



JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO

Fysiikan laitos

Hiekan sedimentoituminen yksiulotteisessa suotometrissa

Pro Gradu-tutkielma

Mikko Tuomas Hasanen

Ohjaajat:
Markku Kataja
Juha Salmela

14. joulukuuta 2011

Alkusanat

Ensimmäisenä haluan kiittää työn ohjaajia Markku Katajaa ja Juha Salme-
laa. Suuret kiitokset myös Sanna Haavistolle tässä työssä käytetyn laitteiston
käytön opastuksesta.

Opiskelu-aika Jyväskylässä vuodesta 2004 on ollut pääsääntöisesti antoisaa
monien kurssien ja uusien asioiden ymmärtämisen kautta. Tästä kiitos kuu-
luu koko fysiikan laitoksen henkilökunnalle, varsinkin heille joiden kursseilla
ja demoissa olen saanut olla osallisena. Samana aikana olen tutustunut mo-
niin uusiin ihmisiin, joten suuri kiitos myös kavereille joita ilman aika olisi
käynyt sietämättömän pitkäksi.

Viimeisenä, mutta ei suinkaan vähäisimpänä; suuret kiitokset vanhemmille
ja sukulaisille mittaamattomasta tuesta opiskelu-aikaakin pidemmältä ajan-
jaksolta.

Sisältö

1	Johdanto	1
2	Sedimentaatio	2
2.1	Historiallista taustaa	2
2.2	Sedimentaation lajeista ja vaikutuksista	3
2.2.1	Teolliset sovellukset	3
2.2.2	Kiintoaineen kulkeutuminen luonnossa	4
3	Fysikaalista taustaa	8
3.1	Stokesin laki	8
3.2	Vastuskerroin C_D	10
4	Mittauslaitteisto	12
4.1	Suotautumiseen kehitetty laite	13
4.2	Sedimentaatioon modifioitu laite	14
4.3	DOP2000	15
4.3.1	Kohteen paikka	17
4.3.2	Kohteen nopeus	18
4.3.3	Rajoitukset	19
4.3.4	Käyttäjän määrittelemät parametrit	20
4.3.5	Ultraäänen vaimeneminen	22
5	Sedimentaatiokokeet	25
5.1	Valmistelu	25
5.1.1	Hiekan fraktiointi	25
5.1.2	Hiekan tiheyden määrittäminen	25
5.2	Sekoitusmenetelmä	26
5.3	Sirottelumenetelmä	27
6	Data-analyysi ja tulokset	30
6.1	Kuvaajista	30
6.1.1	Nopeuspinta	30
6.1.2	Kaiku	31
6.1.3	Siirtymäviivat	31
6.2	Analyysi	32
6.2.1	Datan suodatus ja siirtymäviivat	32
6.2.2	Terminaalinopeus, Reynoldsin luku ja vastuskerroin	33
7	Johtopäätökset	40

SISÄLTÖ

Viitteet	42
Liitteet	44
A Esimerkkejä sekoitusmenetelmästä	45
A.1 90-125 μm	45
A.2 125-250 μm	46
B Esimerkkejä sirottelumenetelmästä	50
B.1 90-125 μm	50
B.2 125-250 μm	51
B.3 250-500 μm	52
B.4 500-1000 μm	59
C Työssä käytetyt Matlab-koodit	65
C.1 Esitetyt nopeuspinnat	65
C.2 Esitetyt siirtymäviivat	66
C.3 Terminaalinopeus, Reynoldsin luku ja vastuskerroin	70

1 Johdanto

Terminä *sedimentaatio* tarkoittaa kiintoaineen vajoamista gravitaation vaikutuksesta missä tahansa väliaineessa, mutta vakiintuneessa kielenkäytössä sedimentoituminen tapahtuu kuitenkin aina nesteessä. Käytännössä sedimentaation vaikutukset voidaan jakaa ekologiisiin tai teollisiin sovelluksiin liittyviin ilmiöihin ja prosesseihin, kuten kiintoaineen kulkeutuminen vesistöissä, mineraalien erotus toisistaan kaivosteollisuudessa, jäteveden puhdistamot, sekä lukematon määrä prosesseja joissa yleensäkin käsitellään suspensioita.

Tämän työn tavoite on tarkastella kuitususpension yksiulotteiseen suotautumiseen kehitetyn laitteen soveltuvuutta hiekan sedimentoitumisen tutkimukseen, joka käytännössä tarkoittaa vajoavan kiintoaineen nopeusprofiilin määrittämistä *pulssitetulla ultraääni doppler* - menetelmällä pystysuorassa muoviputkessa. Ajatellen kuitujen ja toisaalta hiekan käyttäytymistä vedessä, on intuitiivisestikin melko selvää, että eroavaisuuksia on varsin paljon. Näiden erojen vaikutuksista ensimmäisenä huomataan mittaustapahtumaan liittyviä teknisiä seikkoja, kuten hiekan saaminen veteen siten että mittaus on mielekästä. Toinen mittauksia mahdollisesti rajoittava asia liittyy ultraäänien fysikaalisiin ominaisuuksiin, koska aaltoliikkeen käyttäytyminen riippuu aina väliaineesta.

Työ voidaan jakaa teoreettiseen ja kokeelliseen osaan, alkaen pohjustuksella kappaleesta 2, jossa selvitetään sedimentaation tuntemusta historiallisista lähtökohdista. Lisäksi käydään lyhyesti läpi muutamia teollisia sovelluksia, sekä kiintoaineen kulkeutumisen mekanismeja ja vaikutuksia ekologiassa. Tämän jälkeen seuraa varsinainen teoriaosa kappaleessa 3, koostuen yksittäisen hiukkasen ja veden välisen liikkeen tarkastelulla *Stokesin lain* ja *vastuskerroimen* avulla.

Kokeellinen osuus alkaa kappaleista 4 ja 5, joissa kerrotaan käytetyn laitteiston tarkka rakenne ja selvitetään suoritettavat mittaukset. Lopulta varsinainen mittausdatan käsittely, analysointi, ja saatavat tulokset löytyvät kappaleesta 6.

Tämän työn osalta tehdyt mittaukset on suoritettu Jyväskylän Yliopiston fyysikan laitoksella syksyllä 2010. Työn mahdollistanut laitteisto saatiin lainaan *VTT:n* Jyväskylän toimipisteestä.

2 Sedimentaatio

2.1 Historiallista taustaa

Sedimentaatioon kohdistunut mielenkiinto ei ole suinkaan mikään uusi asia, sillä todisteita veden ja kiintoaineen välisestä vuorovaikutusten havainnoinneista voidaan ajoittaa ainakin myöhäiselle keskiajalle, jolloin antiikin egyptiläiset ja kreikkalaiset hyödynsivät tuntemustaan luonnosta löytyvien aineiden käyttäytymisestä ainakin jalometallien käsittelyn yhteydessä [1]. Ensimmäinen suora viittaus teollisten prosessien suunnittelun ja sedimentaation välille saatiin 1500-luvun puolivälissä Agricolan¹ julkaistessa *De Re Metallica* -teoksen, jossa esitellään monia menetelmiä metallipitoisen malmin puhdistukseen ja veden poistoon erilaisissa selkeytystankeissa [2]. Vaikkakin Agricolan teos sisältää lähinnä käytännön tason tietoa mieluummin kuin todellista tieteellistä tai teoreettista faktaa, oli se kaivosalan pääasiallisena ”oppikirjana” yli kolmesataa vuotta [3].

Varsinaista tieteellistä pohjaa sedimentaation olemukseen alettiin saamaan 1900-luvun tienoilla, jolloin näytettiin kokeellisesti, että lietteen kiintoaineen vajoamisnopeus riippuu suspension sakeudesta [4]. Tämän ansiosta tutkimus laajentui tankkien geometriasta suspensioiden sisäisiin ominaisuuksiin, kuten juuri konsentraation vaihteluun vajoamisprosessin aikana [5]. Samalla mielenkiinto siirtyi merkittävällä tavalla laimeiden suspensioiden selkeyttämisestä sakeampien aineiden konsentraation aikakehitykseen, jonka eräänlainen huipennus saatiin Coe & Clevengerin näyttäessä kuinka homogeenisen suspension sedimentoitessa muodostuu 4 selvästi erotettavissa olevaa ja konsentraatioltaan erilaista aluetta [6]. Tämän nojalla näillä vyöhykkeillä oli perusteltua odottaa myös erilaista sisäistä käyttäytymistä. Tästä eteenpäin mielenkiinto keskittyikin muutaman vuosikymmenen ajaksi juuri näiden eri vyöhykkeiden tulkintaan, sekä jatkuvatoimisten selkeyttäjäjen² suunnitteluun [7, 8, 9].

Yksi merkittävimmistä edistysaskeleista sedimentaation historiassa saatiin vuonna 1951, kun G.J Kynch julkaisi teoksen *A theory of sedimentation*[10]. Julkaisu oli merkittävä, sillä aiemmin sedimentaation tarkastelu oli perustunut ainoastaan nesteeseen ja kiintoaineiden makroskooppisiin ominaisuuksiin ja

¹Ajalle tyypilliseen tapaan teokset julkaistiin latinaksi ”käännetyillä” taiteilijanimillä. Ristimänimeltään Georg Bauer, saksalainen tiedemies (1494-1555).

²Selkeyttäjä on laite, jolla suspension kiintoaineen määrää pyritään vähentämään prosessin aikana (*eng.* Clarificator). Vastakohtana sakeuttaja (*eng.* Thickener).

niiden tasapainoehtoihin ilman varsinaista sedimentoitumisprosessin selittävä mallia. Kynch puolestaan esitti teoriansa aaltomekaniikan yhtälöiden ja jatkumo-oletuksen avulla. Perusoletuksena Kynchin teoriassa on, että sedimentoituvien partikkeleiden ja väliaineen suhteellinen nopeus riippuu ainoastaan suspension konsentraatiosta ϕ . Koska teoria oli alunperin matemaattiselta pohjalta johdettu, seurasi sen julkistamista useita teoriaa vahvistavia empiirisiä kokeita sekä materiaalikohtaisia laajennuksia [11].

1970-luvulla Kynchin teorialle saatiin vaihtoehtoinen malli monifaasivirtauksia kuvaavan teoria kehittyessä [12]. Tästä edelleen monifaasivirtauksia kuvaavat kenttäyhtälöt yhdistettynä tietokonesimulaatioihin ovat hyvin pitkälti muodostaneet sedimentaatioprosessien teoreettisen pohjan.

2.2 Sedimentaation lajeista ja vaikutuksista

2.2.1 Teolliset sovellukset

Monien tuotteiden teollisessa valmistuksessa ollaan tekemisissä monifaasivirtausten kanssa jossain tuotantovaiheessa. Lisäksi usein ollaan myös tilanteessa, jossa halutaan erotella eri aineita toisistaan. Prosessina erottelu voi olla esimerkiksi ilmanpoistoa sellumassasta paperinvalmistuksen lyhyessä kierrossa, tai toisaalta veden poistoa muodostuneesta paperirainasta viiraosalla. Koska sedimentaatio kuitenkin liittyy väliainetta raskaampien materiaalien vajoamiseen gravitaatiokentässä, esitetään seuraavaksi muutamia teknisiä sovelluksia liittyen nesteisiin joihin on sekoittunut yhtä tai useampaa, sitä raskaampaa kiintoainetta.

Sedimentoitumiseen perustuvat laitteet, eli laskeuttajat jaetaan toimintatansa mukaan jatkuviin, puolijatkuviin tai jaksottaisiin laitteisiin [13]. Jatkuvat toimisissa laitteissa käsiteltävän suspension syöttö ja tyhjennys ovat niimensä mukaisesti molemmat jatkuvia prosesseja ilman katkoja. Jaksottaisissa sovelluksissa seos käsitellään eräluonteisesti, eli laitteeseen syötetään tietty määrä ainetta ja valmistumisen jälkeen seuraa tyhjennys. Puolijatkuvat sovellukset ovat tyyppillisesti syötöltään ja kirkastuneen nesteen poiston puolesta jatkuvatoimisia, mutta kiintoaine poistetaan jaksoittaisesti.

Yleisin laskeuttajan tyyppi on kuvan 2.1a allasakeutin, joka koostuu ympyrän muotoisesta altaasta ja kartiomaisesta pohjaosasta. Sakeuttimen pohjalle on asennettu hitaasti pyörivä haralaite jonka tarkoitus on siirtää vajonnut-

ta kiintoainetta säiliön keskellä sijaitsevaan poistoputkistoon aiheuttamatta suuria pyörteitä altaan ylempiin osiin. Allassakeuttimia käytetään yleisesti jätevesien puhdistuksessa, jolloin ideana on ottaa talteen altaan yläosaan muodostunut kirkas neste.

Allassakeuttimen kehittyneempi versio on vinoselkeytin kuvassa 2.1b, jossa kaltevaan tankkiin on aseteltu vinoja väliseiniä. Väliseinien ansiosta kiintoaineen laskeutumismatka pienenee ja suspension käsittelyaika nopeutuu. Vinoselkeyttimien ongelmaksi muodostuu niiden väliseinien puhtaanapito, mistä syystä ne eivät sovellu jatkuvatoimiseen käyttöön.

Selkeyttimillä voidaan myös jaotella kiintoaineita keskenään. Eräs mahdollisuus tehdä siten, on kuvan 2.1c kartioselkeytin. Laitteen periaatteena on hyödyntää keveiden hiukkasten kykyä kulkeutua raskaita partikkeleita kauemmas virran mukana.

