

Hihnakuuljettimen pudotuskohdan pölyn leviämisen mallinnus

Kirjoittajat: Eero Kokkonen

Luottamuksellisuus: Julkinen

Julkaistu Työsuojelurahaston tuella

Raportin nimi Hihnakuljettimen pudotuskohdan pölyn leviämisen mallinnus		
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot Metso Minerals Juhamatti Heikkilä Lokomonkatu 3 33101 Tampere		Asiakkaan viite
Projektin nimi Kiviaineksen murskauslaitteiston pölynhallinnan parantaminen		Projektin numero/lyhytnimi 75413
Tiivistelmä <p>Mallinnuksen tavoitteena oli tutkia virtauslaskennan (CFD) käytettävyyttä hihnakuljettimen pölyämisen ennustamisessa mallintamalla kahden hihnakuljettimen välisen pudotuskohdan pölynmuodostus kivimurskan pudotessa kuljettimelta toiselle. Kiven liikkeestä indusoituva ilmavirta mallinnettiin lisäämällä liikemäärän säilymsyhtälöön lähdetermi rajattuihin alueisiin. Mallinnettavia geometrioita oli yhteensä viisi, jotka mallinnettiin 5 m/s sivutuudessa ja lisäksi kaksi tapausta ilman tuulta.</p> <p>Lähdetermin lisäys valituissa alueissa tuotti halutunlaisen profiilin keskimääräiseen nopeuskenttään ja profiili arvioidaan realistiseksi. Referenssisysteemin pölyn leviämistä verrattiin erilaisin kattein päällystettyyn systeemiin. Kuljettimien kattaminen tuotti odotetun rajaavan ja voimistavan vaikutuksen nopeuskenttään. Pöly leviää katteista huolimatta pudotuskohdan ja katteen alkamisen välisestä kattamattomasta alueesta. Katteiden ja pudotuskohdan huputuksen olisi estettävä ilmavirtauksen tunkeutuminen pudotuskohtaan pölyämisen hallitsemiseksi.</p> <p>Referenssimittauksia ei mallinnuksen verifioimiseksi tehty, mutta kokemukseräisten havaintojen mukaan ja virtauslaskennan yleisen luotettavuuden perusteella voidaan saatuja tuloksia pitää uskottavina ja menetelmää soveltuvana käytettäväksi tuotekehitystoiminnassa.</p> <p>Hanke on toteutettu Työsuojelurahaston tuella.</p>		
Tampere 9.3.2012 Laati	Tarkastaja	Hyväksyjä
Eero Kokkonen, Tutkija	Aimo Taipale, Erikoistutkija, Tiimipäällikkö	Johannes Hyrynen, Johtava tutkija, Teknologiapäällikkö
VTT, Tekniikankatu 1, 33101, Tampere		
Jakelu Metso Minerals: Juhamatti Heikkilä 1 kpl, VTT 1 kpl		
<p style="text-align: center;"><i>VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.</i></p>		

Sisällysluettelo

1 Toimeksiannon tavoitteet	<u>3</u>
2 Menetelmät ja toteutus	<u>3</u>
3 Mallinnettavat geometriat.....	<u>4</u>
4 Tulokset ja tulosten tarkastelu	<u>5</u>
5 Johtopäätökset.....	<u>8</u>

1 Toimeksiannon tavoitteet

Mallinnuksen tavoitteena oli tutkia virtauslaskennan (CFD) käytettävyyttä hihnakuljettimen pölyämisen mallinnuksessa ja menetelmän soveltuvuutta arvioitaessa eri pölynhallintakeinojen hyödyllisyyksiä. Mallinnettavan tilanteen haastavaksi teki hihnakuljettimien liike ja erikokoisista sekä –muotoisista kivistä muodostuva liikkuva kivimurska.

