Viitattu 2014-4-23] Saatavissa: http://www.ilmanlaatu.fi/ilmansaasteet/julkaisu/pdf/pienhiukkasten_alustava_arviointi_2011_2.pdf

DATAKUSTIK. 2010. Cadna A Manual for Option APL - Calculation of Air Pollution.

EIONET. 2009. European Environment Agency. European Topic Centre on Air and Climate Change. Long description of model 'AUSTAL2000'. [Viitattu 2014-2-17]. Saatavissa: <http://pandora.meng.auth.gr/mds/showlong.php?id=132>

HIUKKASTIETO. Helsingin yliopisto 2008-2014. [Viitattu 2014-3-28]. Saatavissa: <http://www.hiukkastieto.fi/>

HUTTUNEN, Leena. 2006. Suomen ympäristökeskus. Ympäristö-lehti 3/2006. [Viitattu 2014-03-18]. Saatavissa: <http://archive.is/r8Gb>

KORHONEN, Kimmo. 2012. Planetaarisen rajakerroksen korkeuden määrittäminen: eri menetelmien vertailu ja arviointi. ITA-SUOMEN YLIOPISTO. http://epublications.uef.fi/pub/urn_nbn_fi_uef-20121018/urn_nbn_fi_uef-20121018.pdf

KUOPIO KAUPUNKI. 2013. Ympäristö- ja rakennuslautakunta. Ote: Päätös ympäristölupahakemuksesta / Savon Kuljetus Oy, kivenlouhimo ja -murskaamo, Karttulan kylä, tila Rukasmäki (Rn:o 1:46), Lamperilantie 281.

LAKI YMPÄRISTÖVAIKUTUSTEN ARVIOINTIMENETTELYSTÄ 1994/468, [verkkoaineisto]. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1994/19940468>

MAA-AINESLAKI 1981/555, [verkkoaineisto]. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1981/19810555>

OPASNET. MediaWiki 2014. Metallimalmin murskausprosessin pölypäästöt. [Viitattu 2014-2-20]. Saatavissa: [http://fi.opasnet.org/fi/Metallimalmin_murskausprosessin_p%C3%B6lyp%C3%A4st%C3%B6t](http://fi.opasnet.org/fi/Metallimalmin_murskausprosessin_p%C3%B6lyp%C3%A4st%C3%A4st%C3%B6t)

OPASNET. MediaWiki 2014. Tarvekiven murskauksen päästöt. [Viitattu 2014-02-21]. Saatavissa: http://fi.opasnet.org/fi/Tarvekiven_murskauksen_p%C3%A4st%C3%A4st%C3%B6t

PAIKKATIETOIKKUNA. Maanmittauslaitos. [Viitattu 2014-04-18]. Saatavissa: <http://www.paikkatietoikkuna.fi/web/fi/kartta>

PENNANEN, Arto ja SALONEN, Raimo O. 2006. Pienhiukkasten vaikutus terveyteen. Tekesin julkaisu. Saatavissa: http://www.tekes.fi/Julkaisut/fine_terveys.pdf

PIELAVEDEN KUNTA. 2009. Pielaveden ja Keiteleen ympäristölautakunta. 28 § Savon Kuljetus Oy:n kivenmurskaamotoiminnan ympäristölupa, Pielavesi. Pöytäkirjanote 24.3.2009

RICHARDS, John. Background Information for Revised AP-42 Section 11.19.2. Crushed Stone Processing and Pulverized Mineral Processing. [Viitattu 2014-02-14] Saatavissa: <http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch11/bgdocs/b11s1902.pdf>

SUOMEN TUULIATLAS. 2008. Työ- ja elinkeinoministeriö. [Viitattu 2014-2-20]. Saatavissa: http://www.tuuliatlas.fi/tuulisuus/tuulisuus_5.html#

TIRKKONEN, Anna-Maria. 2013. Cadna A -melumallinnusohjelman käyttö maa-ainesten ottoalueiden malumallinnuksessa. Savonia-ammattikorkeakoulu. Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/58896/Tirkkonen_Anna-Maria.pdf?sequence=1

TOIVONEN, Matti. 2010. Kiviainestuotannon pölypäästöt. Diplomityö. Tampereen teknillinen YO. Saatavissa: http://www.infrary.fi/files/3237_Matti_Toivonen.pdf

U. S. EPA: AP 42, Fifth Edition, Volume I Chapter 11: Mineral Products Industry 11.19.2-1[Viitattu 2014-02-13] Saatavissa: <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch11/final/c11s1902.pdf>