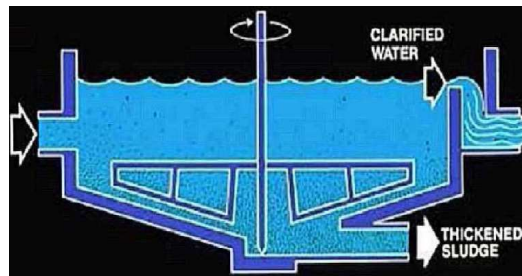
2.2.2 Kiintoaineen kulkeutuminen luonnossa

Teollisuudessa käytettävien sovellusten ohella sedimentaatiolla on merkittävää vaikutusta luonnossa esimerkiksi eroosion muodossa, joka aiheutuu kiinteään aineeseen, tyypillisesti hiekan tai lietteen, kulkeutumisesta veden tai ilman vaikutuksesta. Veden virtaamiin liittyvä eroosio aiheutuu kolmella eri tavalla riippuen kiinteään aineen ominaisuuksista kuvan 2.2 mukaisesti [14]. Pienimmät hiukkaset, kuten ionit, siirtyvät veteen liuenneena eivätkä vajoa pohjalle. Pienimmät, partikkeleiksi tulkittavat yhdisteet kuten savihiukkaset, kulkeutuvat veteen sekoittuneena ja ne eivät ole jatkuvassa kontaktissa pohjan kanssa. Suuremmat kappaleet kuten pienet kivet ja hiekanjyvät ovat joko epäjatkevassa, tai jatkuvassa kontaktissa pohjaan.

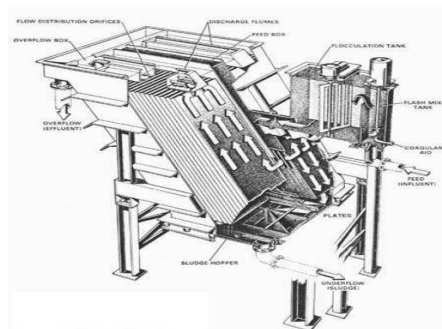
Lähtökohtaisesti sedimentin³ kulkeutuminen aiheuttaa ongelmia luonnon ekosysteemille, kuten juuri eroosiota ja sitä kautta maaperän köyhtymistä. Vastakohtana maaperän köyhtymiselle on vesistöjen rehevöityminen, joka aiheutuu suurelta osin maataloudessa käytettävien lannoitteiden ja vapautuvien ravinteiden kulkeutumisesta.

Sedimenttien kulkeutumisen johdosta on pitkän ajan kuluessa muodostunut sedimenttikiviä, joita lasketaan peittävän noin 75 % maapallon mantereiden

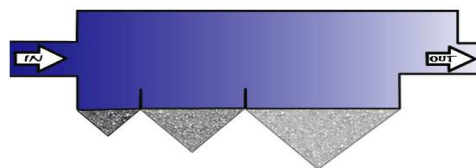
³Sanalla *sedimentaatio* tarkoitetaan tässä tutkielmassa kiinteiden partikkeleiden gravitaation alaista kulkeutumista väliaineessa ja sanalla *sedimentti* puolestaan virtauksen mukana liikkuvaa kiintoainetta.



(a) Allasakeutin.

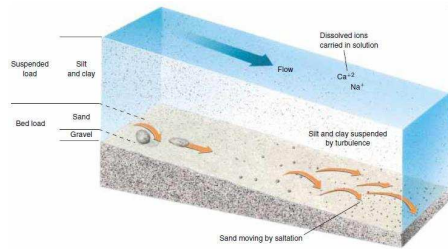


(b) Vinospelkeytin.



(c) Kartioselkeytin.

Kuva 2.1: Sedimentaation hyödyntämiseen perustuvia sovelluksia.



(a) Kiintoaineen kulkeutumismekanismit.

(b) Betsiboka -joki 2002.

Kuva 2.2: Sedimentaatio luonnossa. Kuvassa 2.2a raskaimmat partikkelit kulkeutuvat pohjan lähellä ja kevyemmät puolestaan lähempänä pintaa. Kuvassa 2.2b NASA:n avaruusaluksesta kuvaama Betsiboka-joki Madagaskarilta, jossa sademetsien hakkuiden jäljiltä suuri osa maaperästä on kulkeutumassa Intian valtameren.

**Kuva 2.3:** Sedimenttikivimuodostelmaa Grand Canyon, USA.

pintakerroksista [14]. Sedimentaation kautta muodostuneet kivet jaetaan kolmeen eri luokkaan, savi-, orgaaniset- ja kemialliset sedimenttikivet. Näistä savikivet ovat suurin ryhmä, mutta taloudelliselta kannalta orgaaniset kivet, kuten kivihili, ovat ainakin toistaiseksi merkittävimmässä osassa. Taloudellisen hyödyn ohella sedimentoitumalla muodostuneen maa-aineksen rakenteen tutkimuksella on mahdollista selvittää maapallolla aiemmin vallinneita ilmasto-olosuhteita ja ekologiassa tapahtuneita pitkän ajan muutoksia.

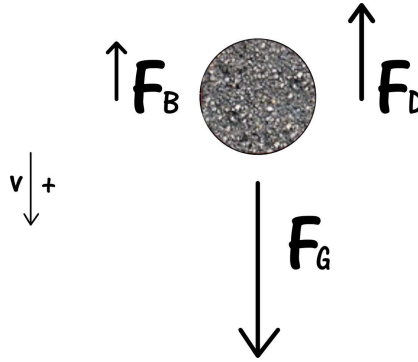
3 Fysikaalista taustaa

3.1 Stokesin laki

Keskitytään jatkossa sedimentoitumiseen kuvan 3.1 mukaisessa tilanteessa, jossa kiintoainetta vajoaa nesteessä nopeudella v . Tällöin yksittäiseen ja vapaasti vajoavaan, pyöreeen partikkeliin kohdistuvien inertiaalivoimien $\mathbf{F}_I = \frac{\rho v^2}{a}$ ja viskoottisten voimien $\mathbf{F}_V = \frac{\mu v}{a^2}$ suhde esitetään Reynoldsin luku-

$$Re_a = \frac{\rho v a}{\mu}, \quad (3.1)$$

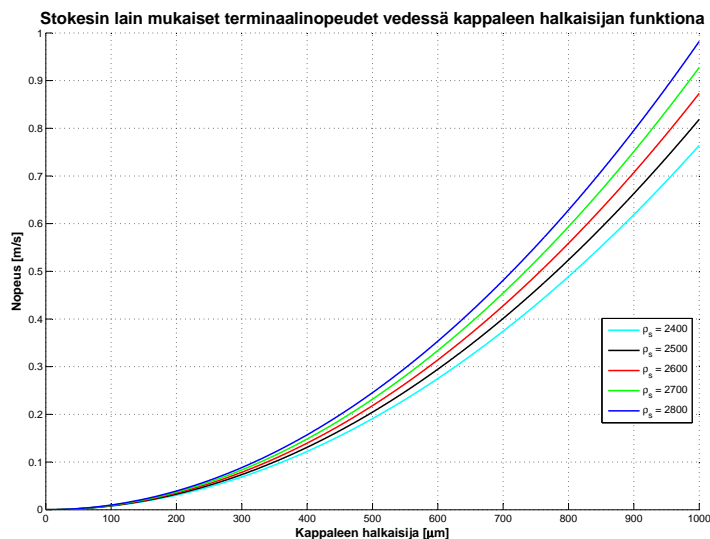
missä ρ = nesteen tiheys, a = hiukkasen halkaisija ja μ = nesteen viskositeetti.



Kuva 3.1: Nopeudella v vajoavaan kappaleeseen vaikuttavat voimat. Kuvassa \mathbf{F}_D =vastusvoima, \mathbf{F}_B =noste ja \mathbf{F}_G =gravitaatio.

Vapaan, kokoonpuristumattomassa nesteessä vajoavan partikkelin paino \mathbf{F}_W saadaan yhdistämällä gravitaation ja nosteen vaikutukset, eli $\mathbf{F}_W = V(\rho_s - \rho)\mathbf{g}$, missä V ja ρ_s ovat hiukkasen tilavuus sekä tiheys ja ρ nesteen tiheys. Mikäli partikkelin liike on tarpeeksi hidasta, eli nesteen virtauskenttä pysyy laminaarisena, voidaan pyöreälle kappaleelle käyttää vastusvoimana niin sanottua Stokesin vastusta, $\mathbf{F}_D = 3\pi v a \mu$. Tyypillisesti hyväksytty raja edellä esitetylle vastusvoiman lausekkeelle määritellään siten, että $Re_a \ll 1$ [15, 16]. Asettamalla hiukkasen painosta ja virtausvastuksesta muodostuneet voimat tasapainoon, saadaan partikkelin terminaalinopeudeksi

$$\mathbf{v}_t = \frac{a^2(\rho_s - \rho)}{18\mu}\mathbf{g}. \quad (3.2)$$



Kuva 3.2: Stokesin lain mukaisia terminaalinopeuksia eri tiheyksille kappaleille.

Kuten kuvasta 3.2 ja edellisestä kaavasta (3.2) nähdään, Stokesin laki sanoo, että suuret kappaleet vajoavat pieniä nopeammin. Lisäksi vajoamisnopeus on suoraan verrannollinen aineiden tiheyksien eroon $\Delta\rho = \rho_s - \rho$.

Newtonin toisen lain nojalla yksittäiselle partikkelille väliaineessa pätee

$$\begin{aligned}
 m \frac{d\mathbf{v}}{dt} &= \mathbf{F}_W - \mathbf{F}_D = V(\rho_s - \rho)\mathbf{g} - 3\pi\mathbf{v}a\mu \stackrel{(3.2)}{=} 3\pi\mathbf{v}_t a\mu - 3\pi\mathbf{v}a\mu \\
 \Rightarrow \int_0^{\tilde{\mathbf{v}}} d\mathbf{v} \frac{1}{1 - \frac{\mathbf{v}}{\mathbf{v}_t}} &= \int_0^t dt \frac{3\pi a\mu}{m} \\
 \Rightarrow t(\tilde{\mathbf{v}}) &= -\frac{m}{3\pi a\mu} \ln\left(1 - \frac{\tilde{\mathbf{v}}}{\mathbf{v}_t}\right). \tag{3.3}
 \end{aligned}$$

Yhtälöstä (3.3) nähdään, ettei terminaalinopeutta tarkkaan ottaen koskaan saavuteta, vaan sitä lähestytään asymptoottisesti. Toisaalta taas tyypillisten mittaustarkkuuksien rajoissa terminaalinopeus saavutetaan hyvinkin nopeasti.

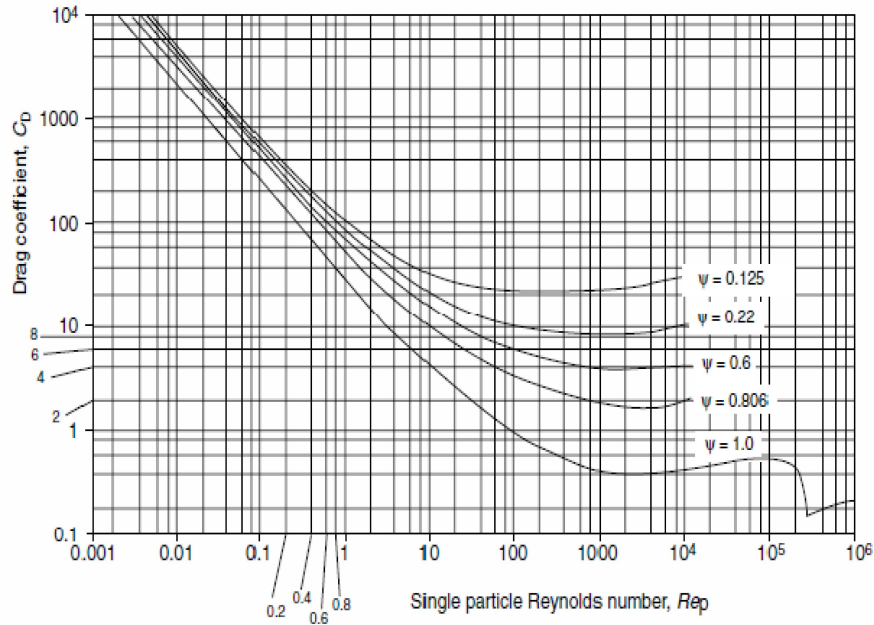
Esimerkiksi tavanomaisilla arvoilla vedessä vajoavalle yksittäiselle hiekkarakelle, jolle $a = 300 \mu\text{m}$, $\rho_s = 2600 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ja $\mu = 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}}$, saavutetaan 99 % terminaalinopeudesta ajassa $t_{99\%} \approx 90 \text{ms}$.

Mikäli kappale vajoaa sakean suspension seassa, on huomioitava ettei siihen kohdistuva noste aiheudu puhtaasta nesteestä. Tällöin partikkelin syrjäyttämän suspension tiheys on

$$\rho_m = \phi\rho_{s'} + (1 - \phi)\rho, \quad (3.4)$$

missä ϕ on suspension konsentraatio ja $\rho_{s'}$ nesteeseen sekoittuneen kiintoaineen tiheys.

3.2 Vastuskerroin C_D



Kuva 3.3: Kokeellisesti määritetty kappaleen kokema vastus Reynoldsin luvun ja muodon perusteella [17].