2 Menetelmät ja toteutus

Mallinnuksessa käytettiin virtauslaskentaa (computational fluid dynamics, CFD), jossa numeerisilla menetelmillä ratkaistaan yleisessä tapauksessa massan, liikemäärän ja energian säilymisytälöt. Tässä tapauksessa energiayhtälöä ei ratkaistu, koska lämpötilan vaikutusta ei otettu huomioon. Virtauslaskenta suoritettiin RANS (Reynolds averaged Navier—Stokes) formulointia käyttäen. Turbulenssimallina käytettiin SST $k - \omega$ -mallia. Laskentakoppien lukumäärä oli tapauksesta riippuen suuruusluokkaa 5—10 miljoonaa laskentakoppia ja laskenta suoritettiin käyttämällä tarkkuudeltaan toisen kertaluvun numeerisia malleja. Pölyn leviäminen mallinnettiin käyttäen yksisuuntaista kytKentää, jossa ilman liike vaikuttaa pölyn leviämiseen, mutta pölyn määrä ei vaikuta ilman liikkeisiin. Mallinnus toteutettiin yhteensä viidelle eri geometrialle, joista kaikki mallinnettiin ajasta riippumattomana ja lisäksi kolme tapausta ratkaistiin pölyn leviämisen suhteen ajasta riippuvana monipuolisemman visualisoinnin saavuttamiseksi. Ajasta riippuvat tapaukset on dokumentoitu erillisinä avi-tiedostoina. Kaikki viisi geometriaa mallinnetaan 5 m/s sivutuulella ja lisäksi kaksi tapausta ilman tuulta. Virtauslaskenta suoritettiin käyttämällä OpenFOAM-ohjelmistoa, joka on avoimen lähdekoodin virtauslaskentaohjelma. Hihnakuljettimen geometria saatiin Metso Mineralsilta, ja mallinnettavat tapaukset ja geometrian muokkaukset tehtiin yhteistyössä Metso Mineralsin kanssa.

Virtauslaskennan soveltuvuutta tähän ongelmaan tutkittiin mallintamalla kahden hihnakuljettimen välisen pudotuskohdan pölynmuodostus kivimurskan pudotessa kuljettimelta toiselle. Liikkuvaa kuljettimen hihnaa tai liikkuvaa kiviainesta ei mallissa otettu eksplisiittisesti huomioon, vaan niiden keskimääräinen vaikutus ilman liikkeisiin pyrittiin mallintamaan. Tarkka mallinnus kasvattaisi laskentasysteemin koko kohtuuttoman suureksi ja saatu tulos olisi tarkka vain valitulle kivimurskan koolle, joka todellisuudessa vaihtelee. Lisäksi todettakoon, että keskimääräiset suureet ovat monesti tärkeimmät suureet.

Massan säilymisytälö voidaan kirjoittaa

$$\Leftrightarrow \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (2.1)$$

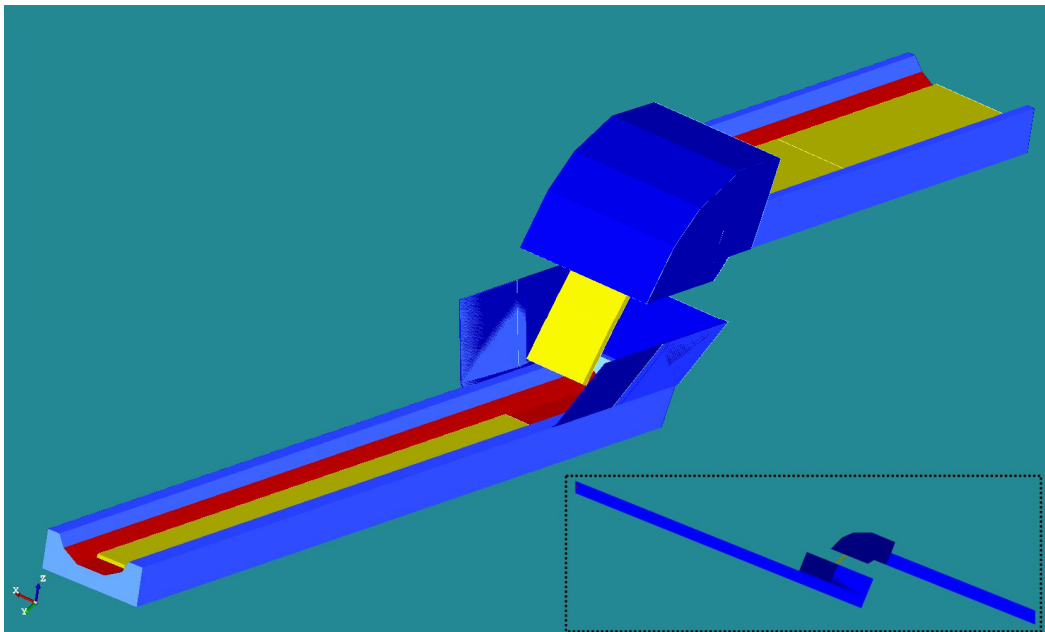
ja liikemäärän säilymlaki puolestaan voidaan kirjoittaa