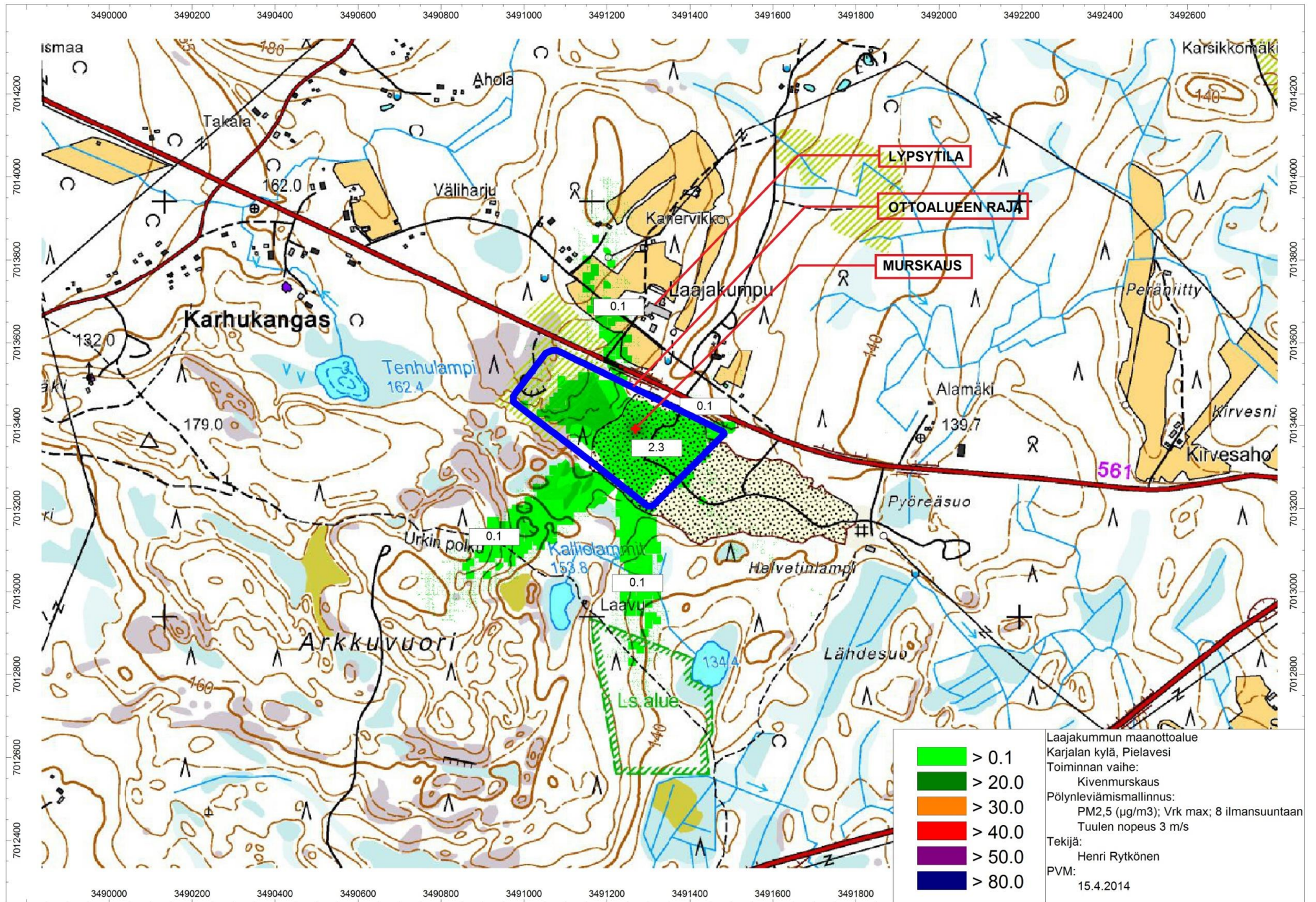
VALTIONEUVOSTON ASETUS ILMANLAADUSTA 2011/38, [verkkoaineisto]. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/data/sdliite/liite/5916.pdf>