Yleisemmällä tasolla kappaleen liikettä hidastavaa vastusta kuvataan dimensiottomalla *vastuskertoimella* C_D . Vastuskerroin määritellään kappaleen liik-

keseen nähden kohtisuoraan vaikuttavan vastusvoiman F_D avulla, siten että

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho v^2 A}, \quad (3.5)$$

missä A on kappaleen liikesuuntaan osoittava projektiopinta-ala. Tarkastelemalla edellistä yhtälöä (3.5) huomataan, että vastuskerroin riippuu hiukkasen Reynoldsin luvusta $Re_a = \frac{\rho v a}{\mu}$, sillä pyöreälle partikkelille se voidaan kirjoittaa myös muodossa

$$C_D = 8 \frac{\rho}{\pi \mu^2} \frac{F_D}{(Re_a)^2}. \quad (3.6)$$

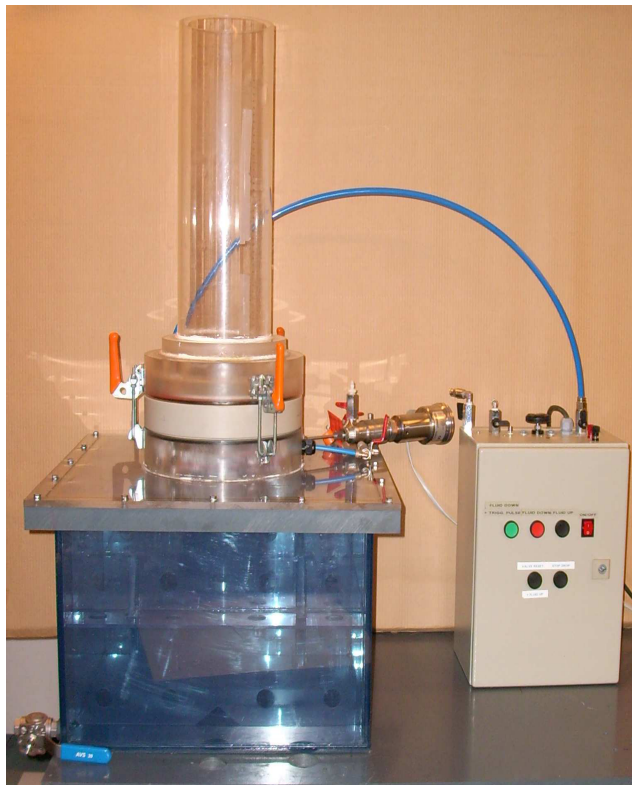
Asettamalla liikettä vastustava voima $\mathbf{F}_D = \frac{1}{8}\pi C_D v^2 a^2$ ja kappaleen paino $\mathbf{F}_W = \frac{4}{3}\pi a^3(\rho_s - \rho)\mathbf{g}$ yhtäsuuriksi, saadaan sen terminaalinopeudeksi

$$\mathbf{v}_t = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{\frac{a(\rho_s - \rho) |\mathbf{g}|}{\rho C_D}}. \quad (3.7)$$

Myös hiukkasen muodolla on vaikutusta sen kokemaan vastukseen. Määrittelemällä kappaleelle sen ulkomuotoa kuvaava suure *muototekijä* Ψ (eng. *Sphericity*) tilavuudeltaan yhtäsuuren pallon pinta-alan ja kappaleen pinta-alan suhteena, nähdään kuvan 3.3 mukaista riippuvuutta vastuskertoimen C_D , muototekijän Ψ ja Reynoldsin luvun Re välillä [17].

4 Mittauslaitteisto

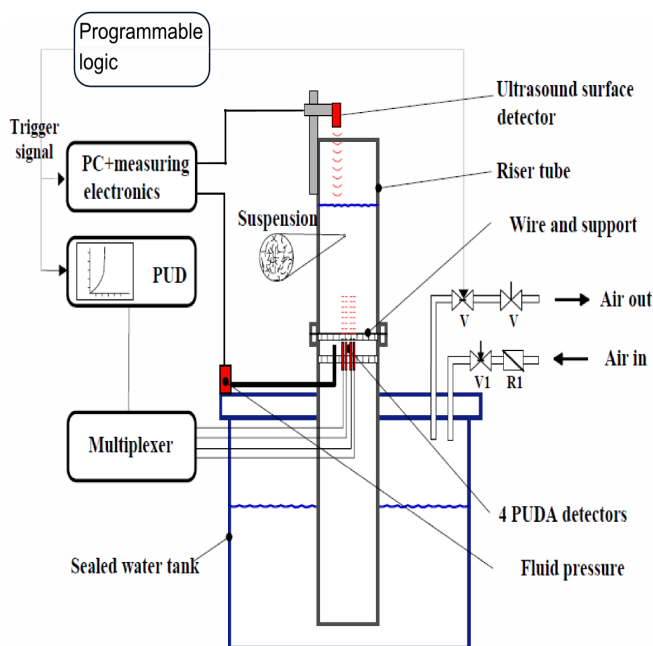
Mittauksissa käytettiin kuvassa 4.1 olevaa laitetta, joka on alunperin kehitetty puukuitususpension suotautumisen tutkimiseen laboratorio-olosuhteissa. Työn kokeellisen osan lähtökohdaksi on siis tilanne, jossa käyttöön saatiin laitekokoisuus minkä toiminta kuitususpension suotautumiskokeiden osalta tiedetään hyväksi. Valmiiden suotautumiskokeiden ja hiekan sedimentoitumiskokeiden suunnittelussa näiden prosessien ensimmäisenä erona nousee esiin kiintoaineen tiheys. Vettyneen kuidun tiheys on tavallisesti aina alle $1500 \frac{kg}{m^3}$ ja vastaavasti hiekalle noin $2500 \frac{kg}{m^3}$. Lisäksi merkittävänä fysikaalisena erona puukuitujen ja hiekan välillä on kuitujen kokoonpuristuvuus, verrattaessa hiukkahiukkaseen joka säilyttää kokonsa ja muotonsa.



Kuva 4.1: Kytkemätön laite. Vasemmalla paineistettava vesisäiliö ja nousuputki. Oikealla ohjauksyksikkö, jolla vesisäiliön painetta säädelään.

4.1 Suotautumiseen kehitetty laite

Puukuitususpension yksiulotteisen suotautumisen tutkimiseen rakennetun laitteiston rakenne on esitetty kuvassa 4.2. Tarkempaa informaatiota laitteesta, sekä sen aiemmasta käytöstä löytyy liitteistä [18, 19]. Tärkeimmät laitteiston osat ovat muovinen, halkaisijaltaan 160 mm oleva nousuputki (riser tube), tiivistetty vesisäiliö (sealed water tank), sekä viirakudos ja sitä tukeva tukiristikko (wire and support grid). Näiden lisäksi suotautumisen tapauksessa oleellisia ovat venttiilit **V1**, **V2** ja **V3** joiden kautta vesipatsaan pintaa nousuputkessa saadaan säädeltyä Siemensin logiikalla toteutetulla pneumatiikkaelektronikkajärjestelmällä (programmable logic). Näistä venttiileistä **V1**:llä ohjataan neste haluttuun alkukorkeuteen ja muilla puolestaan kontrolloidaan vedenpinnan laskua.



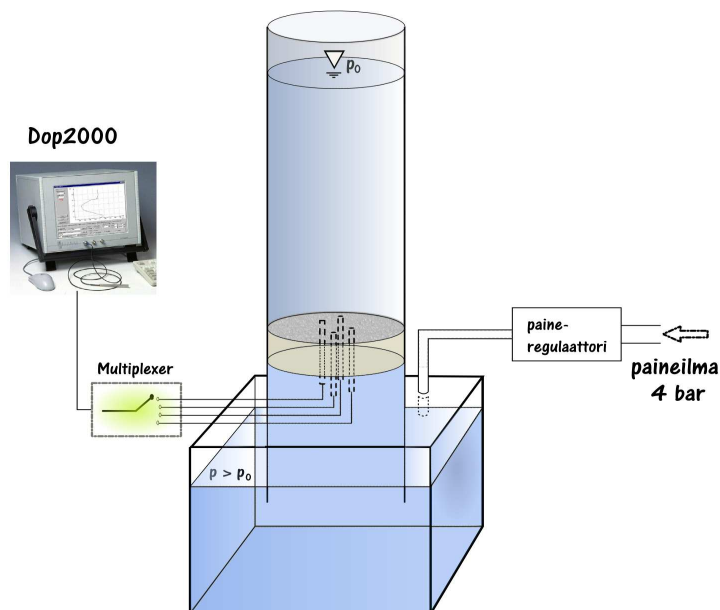
Kuva 4.2: Puukuitususpension suotautumiseen kehitetyn laitteiston kaavakuva [19].

Varsinainen informaatio mittausprosessista saadaan ultraäänellä toimivalla pinnankorkeusmittarilla (ultrasound surface detector), välittömästi viiran alla sijaitsevalla paineanturilla (fluid pressure sensor), sekä neljällä multiplexe-

rin (multiplexer) kautta DOP-mittalaitteeseen (PUD) kytketyllä, pulssitetuun ultraääneen perustuvalla, mittausanturilla (4 PUDA detectors). Anturit on sijoitettu pystysuoraan ja symmetrisesti nousuputken keskilinjaan nähden. Kerätystä datasta DOP-mittalaitteen muistiin tallentuu multiplekserin kautta saapuva informaatio. Paine ja pinnankorkeus tallentuvat vastaavasti suoraan tavallisen PC-tietokoneen muistiin.

Mittaustapahtumaa ohjataan samalla tietokoneella, johon on tätä varten rakennettu tarvittava mittausrutiini LabVIEW ohjelmalla. Sekä PC, että DOP-mittalaitteen mittauksen aloitus voidaan aloittaa pneumatiikkaelektronikkajärjestelmästä saatavalla triggauksignaalilla.

4.2 Sedimentaatioon modifioitu laite



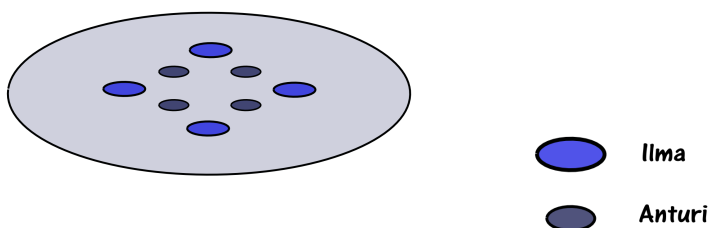
Kuva 4.3: Sedimentaatiokokeissa käytetyn laitteiston havainnekuva.

Sedimentaation tutkimiseksi laitteistoon tehtiin tiettyjä yksinkertaistuksia. Syynä tähän on se, ettei sedimentaatiokokeissa tarvita nestepatsaan vertikaalista liikettä, vaan veden pinta pidetään stabiilina. Tämän, ja toisaalta

hiekan kokoonpuristumattomuuden vuoksi myöskään viiranalaista paineenmittausta ei tarvita. Näiden muutosten jälkeen laitekokonaisuus pelkistyy kuvan 4.3 mukaiseksi.

Edellä mainittujen laitteiston ominaisuuksien riisumisen lisäksi viiraosaa muokattiin. Ensinnäkin alkuperäinen muovinen viirakudos korvattiin 250 meshin metalliviiralla. Yksikkönä *mesh* kertoo kuinka monta lankaa viirassa on tuumaa kohden, joten käyttökelpoisempi yksikkö tässä yhteydessä viiralle on sen reikien koko, joka käytetylle viiralle on $63\ \mu\text{m}$.

Viirakudoksen vaihdon lisäksi viiraosan läpi johdettiin paineilmajärjestelmä, jolla oli tarkoitus saada aikaiseksi voimakas hiekkaa sekoittava turbulenssi viiran yläpuoliseen nesteeseen. Ilmaa syötettiin neljästä eri kohdasta, jotka valittiin symmetrisesti viiraosan keskipisteestä katsoen kuvan 4.4 mukaisesti.



Kuva 4.4: Anturien ja paineilmasekoituskohtien sijoittelu viiraosalla.

4.3 DOP2000

Ultraäänellä tarkoitetaan mekaanista aaltoliikettä, jonka taajuus on ihmisen kuuloalueen yläpuolella ($>20\ \text{kHz}$). Ultraääni synnytetään tavallisesti piezosähköisellä kiteellä, joka muuntaa sähköisen värähtelyn mekaaniseksi värähtelyksi ja päinvastoin. Johdettaessa kiteeseen vaihtovirtaa, sen tilavuus muuttuu. Tämän seurauksena väliaineeseen syntyy paine-eroja, jolloin tuloksena on ääniaaltoja.

Edetäkseen ultraääni tarvitsee aina kiteeseen kosketuksissa olevan väliaineen, eikä tästä syystä etene lainkaan tyhjiössä. Kiinteissä aineissa ja nesteissä ultraääni puolestaan etenee varsin hyvin. Kiinteissä aineissa ääniaallot etenevät sekä pitkittäisenä, että poikittaisena aaltoliikkeenä, mutta nesteiden ja kaa-

sujen kiinteän rakenteen puuttuessa, etenee värähtely näissä aineissa ainoastaan pitkittäisenä aaltoliikkeenä. Ultraäänen nopeus riippuukin huomattavasti väliaineesta ja sen ominaisuuksista, kuten tiheys, elastiset ominaisuudet ja lämpötila. Karkeasti ottaen voidaan todeta, että pehmeissä ja joustavissa materiaaleissa äänennopeus on pieni, sekä suuri puolestaan tiheissä ja kovissa materiaaleissa.