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = \rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = \rho \mathbf{f} + \nabla \cdot \bar{\boldsymbol{\sigma}} \quad (2.2)$$

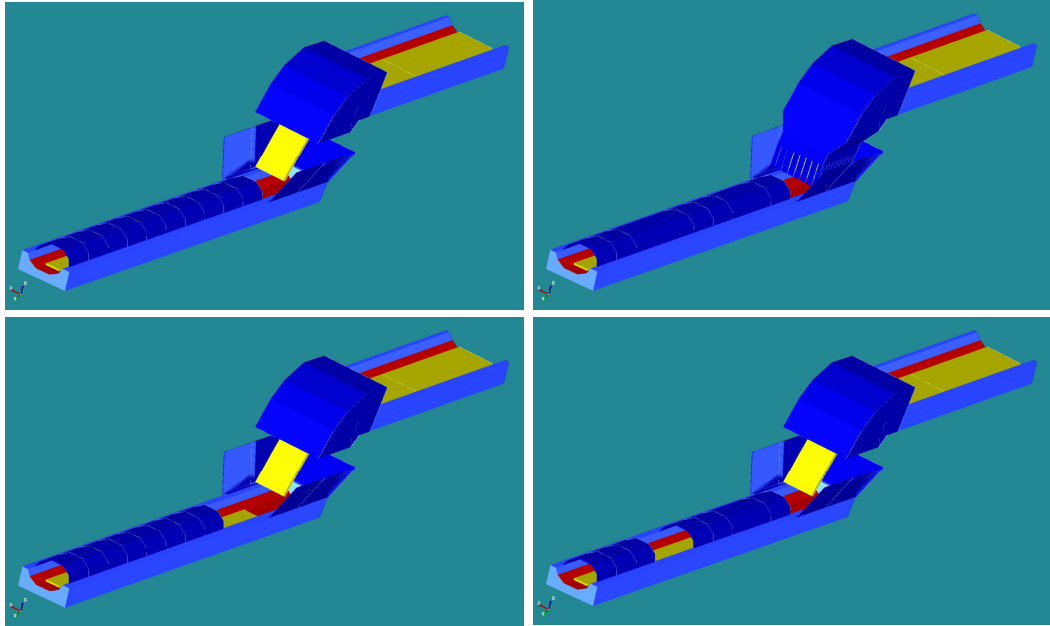
missä ρ on tiheys, \mathbf{u} on nopeus, t on aika, \mathbf{f} on tilavuusalkioon vaikuttava pintavoima ja $\bar{\boldsymbol{\sigma}}$ on jännitystensori. Mallissa kiven liikkeestä indusoituva ilman liike mallinnettiin lisäämällä kuljettimen ja pudotuskohdan alueilla ratkaistavaan liikemäärän säilymisytälöön sopivan suuruinen lähde-termi. Laskennassa nopeudelle käytettiin nolla-reunaehtoa kaikkialla, mutta iteroitaessa ratkaistavia yhtälöitä nopeuden arvo halutuissa alueissa kasvaa liikemääräyhtälön lähde-termin vaikutuksesta.

3 Mallinnettavat geometriat

Mallinnettavia geometrioita oli yhteensä viisi; referenssisysteemi, kuljettimien osalta kokonaan katettu systeemi, kaksi systeemiä, joissa kaksi katetta oli poistettu erikohdista ja kuljettimien osalta kokonaan katettu systeemi, jossa lisäksi pudotuskohta oli huputettu. Referenssinä toimiva geometria näkyy kuvassa 1. Referenssitapauksen lisäksi mallinnettavien tapauksien geometriat näkyvät kuvassa 2. Hihnakuuljettimen liikkuva osa otettiin mallissa huomioon liikkuvana pintana, jonka nopeudeksi asetettiin 2 m/s. Putoavan kiven lisäksi mallinnettiin myös hihnalla liikkuvan kiven indusoima ilmavirta liikemääräyhtälön lähde-termin avulla.