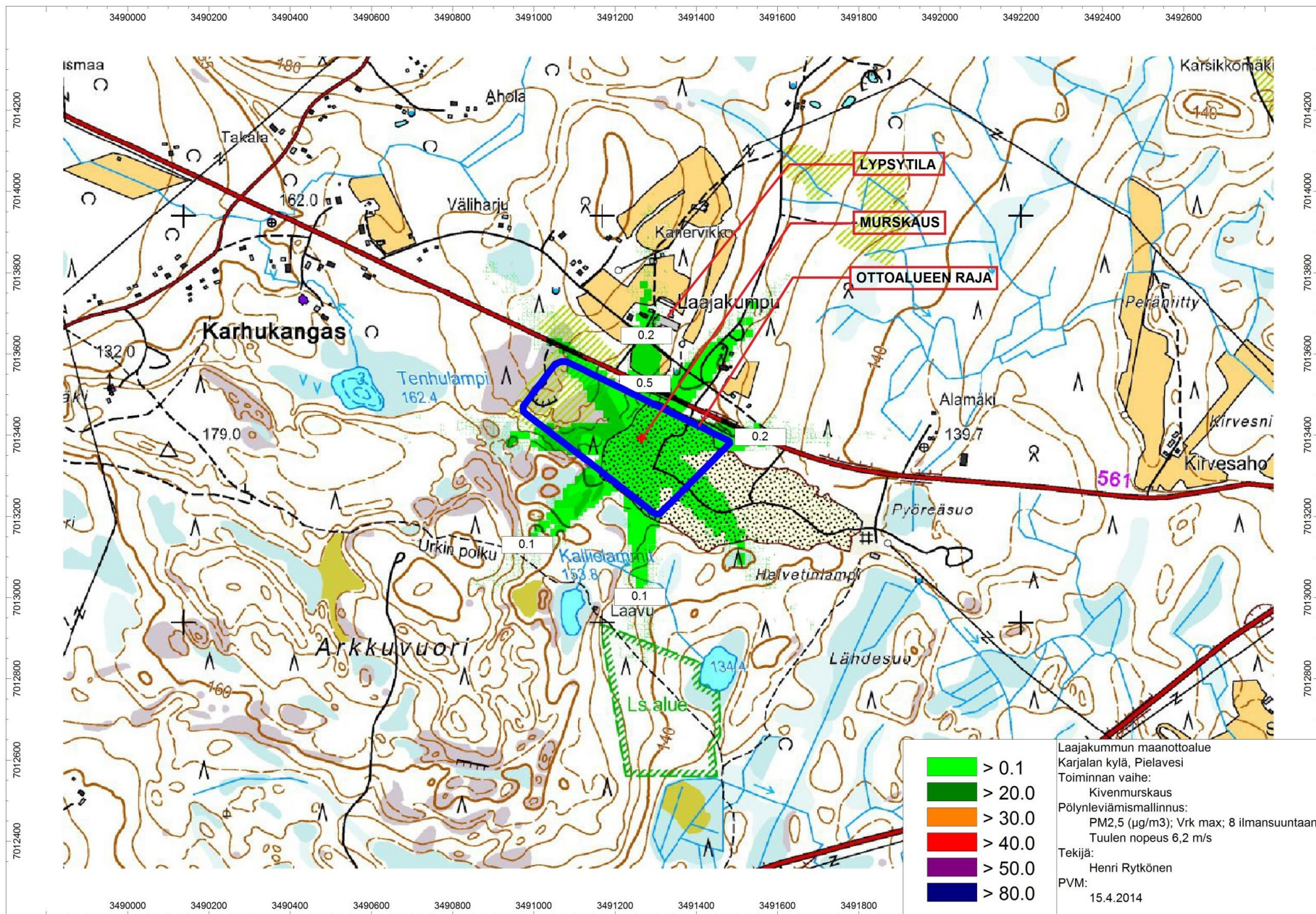
VALTIONEUVOSTON ASETUS KIVENLOUHIMOJEN, MUUN KIVENLOUHINNAN JA KIVENMURSKAAMOJEN YMPÄRISTÖNSUOJELUSTA 2010/800, [verkkoaineisto]. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2010/20100800>