Mittausteknisesti ultraäänen soveltaminen on melko vanha ja laajasti käytössä lääketieteessä, erilaisissa kaikuluotaimissa sekä virtausmittareissa. Yleisellä tasolla aaltoliikkeen käyttökelpoisuus erilaisiin mittauksiin perustuu pitkälti sen kykyyn olla vaikuttamatta tarkasteltavaan kohteeseen, kuten analysoitavaan virtaukseen. Mittalaitteissa ultraääneen perustuvat sovellukset voidaan jakaa jatkuviin, tai pulssitettuihin aaltoihin. Teknisesti näiden laitteiden erona on se, että jatkuvassa ultraäänessä tarvitaan tavallisesti kaksi anturia, toinen signaalin lähettämiseen ja toinen vastaanottoon. Virtausmittausten kannalta jatkuvatoimisessa ultraäänessä merkittävimpänä puutteena on kuitenkin paikkaresoluution puute.

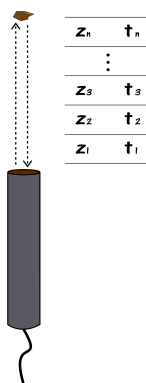
Tämän työn osalta sedimentoituvan hiekan nopeusprofiilien mittaukseen käytettiin *Signal-processing S.A:n* valmistamaa *DOP2000, model 2032*, pulssitetuun ultraääni doppler menetelmään (PUDV) perustuvaa, laitteistoa. Mittalaittekokonaisuus voidaan jakaa dataa käsittelevään keskusyksikköön, sekä siihen liitettävään kaksisuuntaiseen anturiin, joka sekä lähettää että rekisteröi heijastuneen kaiun. Mikäli laitteeseen halutaan kytkeä useampia antureita, voidaan se tehdä multiplekserin kautta, joka kytkee yksittäisen anturin vuorollaan keskusyksikön A/D-muuntimeen. Käytännössä tämä tarkoittaa myös sitä, ettei useampien antureiden antamaa informaatiota voida lukea samanaikaisesti. Tämän työn osalta multiplekseriin kytkettiin 4 fokuoimatonta 4 MHz:n anturia, joiden tärkeimmät ominaisuudet on kerätty taulukkoon 4.1.

PUDV-menetelmässä tarkasteltavaan aineeseen lähetetään jaksotetusti lyhyitä purskeita, joiden rajapinnoilta heijastuneet kaiut rekisteröidään jatkuvana mittauksena. Menetelmässä kohteen paikka saadaan määritettyä ultraäänen nopeuden ja kuluneen ajan avulla. Nopeuden määrittämisessä puolestaan hyödynnetään peräkkäisille purskeille mitattujen kaikuja intensiteeteistä ristikorrelaatioiden kautta muodostettujen profiilien siirtymää. Toisin kuin jatkuvan ultraäänen tapauksessa, PUDV-menetelmä perustuukin peräkkäisten pulssien aiheuttamien kaikusignaalien keskinäisten korrelaatioiden mittaamiseen.

Taulukko 4.1: Käytössä olleiden ultraääniantureiden tärkeimmät tekniset ja fyysiset ominaisuudet [21].

Emitointitaajuus	4 MHz
Pietsoelementin halkaisija	5 mm
Hajontakulma	$\sim 6^\circ$
Lähikenttä	17 mm
anturin pituus	90 mm
anturin halkaisija	8 mm
Kaapeli	RG174
Liitin	BNC

4.3.1 Kohteen paikka



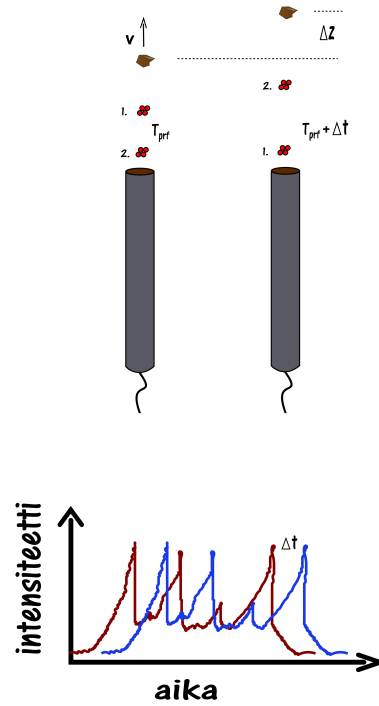
Kuva 4.5: Pulssitetun ultraääni Doppler-menetelmän paikanmääritys. Sama anturi toimii sekä äänen lähettäjänä, että vastaanottajana. Aaltoliikettä heijastavan rajapinnan sijainti saadaan määritettyä aikaikkunoiden t_n avulla.

Paikan määrittystä on selvitetty kuvassa 4.5, missä mitatun kaikuprofilin aika-akseli on jaettu pieniin aikaväleihin t_n . Näiden aikaikkunoiden avulla kohteen paikka saadaan määritettyä kaavalla

$$z_n = \frac{1}{2} c t_n, \quad (4.1)$$

missä c on äänen nopeus väliaineessa. Paikkaa ei ole mahdollista määrittää mielivaltaisen tarkasti, vaan sen resoluutio muodostuu aikavälien koon mukaan.

4.3.2 Kohteen nopeus



Kuva 4.6: Kahden peräkkäisen pulssin heijastuminen liikkuvasta kohteesta. Nopeus voidaan määrittää pulssintoistovälin T_{PRF} ja mitatun aikasiirtymän Δt avulla.

Tarkastellaan seuraavassa kuvan 4.6 tilannetta, jossa kappale liikkuu ultraäänien suuntaisesti nopeudella v . Tällöin kahden peräkkäisen pulssin välillä kappaleen paikkamuutokselle Δz on

$$\Delta z = v \left(T_{PRF} + \frac{1}{2} \Delta t \right) \approx v T_{PRF}, \quad (4.2)$$

missä Δt on kahdelle peräkkäiselle kaiulle havaittu aikaero ja T_{PRF} kiinteänä pidettävä pulssintoistoväli.

Kaiun vastaanottovaiheessa kahden peräkkäisen pulssipaketin ajallinen etäisyys on

$$T_R = T_{PRF} + \Delta t \stackrel{(4.1)}{=} T_{PRF} + 2\frac{\Delta z}{c} \stackrel{(4.2)}{\approx} T_{PRF}\left(1 + 2\frac{v}{c}\right) \quad (4.3)$$

Määrittelemällä ns. Doppler-taajuus syöttötaajuuden $f_E = \frac{1}{T_{PRF}}$ ja vastaanottotaajuuden $f_R = \frac{1}{T_R}$ erotuksena, saadaan

$$f_D = f_E - f_R = \frac{1}{T_{PRF}} - \frac{1}{T_{PRF}\left(1 + 2\frac{v}{c}\right)} = f_E\left(1 - \frac{1}{1 + 2\frac{v}{c}}\right). \quad (4.4)$$

Tästä voidaan ratkaista nopeudeksi

$$v = \frac{1}{2}c \frac{f_D}{f_E - f_D}. \quad (4.5)$$

Tarkastelemalla lauseketta (4.4) huomataan, että $f_D \rightarrow 0$ aina kun $c \gg v$. Tämän nojalla lopullinen nopeuden määrittävä kaava voidaan approksimoida muotoon

$$v = \frac{1}{2}c \frac{f_D}{f_E}. \quad (4.6)$$

4.3.3 Rajoitukset

Kohteen paikalle ja nopeudelle on luonnollisesti olemassa myös omat rajoituksensa, jotka molemmat määräytyvät käytännössä pulssintoistotaajuuden T_{PRF} perusteella. Näistä suurin mitattavissa oleva etäisyys seuraa siitä, että kohteesta heijastuneen äänipulssin on ehdittävä palata kohteesta ennen seuraavan lähetystä, eli

$$z_{max} = \frac{1}{2}c T_{PRF}. \quad (4.7)$$

Koska anturit rekisteröivät kaikuja jatkuvatoimisesti, seuraa suurin mitattavissa oleva nopeus heijastuneen sinimuotoisen signaalin vaihe-erosta. Määrittelemällä vaihe-ero δ peräkkäisten kaikujen aikaeron Δt ja lähtevän äänen taajuuden f_e avulla siten, että

$$\delta \equiv 2\pi f_e \Delta t, \quad (4.8)$$

on suurin mahdollinen käsiteltävissä oleva vaihe-ero puoli jaksoa, eli π [23]. Tällöin suurimmaksi mahdolliseksi aikaeroksi saadaan $\Delta t_{max} = \frac{1}{2f_e}$. Tämän jälkeen lauseiden (4.2) ja (4.3) nojalla suurin mitattavissa oleva nopeus on

$$v_{max} \approx \frac{c}{4T_{PRF} f_e}. \quad (4.9)$$

4.3.4 Käyttäjän määrittelemät parametrit

PUDV-menetelmässä mittaustapahtumasta saatava informaatio riippuu varsin paljon laitteistoon syötetyistä parametreista, joista osa on teknisesti määriteltäviä ja osa yleisistä aaltoliikkeen lainalaisuuksista seuraavia. Seuraavassa on kerrottu oleellimmat parametrit ja niiden vaikutuksia mittaukseen.

Doppler-kulma (doppler angle) ϕ . Anturin ja mitattavan liikkeen välinen kulma. Suoritetuissa mittauksissa $\phi = 0$.

Äänen nopeus (speed of sound) c . Äänen nopeus väliaineessa, vedelle ja laimeille suspensioille $c \approx 1500 \frac{m}{s}$.

Lähetysteho (emitting power). Lähetettävän ultraäänipulssin teho, valittavana kolme tasoa: *low*, *medium* ja *high*. Valittava tarpeeksi suureksi mahdollisten seinämien ja muiden esteiden aiheuttamien vaimennuksen vuoksi. Toisaalta liian suuri teho aiheuttaa moninkertaisia kaikuja ja kohinaa. Käytetty arvoja *medium* ja *high*.

Vastaanottoherkkyys (reception sensitivity). Määrittää luettavan datan energiatason, jota pienemmät arvot tulkitaan kohinaksi. Viisiasteinen parametri arvoilla *really low*, *low*, *medium*, *high*, ja *really high*. Käytetty arvoa *medium*.

Vahvistusprofiili (time gain control, TGC). Vahvistusprofiililla vaikutetaan vastaanotetun kaikusignaalin intensiteettiin. Hyvin tärkeä parametri, jolla voidaan vahvistaa tai heikentää signaalia paikallisesti ja poistaa mahdollisia häiriökaikuja. Käytetyn laiteversion puutteena oli, ettei vahvistusta voinut määrittää jokaiselle anturille erikseen. Tästä syystä mittaustilanteissa tuli

tyytyä kompromissiratkaisuihin ja käyttää vahvistusarvoja, jotka toimivat keskimääräisesti parhaiten kaikille antureille.

Emitointitaajuus (emitted frequency) f_e . Anturin lähettämän ultraäänen taajuus, joka on anturikohtainen. Vaikuttaa myös tarkasteltavaan kohteeseen, sillä suuremmilla taajuuksilla aaltoliike vaimenee nopeammin. Lisäksi määrittää suurimman mahdollisen nopeuden ja luotaussyvyyden Nyquistin teoreeman mukaisesti $v_{max}y_{max} = \frac{c^2}{8f_e \cos\phi}$ [20].

Pulssintoistotaajuus (pulse repetition frequency) f_{PRF} . Kertoo kuinka monta pulssia lähetetään sekunnissa. Määrää emitointitaajuuden ohella maksimaalisen mittaussyvyyden ja suurimman mittausnopeuden. Pulssintoistotaajuudella määritetään myös nopeusresoluutio, joka saadaan yhtälöllä $\Delta v = \frac{v_{max}}{128}$ [21]. Mittauksissa käytetty arvoa $f_{PRF} \approx 2000 Hz$.

porttien lukumäärä (number of gates). Määrää mittattavan syvyyden. Voidaan asettaa myös siten että laite määrittää automaattisesti maksimisyvyyttä vastaavan porttimäärän. Mittauksissa käytössä automaattinen porttimäärä.

pulssipaketin pituus (burst length). Määrää kuinka monesta aallonpituuden monikerrasta pulssipaketti koostuu ja vaikuttaa resoluutioon Valittavana kolmesta vaihtoehdosta: 2, 4 tai 8. Käytettiin arvoa 4.

Paikkaresoluutio (resolution). Kertoo vierekkäisten mittaussikkunoiden keskipisteiden etäisyyden ja määräytyy pulssipaketin geometriasta. Käytetty arvoa 0,75 mm.

emissioiden lukumäärä (number of emissions per profile) N_e . Määrää kuinka monesta pulssipaketista yksittäinen nopeusprofiili muodostetaan. Kasvatamalla emissioiden lukumäärää, saadaan mahdollista kohinaa vähennettyä ja yksittäisen emission keskihajontaa pienennettyä. Pienillä ja tasaisilla nopeuksilla on perusteltua pyrkiä käyttämään suuria arvoja, jotka toisaalta vaikuttavat profiiliin muodostamiseen kuluvaan aikaan. Tässä työssä käytetty arvoja väliltä 100-300.

multiplekserin kierrosten lukumäärä (number of sequence) N_{seq} . Kertoo kuinka monta keskiarvoistettua nopeusprofiilia kullakin anturilla mitataan ja määrää samalla mittaukseen kuluneen ajan. Tyypilliset käytetyt arvot väliltä 15-20, riippuen mittaukseen kuluneesta ajasta.