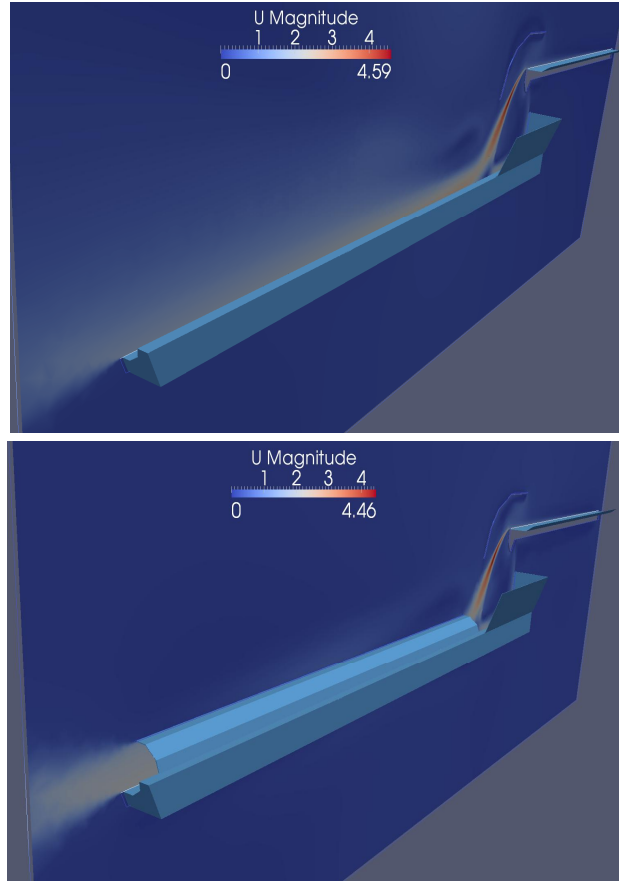
Kuva 1. Referenssinä toimiva hihnakuuljetin. Sininen väri kuvaa liikkumatonta pintaa, punainen liikkuvaa pintaa ja keltainen aluetta, joissa liikemääräyhtälössä lähde-termi poikkeaa nolasta. Oikeassa alareunassa havainnollistaa kuljetinta todellisessa koordinaatistossa.



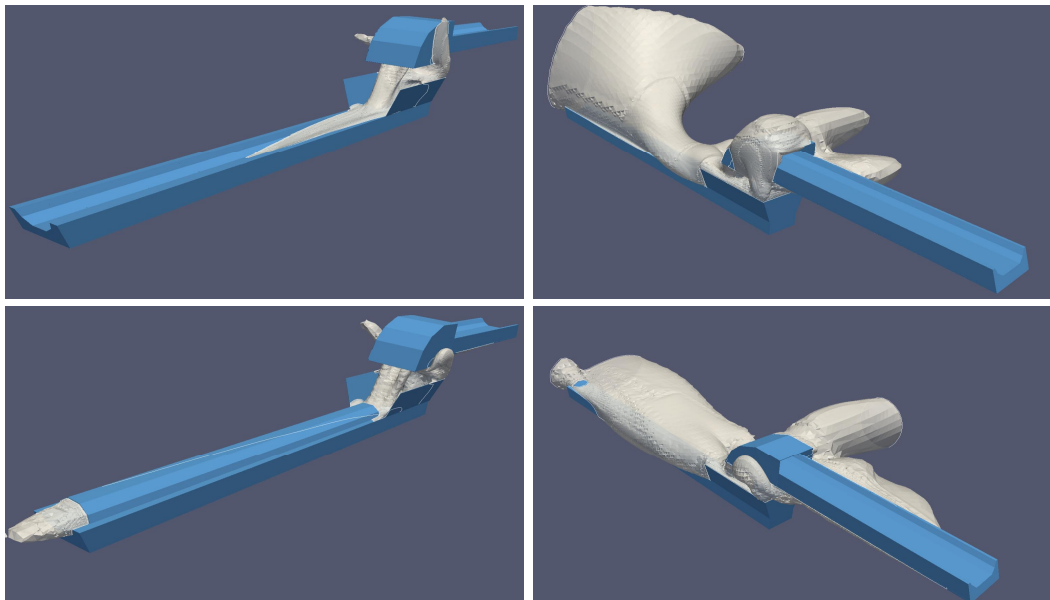
Kuva 2. Referenssisysteemin lisäksi mallinnetut geometriat. Ylhäällä vasemmalla kuljettimien suhteen kokonaan katettu systeemi, ylhäällä oikealla kuljettimien suhteen kokonaan katettu systeemi, jossa pudotuskohta on huputettu, alhaalla vasemmalla kuljettimien suhteen katettu systeemi, josta kaksi ensimmäistä katetta on poistettu ja alhaalla oikealla kuljettimien suhteen katettu systeemi, josta kuudes ja seitsemäs kate on poistettu.