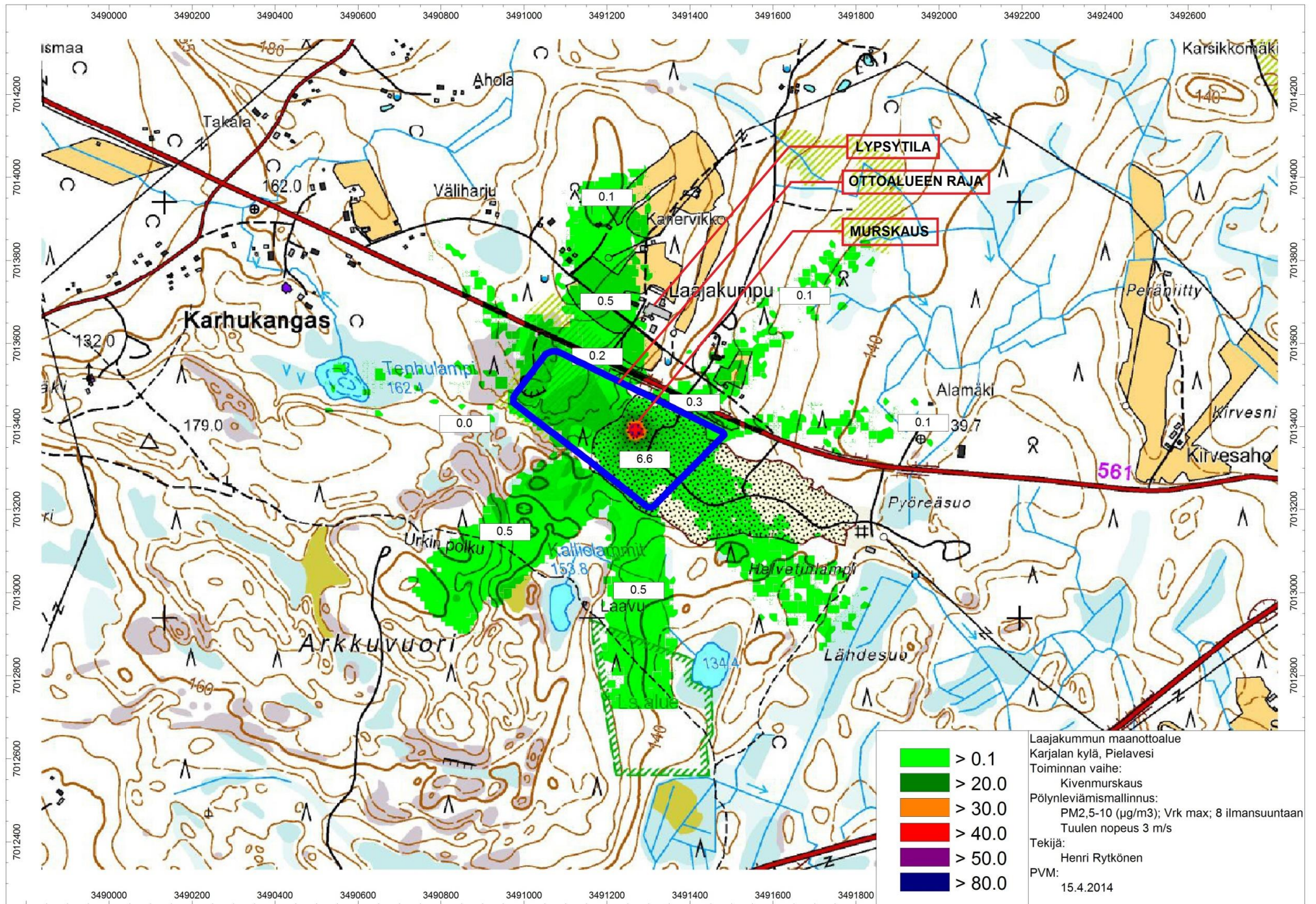
VALTIONEUVOSTON ASETUS MAA-AINESTEN OTTAMISESTA 2005/926, [verkkoaineisto]. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2005/20050926>