Kokonaisprofiilimäärä (number of profiles) $\#prof$. Kertoo kuinka monta

halutun suureen profiilia lopulliseen tiedostoon tallennetaan. Tämän työn puitteissa tallennettu nopeus- ja kaikuprofiileja lukumäärältään 200-1000.

Yhden profiilin kesto (time between profiles) t_{prof} . Riippuu näytteenotototaaajuudesta T_{PRF} , emissioiden lukumäärästä ja laitteen tekniikasta siten että $t_{prof} = t_{tran} + T_{PRF} \cdot (N_e + N)$. Edellä $t_{tran} \approx 1,5 ms$ on keskimääräinen datan siirtoaika anturilta tietokoneen muistiin, ja $N = 16$ on laitteistolle ominainen kiinteä emissiovakio [23].

Kuten edellä läpikäydyistä parametrien vaikutuksista ja aiemmin selvitetystä PUDV-menetelmän periaatteesta käy ilmi, vaikuttaa pulssitoistototaaajuus $T_{PRF} = \frac{1}{f_{PRF}}$ useaan tärkeään mittauksia rajoittavaan tekijään.

Taulukossa 4.2 on esitetty nopeusresoluutio Δv , maksimisyvyys z_{max} ja suurin mitattavissa oleva nopeus v_{max} eri pulssintoistototaaajuuden arvoilla. Ilmoitetut arvot on laskettu aiemmin kerrotun mukaisesti kaavoilla

$$v_{max} = \frac{c}{4f_e T_{PRF}}$$

$$z_{max} = \frac{1}{2} c T_{PRF}$$

$$\Delta v = \frac{v_{max}}{128}$$

4.3.5 Ultraäänen vaimeneminen

Mittausten onnistumisen kannalta ultraäänen käyttäytymisellä, sekä varsinkin sen vaimenemisella, on suurta merkitystä. Varsinainen äänen voimakkuuden heikkeneminen tapahtuu paitsi vaimenemisena aineen sisällä, myös häviöinä, jotka tapahtuvat eri aineiden rajapinnoilla.

Äänen nopeudelle väliaineessa voidaan käyttää yhtälöä

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (4.10)$$

Taulukko 4.2: Pulssintoistotaajuuden T_{PRF} vaikutus mitattavissa oleviin suureisiin.

$T_{PRF} [\mu s]$	$v_{max} [m/s]$	$z_{max} [cm]$	$\Delta v [cm/s]$
100	0,938	7,5	0,732
200	0,469	15,0	0,366
300	0,313	22,5	0,244
400	0,234	30,0	0,183
500	0,188	37,5	0,146
600	0,156	45,0	0,122
700	0,134	52,5	0,105
800	0,117	60,0	0,092
900	0,104	67,5	0,081
1000	0,094	75,0	0,073

missä E on aineen kimmomoduli ja ρ tiheys [22]. Kohdatessaan kahden eri aineen rajapinnan osa aallosta heijastuu ja osa menee taittuen pinnan läpi. Kuvan 4.7 mukaisella rajapinnalla aallon tulokulmalle α ja heijastuskulmalle γ pätee Snellin laki [20]

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (4.11)$$

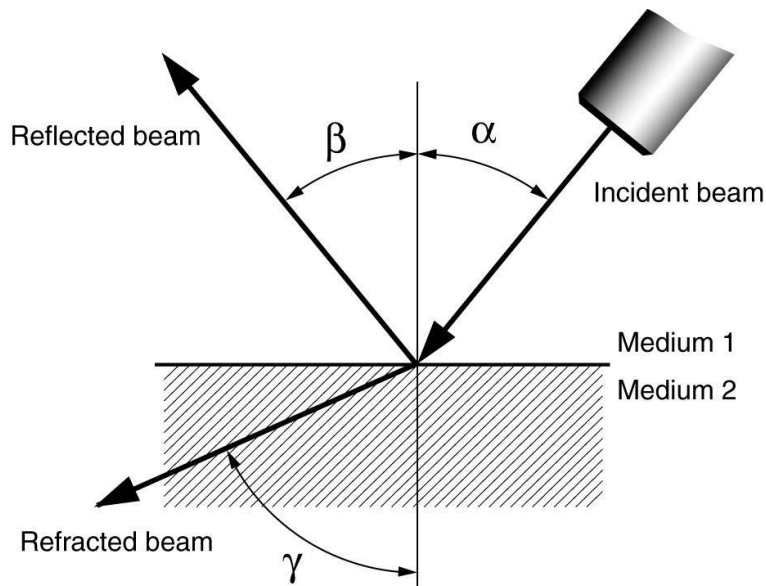
missä c_i ja n_i ovat äänenopeus ja taitekerroin aineelle i .

Taittuvan ja heijastuvan aallon suuruus määräytyy väliaineiden akustisesta impedanssista $Z = \rho c$. Heijastuneen ja läpimenevän aallon amplitudien suuruuksia kuvataan heijastus- ja taitekertoimilla

$$T_r = \frac{p_h}{p} = \left(\frac{Z_2 \cos \alpha - Z_1 \cos \beta}{Z_2 \cos \alpha + Z_1 \cos \beta} \right)^2 \quad (\text{heijastuva})$$

$$T_R = \frac{p_t}{p} = \frac{4 Z_1 Z_2 \cos^2 \alpha}{(Z_2 \cos \alpha + Z_1 \cos \gamma)^2}, \quad (\text{taittuva})$$

missä p , p_h ja p_t ovat saapuvan, heijastuvan, sekä taittuvan aallon intensiteetit [20]. Lisäksi edellämainituille kertoimille $T_r + T_R = 1$. Tämän työn puitteissa



Kuva 4.7: Ultraäänen käyttäytyminen rajapinnalla

käytetyille materiaaleille akustiset impedanssit ovat vedelle $Z_w \approx 1,5 \cdot 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}}$ ja hiekalle $Z_s \approx 3,5 \cdot 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}}$ [24].

Heijastumisominaisuuksien lisäksi ultraäänen kulkuun vaikuttaa vaimeneminen. Äänen siroonnasta ja absorptiosta johtuva vaimeneminen ei vaikuta varsinaiseen etenevän äänen nopeuteen, vaan ainoastaan voimakkuuteen siten, että sen amplitudi pienenee kuljetun matkan kasvaessa. Tämän lisäksi intensiteetin lasku riippuu taajuudesta kuten aaltoliikkeellä yleensäkin, eli korkeat taajuudet vaimenevat matalia nopeammin. Aaltoliikkeen amplitudi vaimenee eksponentiaalisesti etäisyyden x kasvaessa, noudattaen kaavaa

$$A = A_0 e^{-\mu x}, \quad (4.12)$$

missä A_0 on vaimentumaton amplitudi ja μ vaimenemiskerroin. Vaimeneminen ilmoitetaan usein myös vaimenemiskertoimen avulla desibeleinä

$$\mu = -\frac{20}{x} \lg\left(\frac{A}{A_0}\right). \quad (4.13)$$

5 Sedimentaatiokokeet

Mittausten tarkoituksena oli testata laitteen soveltuvuutta raskaan aineen sedimentaation tutkimukseen. Ensimmäisenä tavoitteena oli saada hiekka sekoittumaan tasaisesti koko vesimäärään, jolloin konsentraation alkutilanne ϕ_0 olisi tarkasti tiedossa. Tämän jälkeen vajoavan hiekan nopeusprofiilien mittaaminen neljällä anturilla ja sopivin DOP2000-laitteeseen syötettävien parametrein voisi olettaa olevan melko suoraviivaista.

5.1 Valmistelu

Käytetty kiintoainemateriaali oli suhteellisen hienoa, kivipohjaista hiekkaa. Koska hiekka noudettiin suoraan luonnosta, ei se sellaisenaan ollut sopivaa kokeisiin käytettäväksi. Seuraavassa selvitetään toimenpiteet, joilla hiekka saatiin ensin jaettua sopivan kokoisiksi fraktioiksi ja tämän jälkeen määritettyä tiheydet kullekin kokojakaumalle.

5.1.1 Hiekan fraktiointi

Koska partikkeleiden vajoamisnopeus riippuu kappaleen tiheydestä ja koosta, päätettiin käsittelemätön hiekka jakaa sopiviin jakeisiin, eli fraktioihin. Tämä toteutettiin valitsemalla neljä eri kokoista sihtiä, jotka kasattiin päällekkäin siten että sihtien silmäkoko pieneni aina alaspäin siirryttäessä. Sihtien suuruudeksi valittiin $90\ \mu\text{m}$, $250\ \mu\text{m}$, $500\ \mu\text{m}$ ja $1000\ \mu\text{m}$, joista kasattu ”torni” siirrettiin laitteeseen, minkä toiminta perustuu nopeaan pystysuunnassa tapahtuvaan edestakaiseen liikkeeseen. Tämän jälkeen ylimpään sihtiin mitattiin sopiva annos kuivaa hiekkaa ja laitteen annettiin toimia noin 5 minuuttia, jonka jälkeen eri fraktiot kerättiin talteen.

5.1.2 Hiekan tiheyden määrittäminen

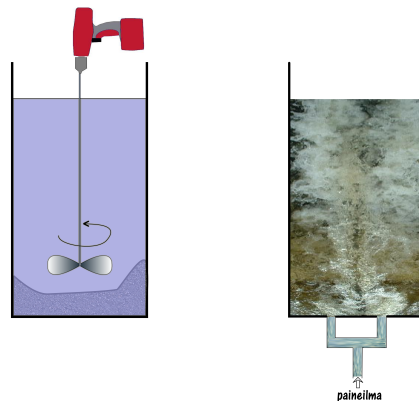
Kunkin fraktion tiheys määritettiin mittalasin ja vaa’an avulla. Aluksi mittalasiin lisättiin riittävästi vettä, jonka jälkeen veden sekaan sekoitettiin 10 ml hiekkaa. Tämän jälkeen vesi haihdutettiin seoksesta uunissa ja jäljelle jääneen kuivan hiekan massa punnittiin vaa’alla. Kullekin jakeelle tehtiin 10

Taulukko 5.1: Käytetyn hiekan ominaispaino ρ fraktioittain.

Fraktio [μm]	ρ [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$]
90-125	2468
125-250	2480
250-500	2628
500-1000	2787

mittausta, joista lopulliseksi fraktion tiheydeksi laskettiin aritmeettinen keskiarvo. Määritetyt tiheydet on koottu taulukkoon 5.1.

5.2 Sekoitusmenetelmä



Kuva 5.1: Käytetyt sekoitusmenetelmät poikkileikkauskuvina. Molemmissa veteen lisätty hiekkamäärä saadaan jotakuinkin sekoittumaan veteen, mutta turbulenssin vahvistuessa myös pyörteiden vaimeneminen hidastuu merkittävästi.

Koska aiemmissa laitteistolla suoritetuissa suotautumiskokeissa kuidut sekoitettiin onnistuneesti porakoneeseen liitetyllä sekoittimella, oli vastaava menetelmä looginen tapa yrittää saada myös hiekka jakautumaan homogeenisesti koko vesitilavuuteen. Sekoittamisessa lähtökohtana on paitsi kiintoaineen sekoittuminen, myös väliaineen, eli veden, liikkeen vaimeneminen ennen mittauksen aloittamista. Sekoitusmenetelmän osalta huomattiin varsin

Taulukko 5.2: Sekoitusmenetelmällä suoritettut sedimentaatiokokeet.

Käytetty hiekka		DOP2000 asetukset		
Fraktio	ϕ [%]	Lähetysteho	PRF [μ s]	Emissioiden lkm
90-125	0,9	high	478	128
125-250	0,15	high	478	200
125-250	0,29	high	478	200
125-250	0,43	high	928	200
125-250	0,55	high	928	200

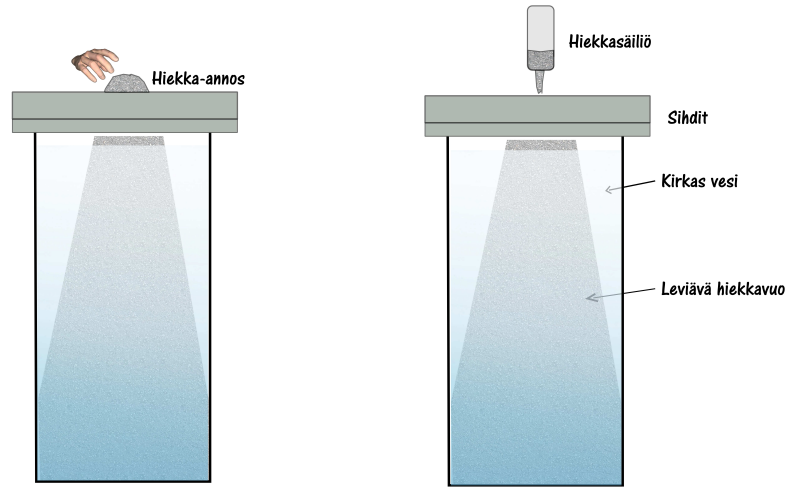
nopeasti, että jo varsinainen hiekan sekoittuminen oli heikkoa. Tämän seurauksena käyttöön otettiin paineilmasekoitus, jolla sekoitus kylläkin onnistui silmämääräisesti, mutta veteen aiheutetun turbulenssin vaimeneminen kesti kohtuuttoman kauan, jotta hiekan nopeusprofiilien määrittäminen seisovassa vedessä olisi mahdollista. Periaatekuvat kahdesta käytetystä sekoitusmenetelmästä on esitetty kuvassa 5.1.