4 Tulokset ja tulosten tarkastelu

Liikemääräyhtälöön lisättävä lähdetermin tarkoitus oli mallintaa putoavan kivimurskan vaikutusta ympäröivään ilmaan. Nopeuden suuruuden ei oleteta kasvavan kiven putoamisen mukana, koska kiviaineksen muodostama suihku hajoaa pudotessa. Suihkun hajotessa ja putoavan kiven nopeuden kasvaessa ilman liike alkaa pyörteillä yhä enemmän, joka rikkoo alaspäin kasvavan nopeusprofiilin. Liikemääräyhtälön lähdetermin avulla saatiin nopeuskenttään kuljettimen ja kiven liikkeen seurauksena aiheutuvia muutoksia. Näitä on havainnollistettu kuvassa 3 poikkileikkauksen avulla referenssisysteemille ja kuljettimien osalta kokonaan katetulle systeemille. Kuvasta 3 käy myös ilmi katteen sekä rajaava että paikallisesti voimistava vaikutus nopeuskenttään. Kuvassa 4 on havainnollistettu kahden mielivaltaisesti valitun pölypitoisuuden tasa-arvopinnan avulla pölyn leviämistä referenssisysteemille ja kokonaan katetulle systeemille. Kuvasta 4 nähdään katteesta aiheutuva imuvaikutus pölypitoisuuteen kuljettimen suunnassa ja katteen voidaan todeta pienentävän pölynleviämistä. Pölyn leviämisen vähentämiseksi katteen vaikutus on kuitenkin pieni. Pöly leviää katteesta huolimatta pudotuskohdan ja katteen alkamisen välisestä kattamattomasta alueesta. Pölyn leviämistä 5 m/s sivutuulella on havainnollistettu kuvassa 5, josta nähdään sivutuulen hallitsevan pölynleviämistä ja katteen toivottu vaikutus pölyn leviämisen hallitsemisessä jää saavuttamatta. Pölyn leviämisen hallitsemiseksi olisi myös pudotuskohta katettava. Pudotuskohtaan lisätty huputus ei tuota sivutuulella toivottua pölyn leviämisen vähenemistä. Sivutuulen aiheuttama ilmavirta pääsee tunkeutumaan alakuljettimella olevan reunan ja huputuksen välistä pölyamisalueelle ja ilmatilavuuden pienentyessä alkaa pyörteillä ja aiheuttaa pölynleviämistä. Huputuksen tulisi ulottua kuljettimen reunan ulkopuolelle, jotta ilmavirta ei