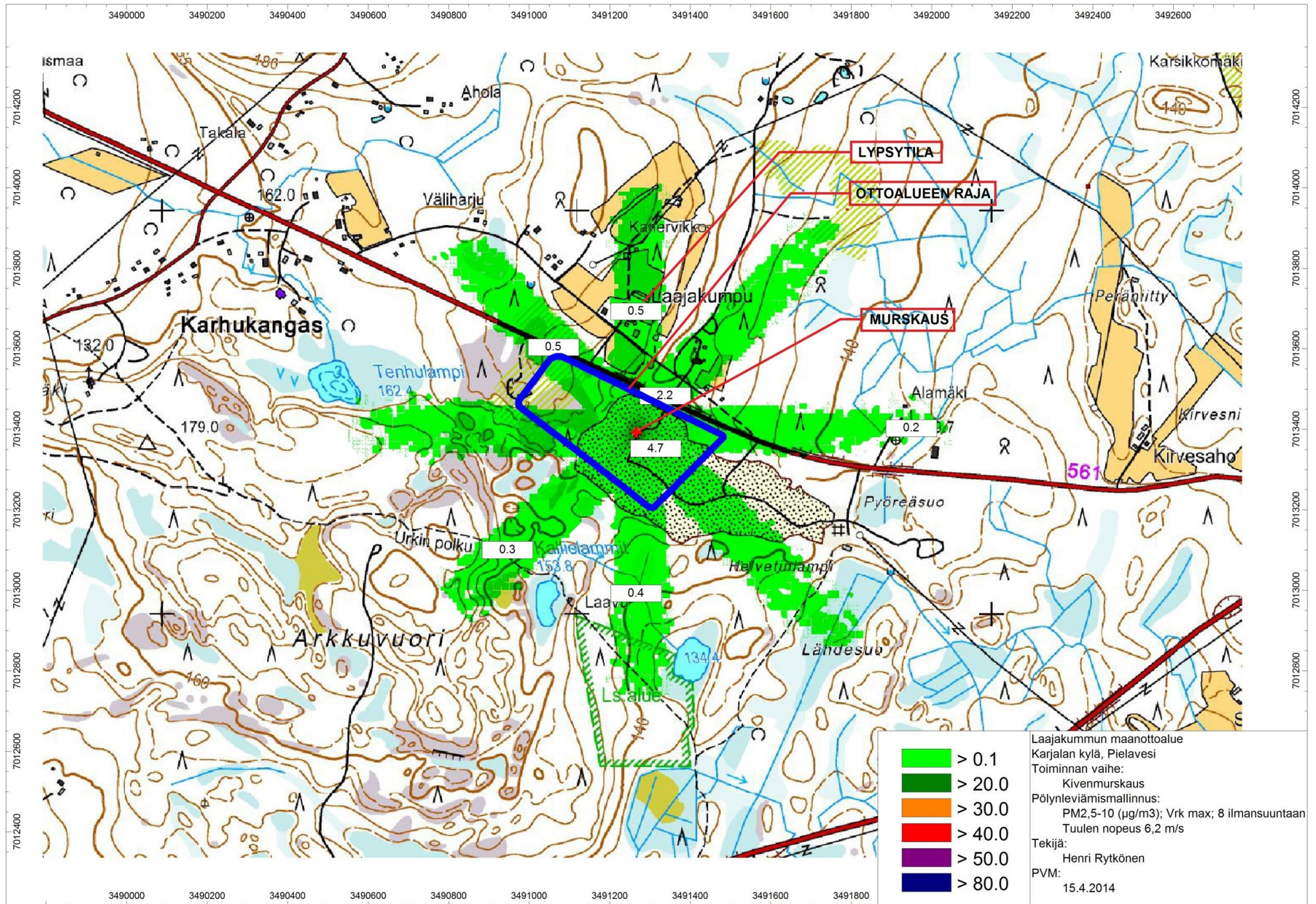
VALTIONEUVOSTON ASETUS YMPÄRISTÖVAIKUTUSTEN ARVIOINTIMENETTELYSTÄ 2006/713, [verkkoaineisto]. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2006/20060713>