Sekoitusongelmista johtuen mittauksia suoritettiin vain kahdelle pienimmälle ja samalla tiheydeltään alhaisimmalle fraktiolle. Pienimmän jakeen sekoituksessa ilmeni lisäksi, että sitä pääsi suhteellisen paljon viiran läpi, joka viittaa siihen ettei kyseinen fraktio ollut kivi-, vaan savipohjaista materiaalia. Tästä syystä pienimpään jakeeseen ei juurikaan panostettu, vaan esimerkin vuoksi suoritettiin mittauksia ainoastaan konsentraatiolle 0,9%. Suuremmalle, 125 – 250 μ m fraktiolle, mittauksia suoritettiin konsentraatioilla 0,15 %, 0,29 %, 0,43 % ja 0,55 %. Sekoitusmenetelmänä käytettiin paineilmaa ja sekoitinta siten, että sekoittimella pyrittiin saamaan ensin hiekka nousemaan viiran pinnalta ja viimeistely suoritettiin paineilmalla. Sekoitusmenetelmällä suoritettavat kokeet ja niissä käytetyt tärkeimmät mittausparametrit löytyvät taulukosta 5.2. Kuitenkin, kuten todettua, tulee näiden kokeiden tuloksiin asennoitua sillä varauksella, että myös vedessä on ollut liikehdintää mittauksen aikana.

5.3 Sirottelumenetelmä

Koska sekoitusmenetelmien osalta ilmeni niin suuria käytännön ongelmia, suoritettiin mittaukset pääosin sirottelumenetelmällä. Sirottelumenetelmässä ideana oli nostaa ensin vesi lähestulkoon nousuputken yläreunaan saakka

ja saada tämän jälkeen pudotettua hiekkaa pinnan yläpuolelta mahdollisimman tasaisesti koko nousuputken poikkipinta-alalle. Leviämisen edistämiseksi putken yläpäähän asetettiin kaksi sihtiä. Tämän jälkeen niiden päälle asetettiin pieni säiliö, josta hiekka sai valua vapaasti sihtien läpi veteen mittauksen aikana. Edellä mainittua tapaa on selvitetty kuvassa 5.2. Tämän lisäksi suoritettiin mittauksia myös siten, että sihtien päälle kasattiin hiekka-annos, joka käsin sekoittamalla johdettiin sihtien läpi. Sirottelumenetelmällä suoritettut kokeet on selvitetty taulukossa 5.3.



Kuva 5.2: Periaatekuva sirottelumenetelmästä, jossa kuivaa hiekkaa valutaan kahden sihdin kautta veteen. Vasemmalla sekoitus suoritetaan käsin ja oikealla hiekka valuu vapaasti pienestä säiliöstä

Sirottelumenetelmän mittauksissa tavoitteena oli saada hiekan konsentraatio pysymään suhteellisen alhaisena, jotta yksittäisiä partikkeleita voitaisiin pitää lähes vapaina kappaleina. Konsentraatiolle saadaan approksimaatio olettamalla hiekan olevan tasaisesti jakautuneena koko nousuputken poikkipinta-alalle vajoamisen aikana. Mikäli vajoamismatka vedessä on h , vajoamisen kuluva aika t ja hiekan sirottelu-aika veteen T , saadaan koko nestetilavuuden keskimääräiseksi konsentraatioksi tällöin

$$\phi = \frac{t}{T} \frac{V_s}{V_s + V_f} = \frac{t}{T} \frac{1}{1 + \frac{V_f}{V_s}} = \frac{v_t/h}{T} \frac{1}{1 + \alpha}, \quad (5.1)$$

5 SEDIMENTAATIOKOKKEET

missä $\alpha = \frac{\frac{1}{4}\pi h d^2}{m}$. Edellä V_s = sirotellun hiekan tilavuus, V_f = veden tilavuus v_t = hiekan terminaalinopeus, m = sirotellun hiekan massa, ρ = hiekan tiheys ja d = putken halkaisija.

Tällöin tavanomaiselle mittauskerralle, jolle $h = 50$ cm, $\rho = 2628 \frac{kg}{m^3}$, $T \approx 9$ s ja $t \approx 4,2$ s ja $m = 50$ g, saadaan $\phi = 0,09$ %.

Varsinkin käsin sirottelemalla (kuva 5.2) hiekan saaminen veteen täysin taiseisesti ja siten, että sirottelu-aika olisi pysynyt vakiona jokaisessa mittauksessa, osoittautui varsin haasteelliseksi. Tästä syystä sirottelumenetelmän tapauksessa ei ole mielekäästä edes pyrkiä ilmoittamaan tarkkaa konsentraatiota, vaan kullekin mittaukselle tyydytään toteamaan konsentraation olleen noin 0,06 – 0,12 %.

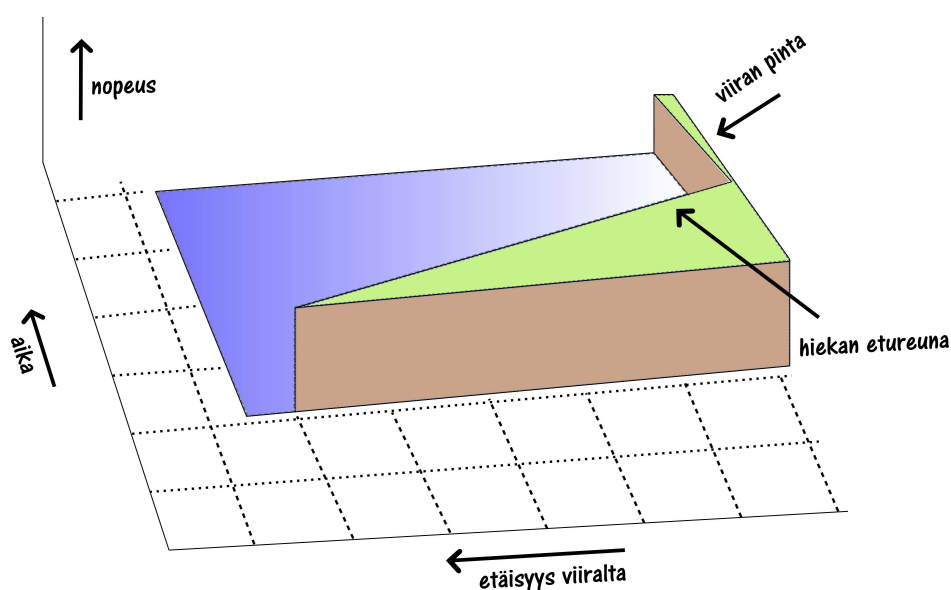
Taulukko 5.3: Sirottelumenetelmällä suoritettut sedimentaatiokokeet.

Käytetty hiekka		DOP2000 asetukset		
Fraktio	ρ [$\frac{kg}{m^3}$]	Lähetysteho	PRF [μs]	Emissioiden lkm
90-125	2468	high	478	128
125-250	2480	high	478	128
250-500	2628	high	528	140
250-500	2628	high	94	150
250-500	2628	high	478	50
250-500	2628	medium	394	128
250-500	2628	medium	478	50
500-1000	2787	medium	94	250
500-1000	2787	high	94	150
500-1000	2787	high	478	128
500-1000	2787	medium	580	100
500-1000	2787	medium	478	50
500-1000	2787	medium	480	100

6 Data-analyysi ja tulokset

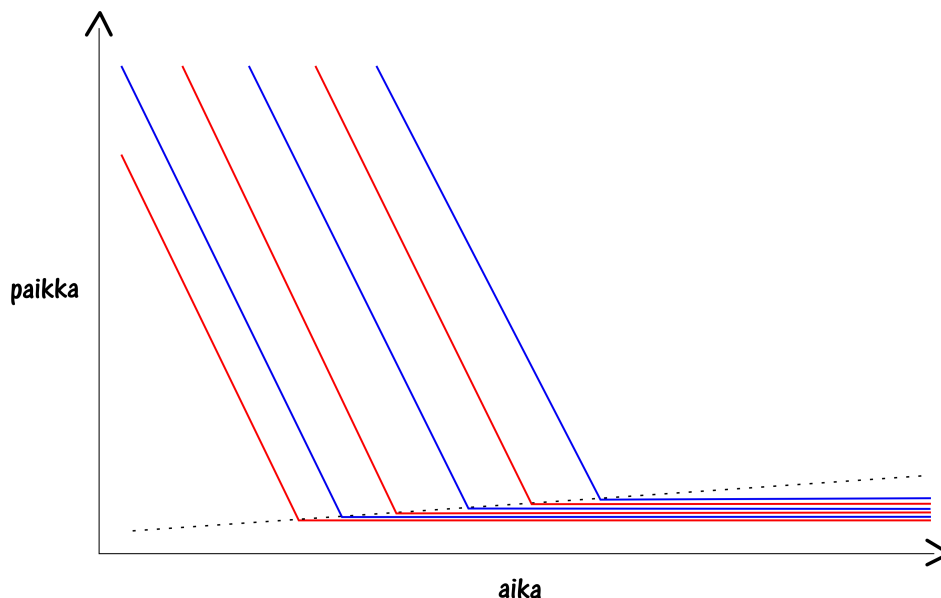
6.1 Kuvaajista

6.1.1 Nopeuspinta



Kuva 6.1: Homogeenisen materiaalin vajoamista kuvaava nopeuspinta ideaalitulanteessa.

Mittauksista saatavan nopeuspinnan tulisi olla kuvan 6.1 kaltainen. Kuvassa vihreä kuvaa pisteitä, joille $v = 0$ ja sininen puolestaan nopeuksia $v < 0$. Kuvaan merkitty hiekan etureuna, eli sinisen ja vihreän värin raja, ilmaisee ensimmäisen kaikua antavan kohteen paikan ajan funktiona. Toisin sanoen hiekan etureunan kulkeman radan kulmakerroin on sama kuin kyseiselle hiukkaselle mitattu nopeus. Tämän lisäksi viiran pinnalle kerääntyvä hiekka näkyy vihreän osan suurenemisena. Vaihtoehtoisesti pinta voi tuki olla aivan tasainenkin ilman hiekan etureunaa, mikäli mittaus on aloitettu myöhemässä vaiheessa.



Kuva 6.2: Siirtymäviivat ideaalitulanteessa.

6.1.2 Kaiku

Kuten jo aiemmin todettua, muodostaa mittalaitteisto lopulliset nopeusprofiilit rekisteröityjen kaikujen pohjalta. Mittauksen aikainen paikallinen kai'un amplitudi tallentuu etumerkillisenä 8 bittisenä kokonaislukutyypinä (int8), saaden arvoja väliltä $[-128,127]$. Mikäli kaiku on heikko saaden arvoja lähellä nollaa, on syynä joko liian pieni konsentraatio, tai vaihtoehtoisesti äänen vaimeneminen viiralle jo kasaantuneen hiekan johdosta ja tällöin myöskään nopeuden määrittäminen kyseisessä pisteessä ei välttämättä ole mahdollista.

6.1.3 Siirtymäviivat

Partikkeleiden kulkemaa rataa, eli siirtymäviivoja on esitetty kuvassa 6.2. Taisaisella nopeudella vajoavalle partikkelille siirtymäviiva on aina suora. Lisäksi massan säilymisestä siirtymäviivoilla seuraa, etteivät ne leikkaa toisiaan. Koska hiekassa olevat partikkelit eivät kykene muodostamaan keskenään varsinaista rakennetta, toisin kuin esimerkiksi kuidut, on hiekan siirtymäviivo-

jen kohta, missä hiukkaset saavuttavat viiran, aina terävä. Mikäli vajoamista tarkastellaan jollain tietyllä jakaumalla erilaisia kappaleita, näkyy se luonnollisestikin myös siirtymäviivojen muodossa. Tällöin siirtymäviivat eivät ole suoria ja niiden satunnaisia leikkauksia voidaan havaita.

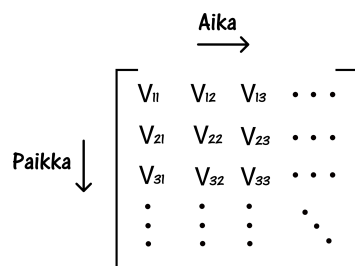
6.2 Analyysi

Datan numeerinen käsittely suoritettiin Matlab-ohjelmalla. Jokaiselle käsittelylle mittaustapahtumalle suoritettiin kevyt suodatus, jonka tarkoituksena oli pääasiassa poistaa huomattavasti ympäristöstään poikkeavat mittausarvot. Saadut kuvaajat, sekä esitetyt suureet laskettiin ilman suuria keskiarvoistamismenetelmiä, jonka seurauksena mahdolliset tekniset ongelmat saadaan paremmin esiin. Jatkossa esiteltävät kuvaajat ja lasketut suureet tuottaneet Matlab-koodit on esitetty liitteessä C. Seuraavassa käydään läpi analyysi fraktion 500 – 1000 μm sirottelumenetelmälle. Muiden mittauskertojen graafeja on esitetty sekoitusmenetelmän osalta liitteessä A ja sirottelumenetelmälle liitteessä B.