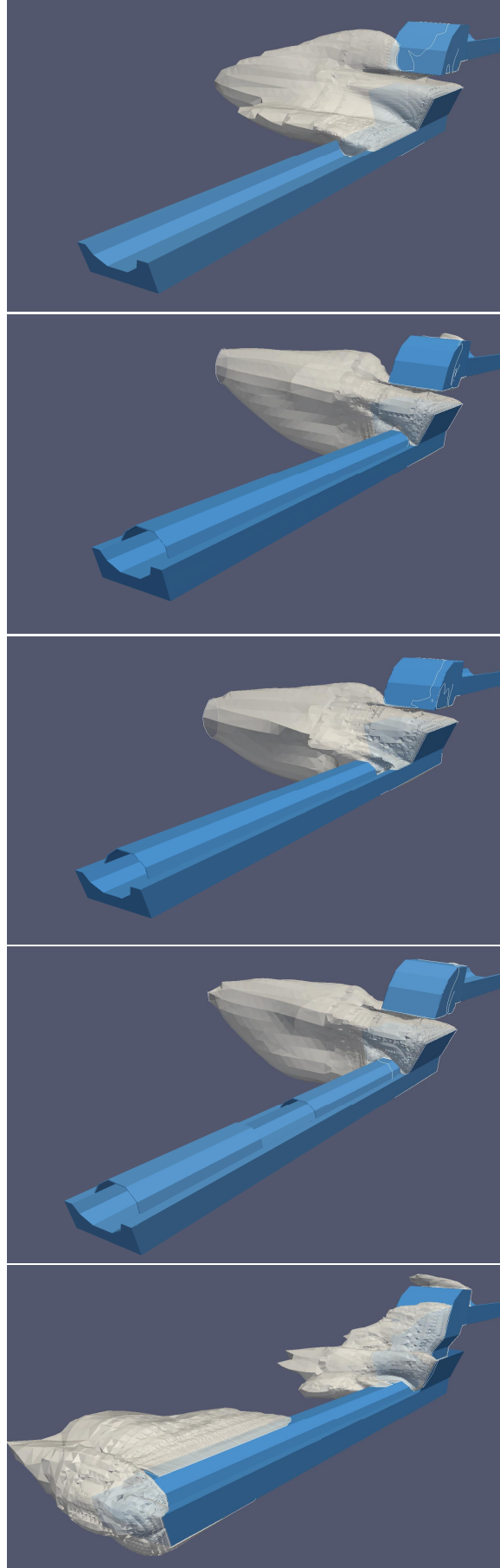


Kuva 3. Nopeuden suuruus poikkileikkaustasossa referenssisysteemille (vasemmalla) ja kuljettimien suhteen kokonaan katetulle systeemille (oikealla).



Kuva 4. Kahdella mielivaltaisella pölypitoisuuden tasa-arvopinnalla havainnollistettu pölynleviäminen referenssisysteemille (ylhäällä) ja kuljettimien suhteen kokonaan katetulle systeemille (alhaalla).

pääsisi tunkeutumaan pudotusalueelle. Huputus kuitenkin on tutkituista systeemeistä tehokkain pölyn leviämisen vähentämiseksi. Pölyn leviämistä voidaan tälle systeemille mahdollisesti edelleen tehostaa pölyntorjuntatoimenpiteitä alueelle, jossa kate loppuu.



Kuva 5. Mielivaltaisella pölypitoisuuden tasa-arvopinnalla havainnollistettu katteen vaikutus pölynleviämiseen 5 m/s sivutuulussa.

5 Johtopäätökset

Lähdetermin lisäys valituissa alueissa tuotti halutunlaisen profiilin keskimääräiseen nopeuskenttään ja profiili arvioidaan realistiseksi. Nopeuden maksimiarvoa pystyttiin säätämään muokkaamalla lähdetermin arvoa pudotusalueessa. Pudotuskorkeus kuljettimien välillä on suuruusluokaltaan kaksi

metriä, jolloin kaavojen $s = v_0t + \frac{1}{2}at^2$ ja $v = v_0t + at$ avulla saadaan putoavan

kiven nopeudeksi suuruusluokaltaan kuusi metriä sekunnissa alakuljettimen korkeudella. Saatu maksimiarvo pudotusalueessa (suuruusluokka 4,5 m/s) arvioidaan kuvaavan keskimääräistä nopeutta riittäväällä tarkkuudella. Kuljettimen hihnan liikkeen ja hihnalla liikkuvan erikokoisen kiviaineksen indusoima keskimääräinen ilman nopeus säädettiin suuruusluokaltaan lähdetermin arvoa muuttamalla hihnan todellista nopeutta (2 m/s) vastaavaksi. Mallinnusta voitaisiin tarkentaa säätämällä käytettyjä parametreja mittauksista saatavan informaation avulla. Indusoituva ilman liikenopeus riippuu liikkuvan kiviaineksen koosta, joten tarkemmat mallinnukset ja mittaukset olisi tehtävä usealle erikokoiselle kiviainekselle.

Kuljettimien kattaminen tuotti odotetun rajaavan ja voimistavan vaikutuksen nopeuskenttään, joka on havainnollistettu kuvassa 3. Nopeuskenttä ei kuitenkaan riittänyt pienentämään pölynleviämistä merkittävästi ja pudotuskohtaa on suojattava lisäkattauksin.

Kuvan 4 pölypitoisuuden epäsymmetrian arvellaan johtuvan siitä, että kuljettimen eivät ole täysin linjassa toistensa suhteen. Tällöin pieni epäsymmetria täysin tuulettomassa ympäristössä voisi aiheuttaa virtaukseen voimistuvan suuntauksen.

Referenssimittauksia ei mallinnuksen verifioimiseksi tehty, mutta kokemukseräisten havaintojen mukaan ja virtauslaskennan yleisen luotettavuuden perusteella voidaan saatuja tuloksia pitää uskottavina ja menetelmä soveltuu käytettäväksi tuotekehitystoiminnassa.