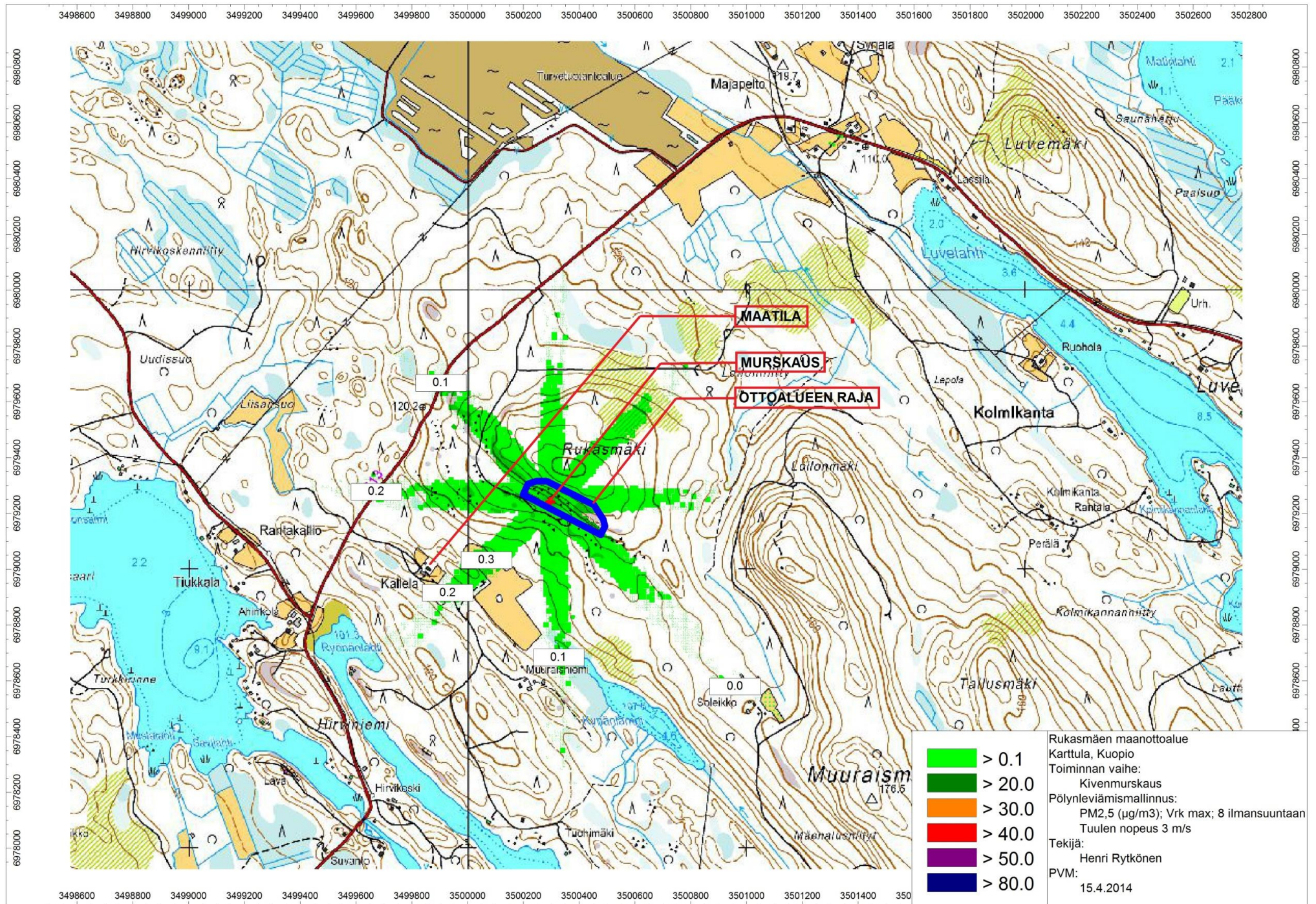
YMPÄRISTÖNSUOJELULAKI 2000/86, [verkkoaineisto]. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2000/20000086>