6.2.1 Datan suodatus ja siirtymäviivat

DOP2000- mittalaite tallentaa mittaustulokset binäärimuodossa, joten aivan ensimmäinen vaihe tulosten käsittelyssä on ”lukea” tallennettu data kymmenlukupöytäjärjestelmään Sanna Haaviston *Matlab*-ohjelmalle kirjoittaman rutiinin **BinDop.m** avulla. Tämän jälkeen antureiden mittaamista arvoista muodostetaan yksi nopeusmatriisi, missä yksittäiset profiilit tallennetaan kukin omaan sarakkeeseensa kuvan 6.3 mukaisella tavalla. Koska mittauksissa hiekka lähenee kohtisuorasti antureita, antaa laite mitatut nopeudet negatiivisina.

Varsinaiseen nopeusmatriisiin suodatukseen sovelletaan Matlabin valmista **filter**-mediaanisuuodinta, jonka tyypillinen käyttökohde on juuri kohinanpoisto. **Medfilt2**-suodin on luonteeltaan mediaanisuuodin, joka operoi $[n,m]$ kokoisen, liukuvan ikkunan alalla laskien kullekin solulle sen ympäristön mediaaniarvon [25]. Mediaanisuuotimen etuna verrattuna vaikkapa keskiarvoistavaan suotimeen on sen kyky säilyttää mahdolliset nopeusmatriisissa olevat jyrkät reunat (viiran pinta), sekä poistaa ympäristöstään huomattavasti poikkeavat arvot. Tämän työn osalta suotimen ympäristöksi valittiin [25,5] matriisi, missä ensimmäinen indeksi (25) viittaa paikkaan ja jälkimmäinen



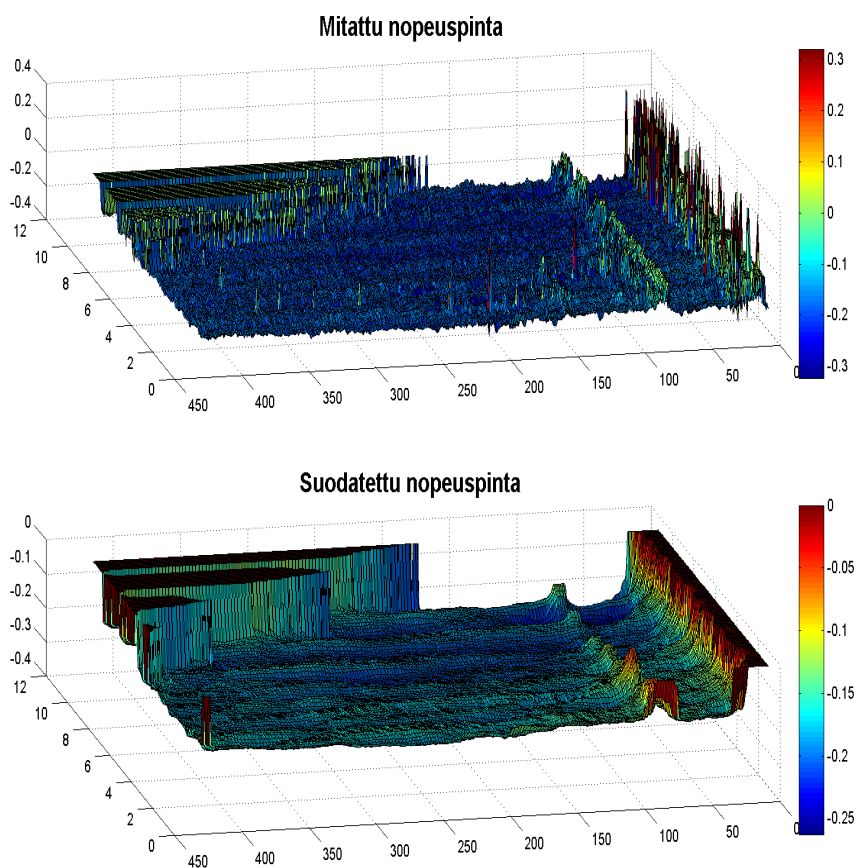
Kuva 6.3: Nopeusmatriisi, jossa rivit kuvaavat mittausikkunoiden paikkaa ja sarakkeet aikaa.

(5) aikaan. Suuren matriisin valintaa voidaan perustella kappaleessa (3) tarkastelluilla hiukkasten terminaalinopeuksilla, minkä nojalla hiekan liike on tasaista koko mittausalueella. Aikasunnassa suodatusikkunan kokoa on pienennetty, jotta mahdolliset mittaukseen liittyvät, mekaanisten toimien seurauksena syntyvät, virheet eivät häviäsi liikaa. Esimerkki nopeusmatriisin käsittelystä fraktion $500 - 1000 \mu m$ sirottelumeneelmälle on kuvassa 6.4.

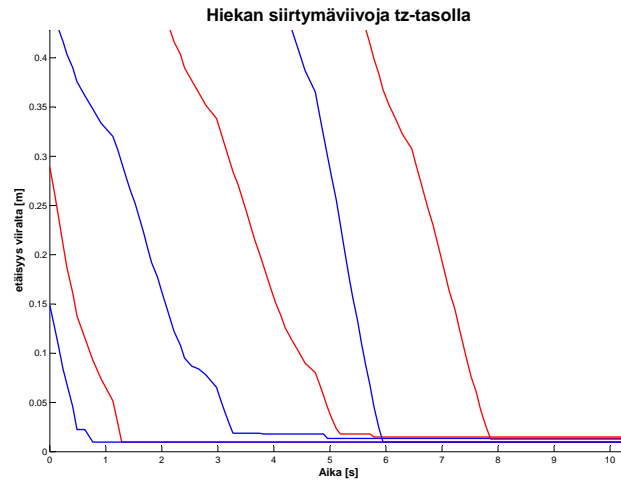
Suodatetun nopeusmatriisin pohjalta hiukkasten kulkemat radat lasketaan yhtälöstä $\frac{dz}{dt} = v(z,t)$ avulla, josta fraktion $500 - 1000 \mu m$ sirottelumeneelmälle muodostettu esimerkki löytyy kuvasta 6.5. Kyseisen mittauksen antanut kaikuprofilipinta puolestaan on esitetty kuvassa 6.6. Kuvasta nähdään, miten kaikuprofiilin amplitudi pienenee viiralle kertyneen hiekan johdosta. Lisäksi huomataan anturikohtaisia eroja siten, että ensimmäisen anturin mitaama kaiku on selvästi muita voimakkaampaa.

6.2.2 Terminaalinopeus, Reynoldsin luku ja vastuskerroin

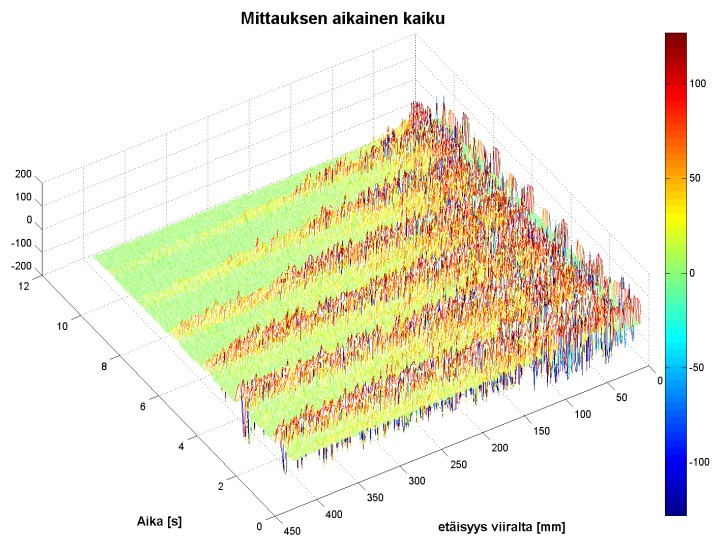
Terminaalinopeus määritetään suodatetun nopeusmatriisin kaikkien hiukkasten vajoamisnopeudeksi tulkittavien alkiodien keskiarvona. Tätä varten nopeusmatriisista poimitaan kaikki alkiot $v_{i,j}$, jolle $-1,5 V_{max} < v_{i,j} < 0,5 V_{min}$, missä V_{max} on Stokesin lain mukainen nopeus käytetyn fraktion suurimmille ja V_{min} puolestaan pienimmille hiukkasille. Tällöin esimerkiksi fraktion $250 - 500 \mu m$ rajoiksi saadaan



Kuva 6.4: Nopeuspinnan suodatus. Ylhäällä käsittelemätön nopeusmatriisista muodostettu pinta ja alempana `medfilt2`-suotimella siloitettu pinta. Kuvissa x-akseli ($0 \rightarrow 12$) kuvaa aikaa sekunneissa, y-akseli ($0 \rightarrow 450$) paikkaa millimetreissä ja z-akseli vajoamisnopeutta metreinä sekunnissa. Viiran pinta on suurinpiirtein kohdassa $y = 10$ mm.



Kuva 6.5: Yksittäisille hiekkapartikkeleille mittausdatasta laskettuja siirtymäviivoja.



Kuva 6.6: Kaikupinta esimerkkitapaukselle.

$$V_{min} = \frac{a_{min}^2(\rho_s - \rho_f)}{18 \mu_f} g = \frac{(250 \mu m)^2 \cdot (2628 - 998) \frac{kg}{m^3}}{18 \cdot 0,001 \frac{kg}{m \cdot s}} 9,81 \frac{m}{s^2} = 0,0555 \frac{m}{s}.$$

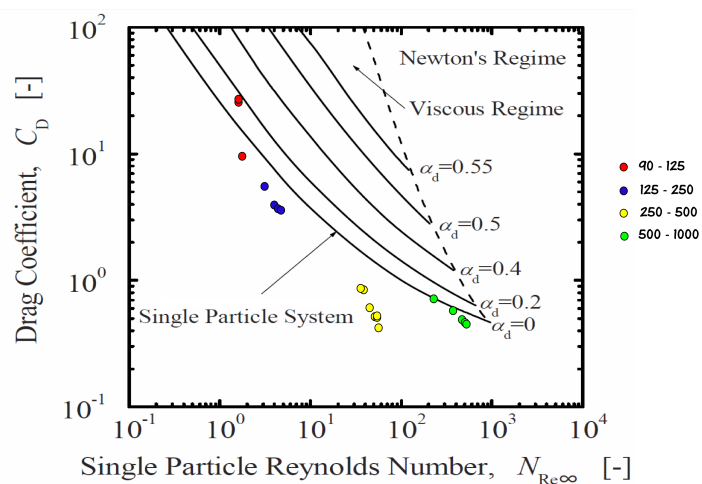
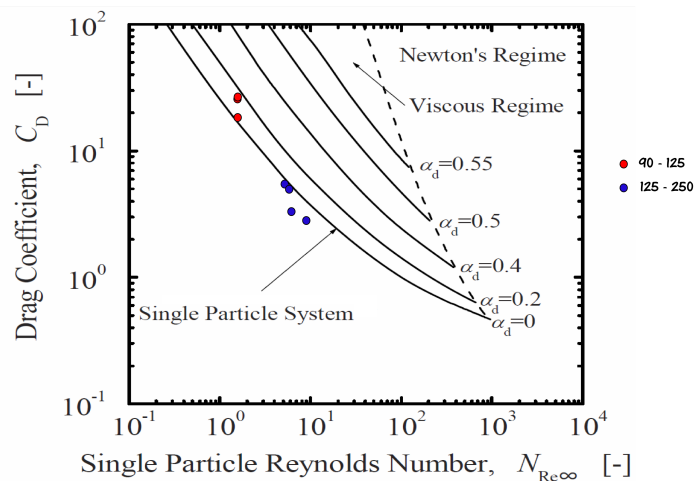
$$V_{max} = \frac{a_{max}^2(\rho_s - \rho_f)}{18 \mu_f} g = \frac{(500 \mu m)^2 \cdot (2628 - 998) \frac{kg}{m^3}}{18 \cdot 0,001 \frac{kg}{m \cdot s}} 9,81 \frac{m}{s^2} = 0,2221 \frac{m}{s}.$$

Määritetyn terminaalinopeuden v_t avulla kullekin mittaukselle lasketaan tämän jälkeen Reynoldsin luku Re_a kaavalla (3.1), sekä ratkaistaan vastuskerroin C_D yhtälöstä (3.7). Näissä molemmissa partikkelin halkaisijana käytetään kunkin fraktion keskiarvoa, esimerkiksi fraktiolle $250 - 500 \mu m$ tämä luku on $375 \mu m$.

Kullekin mittaukselle määritetyt suureet on kerätty taulukkoon 6.1. Lisäksi tulokset on lisätty kuvaan 6.7, jossa vertailudata liitteestä [26].

Taulukko 6.1: Suoritettujen sedimentaatiokokeiden tuloksia. Taulukossa ϕ = suspension konsentraatio, PRF = DOP2000-laitteen pulssintoistotaajuus, v_t = terminaalinopeus, Re_a = Reynoldsin luku ja C_D = vastuskerroin.