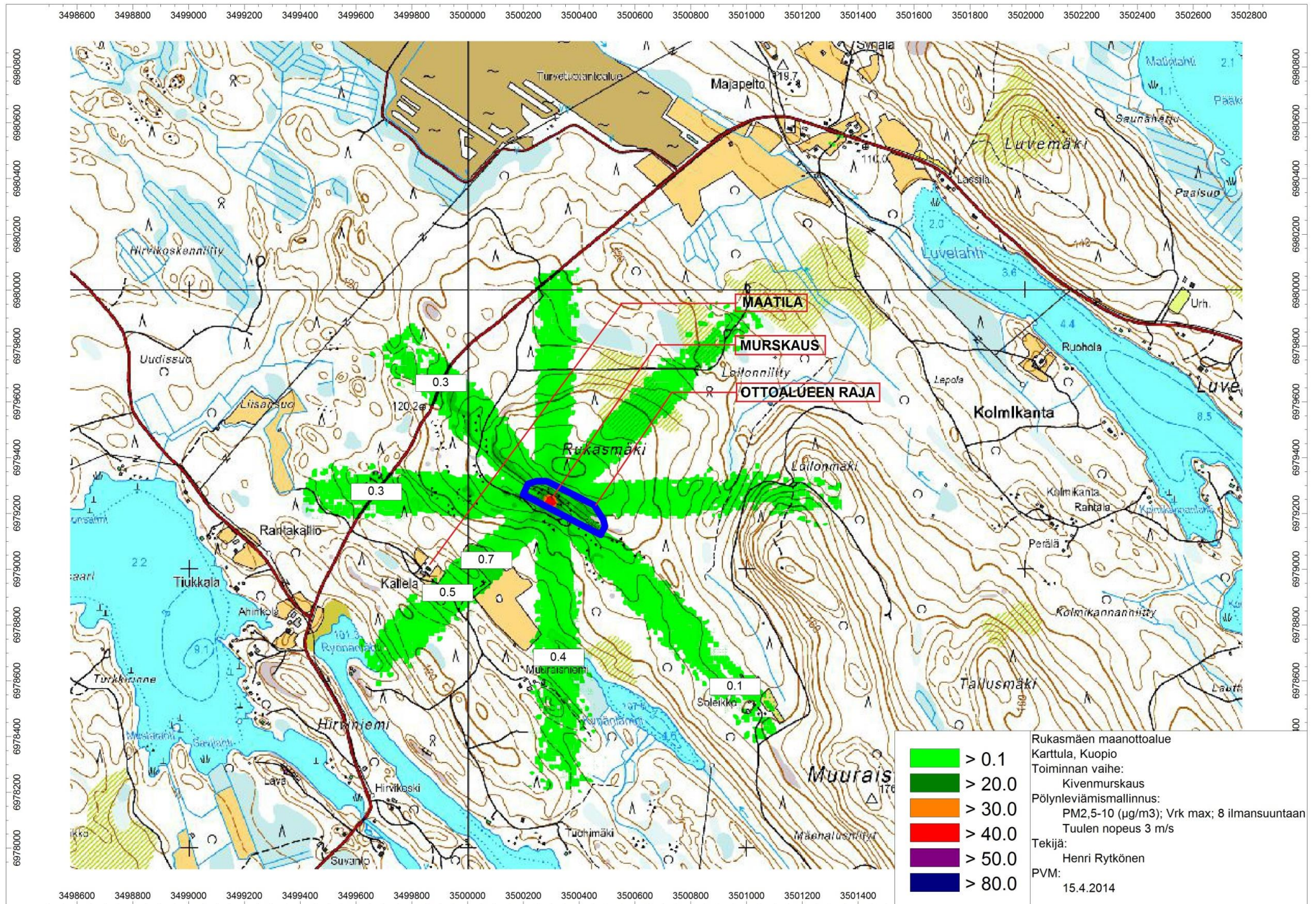


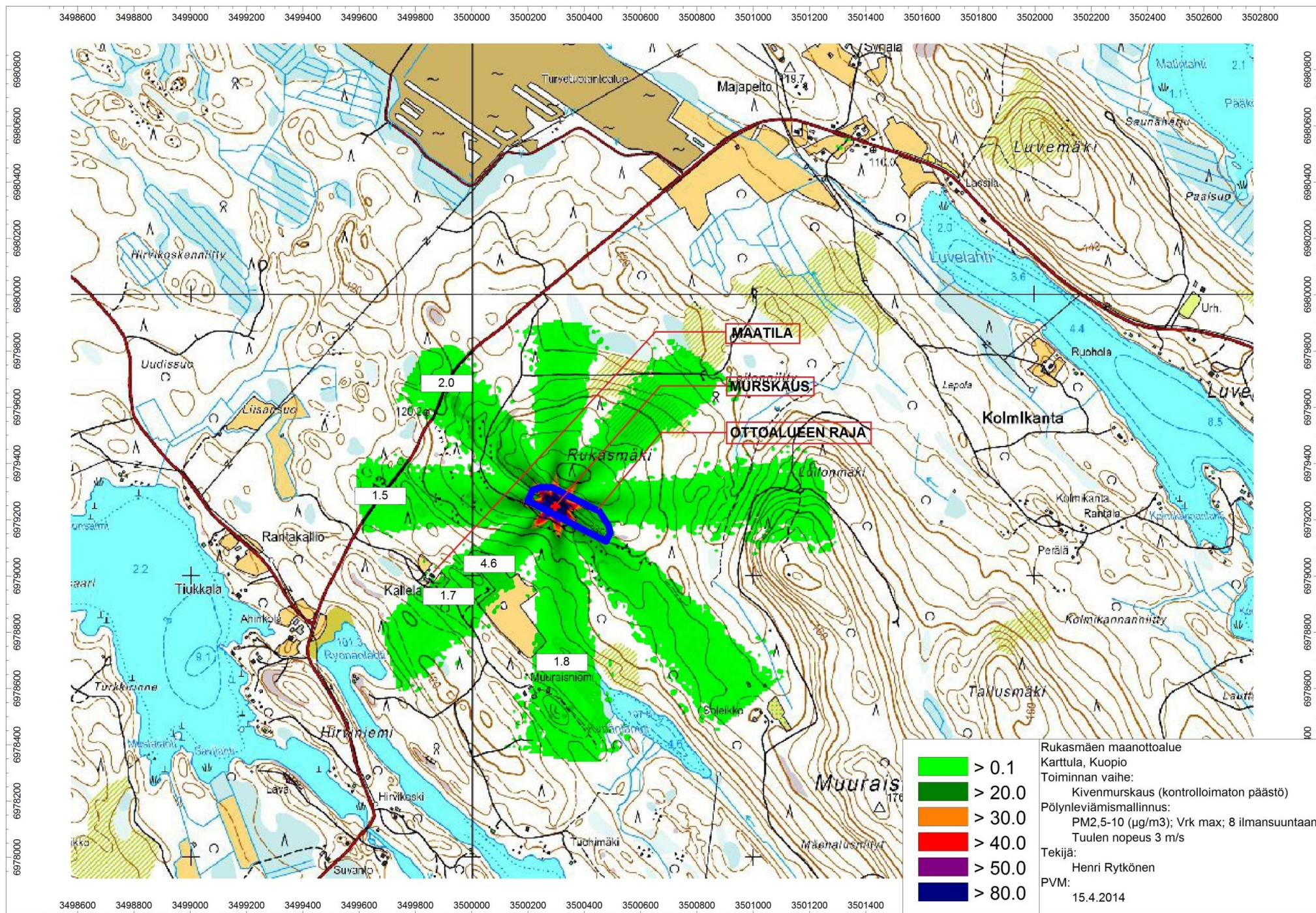














TYÖOHJE nro X.X.X	Versio 1.0	Sivu 1/18
Hyväksyjä: Anna-Maria Tirkkonen	versio	
Päivittäjä: Henri Rytönen	18.5.2014	

Pölymallinnus

Tavoite	Pölymallinnuksen tekeminen kivenmurskauksesta aiheutuvan pölyn ja pölyntorjunnan tarpeen selvittämiseksi
Vastuu	Työohjeen mukainen toiminta on kulloinkin työtä suorittavan henkilön vastuulla. Työohjeen päivityksestä vastaa ympäristöinsinööri.

Sisällys

1	Tarvittava lähtöaineisto.....	3
2	Korkeuskäyrästäön muokkaus (AutoCAD).....	3
3	Tuulitiedoston luonti.....	3
4	CADNA A (Air Pollution).....	5
4.1	Oman väripaletin luonti.....	5
4.2	Tarvittavien väripalettitietojen hakeminen.....	7
4.3	Laskennan asetukset.....	7
4.4	Objektien piirtoasetukset.....	9
4.5	Tasojen piirtoasetukset.....	10
4.6	Verkon laskenta- ja piirtoasetukset.....	10
4.7	Tiedostojen tuonti (kuten melumallissa).....	11
4.7.1	Peruskarttarasteri.....	11
4.7.2	Korkeuskäyrästäön tuonti.....	12
4.7.3	Ottoalueen rajan tuonti.....	12
4.8	Korkeuskäyrien hajotus.....	12
4.9	Päästölähteiden lisäys (pistemäinen pölypäästölähde).....	13
4.10	Pölynleviämisen laskenta.....	14
4.11	Hiukkaspitoisuusarvojen lisääminen.....	14
4.12	Tulostus (kuten melumallissa).....	14
4.12.1	Tulostuspohjan luonti.....	14
4.12.2	Valmiin tulostuspohjan käyttö.....	15
5	Viimeistely PDF-tiedostona.....	15
6	Raportointi.....	16
1.	Työn tausta ja selvityskohde.....	16
1.1.	Johdanto.....	16
1.2.	Kohteen ja toiminnan kuvaus.....	16



TYÖOHJE nro X.X.X	Versio 1.0	Sivu 2/18
Hyväksyjä: Anna-Maria Tirkkonen	versio	
Päivittäjä: Henri Rytönen	18.5.2014	

2. Menetelmät ja lähtötiedot	16
2.1. Ohjearvot.....	16
2.2. Laskentamenetelmät ja käytetty ohjelmisto	16
2.3. Lähtötiedot.....	16
3. Tulokset.....	17
3.1. Mallinnetut tilanteet.....	17
3.2. Mallinnustulokset.....	17
4. Yhteenveto.....	17
5. Päiväys ja allekirjoitus	17
6. LIITTEET.....	17