Fraktio	ϕ [%]	PRF [μ s]	Lähetysteho	v_t [$\frac{m}{s}$]	Re_a	C_D
Sekoitusmenetelmä						
90-125	0,90	478	high	0,013	1,4	11,7
90-125	0,90	478	high	0,013	1,4	12,4
90-125	0,90	478	high	0,013	1,4	12,5
125-250	0,15	478	high	0,027	5,0	5,1
125-250	0,29	478	high	0,029	5,5	4,4
125-250	0,43	928	high	0,034	6,3	3,2
125-250	0,55	928	high	0,050	9,4	1,4
Sirottelumenetelmä						
90-125	0,06-0,12	478	high	0,015	1,6	9,59
90-125	0,06-0,12	478	high	0,013	1,4	12,53
90-125	0,06-0,12	478	high	0,013	1,4	12,80
125-250	0,06-0,12	478	high	0,017	3,2	4,08
125-250	0,06-0,12	478	high	0,015	2,8	5,13
125-250	0,06-0,12	478	high	0,018	3,3	3,74
125-250	0,06-0,12	478	high	0,018	3,4	3,68
250-500	0,06-0,12	94	high	0,123	46	0,53
250-500	0,06-0,12	94	medium	0,101	38	0,78
250-500	0,06-0,12	394	medium	0,094	35	0,91
250-500	0,06-0,12	478	high	0,128	48	0,49
250-500	0,06-0,12	478	medium	0,140	52	0,41
250-500	0,06-0,12	528	high	0,130	48	0,48
250-500	0,06-0,12	730	medium	0,116	43	0,60
500-1000	0,06-0,12	94	high	0,196	147	0,46
500-1000	0,06-0,12	94	medium	0,192	144	0,48
500-1000	0,06-0,12	478	high	0,202	151	0,43
500-1000	0,06-0,12	478	high	0,183	137	0,52
500-1000	0,06-0,12	478	medium	0,162	121	0,67
500-1000	0,06-0,12	580	medium	0,179	134	0,56



Kuva 6.7: Mittauksien avulla määritettyjä vastuskertoimen arvoja. Ylhäällä sekoitusmenetelmän ja alhaalla sirottelumennetelmän tuloksia. Kirjallisuudesta otetun vastuskertoimen arvot määritetty pyöreille partikkeleille eri vahvuissa suspensioissa. [26]. Kuvissa esiintyvä parametri α_d = konsentraatio.

Kuten kuvasta 6.7 nähdään, ovat varsinkin fraktiolla $250 - 500 \mu\text{m}$ määritetyt vastuskertoimen arvot oletettua pienempiä. Toisin sanoen partikkelit vajoavat liian nopeasti laskettuun Reynoldsin lukuun nähden. Kuvan 3.3 nojalla hiekalle määritettyjen vastuskertoimen arvojen tulisi olla systemaattisesti vertailudatan yläpuolella, koska on selvää, että käytetyille partikkeleille muototekijä Φ on pienempi kuin yksi. Todennäköisin syy mittapisteiden sijoittumiseen on hiekan kokojakauma, sillä vastuskerroin on laskettu käyttäen kappaleen halkaisijana kunkin fraktion keskiarvoa.

7 Johtopäätökset

Työssä on selvitetty suotometrin käyttökelpoisuutta hiekan sedimentoitumisen tutkimukseen ja tulokset puoltavat laitekokonaisuuden käyttöä myös jatkossa. Saaduista tuloksista ja laitteen käytettävyydestä ei suoranaisesti löydy mitään yksittäistä syytä, miksei laite soveltuisi sedimentaatiomittauksiin. Tämän työn puitteissa saatujen tulosten puolesta on toki hyvä, että määritetyt vastuskertoimen arvot ovat järkeviä, mutta sitäkin tärkeämpänä voidaan pitää sitä, että eri mittauskerroilla saadut tulokset on käytännössä yhteneviä. Tarkkoihin mittauksiin laite ei tällaisenaan sovellu, vaan työn aikana ilmeni myös monia ongelmia, joiden tosin voi olettaa olevan ratkaistavissa.

Ensimmäisenä ongelmana työn osalta huomattiin laitteen käytettävyyteen liittyvät seikat, joista suurimpana hiekan saaminen järkevällä tavalla veteen. Selvitetystä menetelmästä on järkevintä keskittyä sirottelumenetelmän parantamiseen. Tämä seikka korostuu merkittävällä tavalla kiintoaineen tiheyden kasvaessa. Todennäköisesti helpoin tapa toteuttaa sirottelu on putken yläpuolelle sijoitettava, sopivalla automaatiojärjestelmällä toimiva, sirottelu-yksikkö. Itse käytön kannalta laitetta oli helppo ja nopea käyttää vedenpinnan noston, sekä putkiosan irroitusmekanismin ansiosta.

Kuten ennen työn aloittamistakin oli tiedossa, on pulssitetun ultraääni doppler-menetelmän soveltuvuus hiekan nopeusprofiilien mittaamiseen yksi työn oleellisimmista asioista. Mittauksissa ilmeni hyvin, kuinka laitteiston suurimmat heikkoudet piilevät kaikusignaalin vahvistusprofiilin (TGC) säädössä. Varsinkin tässä työssä käytetyn DOP2000 mittalaitteen, mallin 2032, vahvistusprofiilin säätöjä ei ollut mahdollista tehdä anturikohtaisesti, vaan kaikille antureille tuli etsiä paras yhteisesti toimiva. Lisäksi vahvistuksen säädössä ongelmana oli mittauksen alussa vahvistusprofiilin ylimeno ja toisaalta vaimentavan hiekkakerroksen aiheuttama nopeahko vaimeneminen, mikä varmasti korostuu konsentraation kasvaessa. Mikäli tehokasta mittausaikaa halutaan pidentää, on ainoa vaihtoehto ajasta riippuva ja anturikohtainen vahvistuksen säätö.

Mikäli mittausjärjestelyn fysikaalista tilannetta halutaan muuttaa, voisi eräs ratkaisu olla veden korvaaminen jollain toisella nesteellä. Vaihtoehtoisen nesteen tulisi olla vettä viskoottisempaa, kuitenkin newtonista, ainetta. Eräs helposti saatavilla ja fysikaalisilta ominaisuuksiltaan kysymyksen tuleva neste tähän tarkoitukseen voisi olla vaikkapa glyseroli.

Saatujen tulosten puolesta laitteiston testaus vaikuttaa kuitenkin onnistu-

neelta. Saadut nopeuspinnat ja niiden kautta lasketut siirtymäviivat ovat pääasiallisesti järkeviä. Lisäksi määritetyt vastuskertoimen arvot ovat oikeassa kokoluokassa, joten lopullisena yhteenvedona tämän työn osalta voidaan todeta, että laitteistolla kyetään mittaamaan sedimentoituvan hiekan nopeusprofileja. Suotautumislaitteistosta menee tosin varsin suuri osa käytännössä täysin hukkaan. Tällä tarkoitetaan sitä, että vastaavat kokeet olisi, ainakin periaatteessa, mahdollista suorittaa myös tavanomaisessa ja riittävän suuressa muoviputkessa, jonka pohjalle asetetaan haluttu määrä ultraääniantureita.

Viitteet

- [1] A. J. Wilson. *The living Rock: The Story of Metals Since Earliest Times and Their Impact on developing civilization*. Woodhead Publishing Ltd (1994).
- [2] G. Agricola. *De Re Metallica*. Translated from the first latin edition of 1556 by H.C Hoover and L.H. Hoover(1912).
- [3] F. Concha and R. Bürger. *A Century of Research in Sedimentation and Thickening*. KONA No. **20** (2002).
- [4] R.T. Mishler. *Settling slimes at the Tigre Mill*. Eng. Min. J **94** (1912).
- [5] A. Clarck. *A note of settling of slimes*. Eng. Min. J. **99** (1915).
- [6] H.S. Coe and G.H Clevenger. *Methods for determining the capacity of slimesettling tanks*. Trans. AIME **55** (1916).
- [7] E.W. Comings. *Thickening calcium carbonate slurries*. Ind. Eng. Chem. **32** (1940).
- [8] E.J. Roberts. *Thickening - art or science?* Mining Eng. **1** (1949).
- [9] E.W. Comings, C.E. Pruis and C.De Bord. *Continuous settling and thickening*. Ind. Eng. Chem. **46** (1954).
- [10] G.J. Kynch. *A theory of sedimentation*. Trans. Faraday Soc. **48** (1952).
- [11] P.T. Shannon and E.M. Tory. *Settling of slurries*. Ind. Eng. Chem. **57** (1965).
- [12] J.J. Pop and R.M. Bowen. *A Theory of Mixtures With a Long Range Spatial Interaction*. Aeta Mechanica **29** (1978).
- [13] S. Kokko. *Laskeutus ja suodatus yksikköprosesseina - Yksikköprosessien käyttö paperiteollisuuden laitteissa*. Sisäinen raportti, Oulun Yliopisto (2004).
- [14] G. R. Thompson and J. Turk. *Introduction to physical geology*. Brooks Cole, 2. edition (1997).
- [15] R. Darby. *Chemical engineering fluid mechanics*. Second edition, revised and expanded. Marcel Dekker, Inc.(2001).

- [16] F. White. *Fluid mechanics*. 6th edition. McGraw-Hill companies, New York (2008).
- [17] M. Rhodes. *Introduction to Particle Technology*. 2nd edition. Wiley (2008).
- [18] M. Kataja and P. Hirsilä. *Application of ultrasound anemometry for measuring filtration of fibre suspension*. The Science of Papermaking. Transactions of the 12th Fundamental Research Symposium. Vol. 1. C.F. Baker(ed.). Oxford, September 2001. The Pulp and Paper fundamental Research Society, UK, (2001).
- [19] M. Kataja(ed.), S. Haavisto. *Application of ultrasound anemometry for measuring filtration of fibre suspensions: effect of fibre and pulp properties*. Rheological matters in process industry, ReoMat final report, VTT research notes 2048, Espoo (2008).
- [20] M. Messer. *Pulsed ultrasonic doppler velocimetry for measurement of velocity profiles in small channels and capillaries*. Georgia Institute of Technology (2005).
- [21] <http://www.signal-processing.com>. (Luettu 14. joulukuuta 2011).
- [22] H. D. Young and R.A. Freedman. *University physics with modern physics*, 11th edition, Pearson Addison-Wesley (2004).
- [23] *DOP2000 User's manual, model 2125/2032*. Signal processing S. A. Switzerland (2000).
- [24] G. Y. Kim, M. D Richardson, D. L. Bibee, D. C. Kim, R. H. Wilkens, S. R Shin, S. T. Song. *Sediment types determination using acoustic techniques in the Northeastern Gulf of Mexico*, Geosciences Journal **8** (2004).
- [25] <http://www.mathworks.com/help/techdoc/ref/filter2.html>.(Luettu 14. joulukuuta 2011).
- [26] M. Ishii and T. Hibiki. *Thermo-fluid dynamics of two-phase flow*, second edition, Springer (2011).

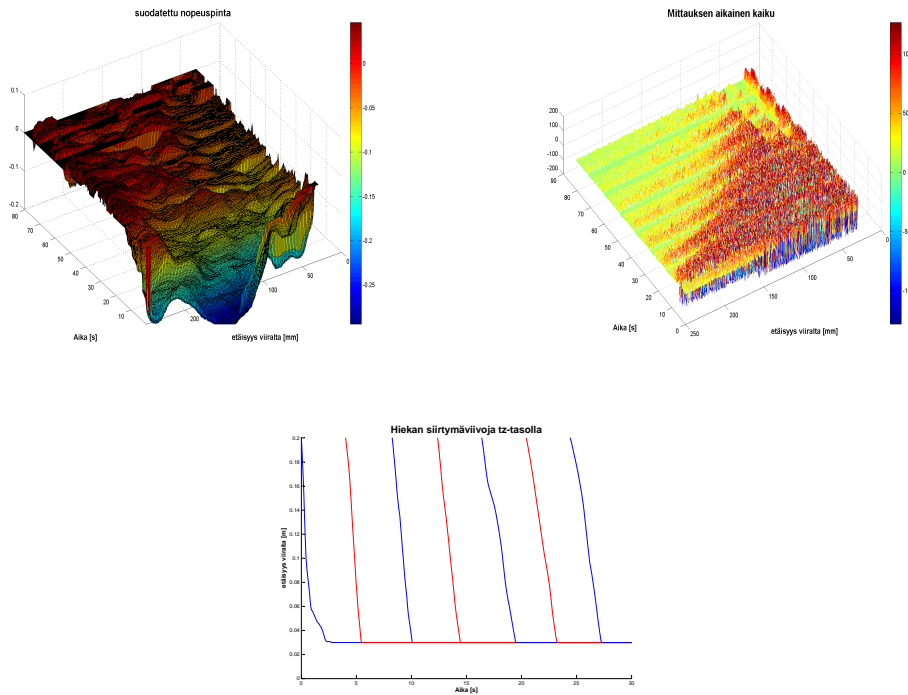
Seuraaviin liitteisiin A ja B on koottu esimerkkejä mittauksista, alkaen sekoitusmenetelmästä ja päättyen sirottelumenetelmän graafeihin. Kustakin mittauksesta on kerrottu oleellimmat DOP2000 -mittalaitteessa käytetyt parametrit sivun ylälaidan taulukossa. Varsinaiset graafit esittävät suodatettua nopeuspintaa, mittauksen aikaista kaikua, sekä partikkeleiden siirtymäviivoja. Muut mahdolliset huomiot, kuten sekoitusmenetelmän konsentraatio on kerrottu erikseen kuvatekstissä (sirottelumenetelmälle $\phi = 0,06 - 0,12\%$). Huomionarvoista kuvissa on, että siirtymäviivoja on pyritty piirtämään nopeusprofiilin osalle, jossa kaiku ei ole pahoin vaimentunut. Toisinsanoen siirtymäviivojen kuvaajissa aika-akseli on pienempi kuin nopeuspintojen graafeissa.

Työssä käytetyt Matlab -koodit löytyvät liitteestä C.

A Esimerkkejä sekoitusmenetelmästä

A.1 90-125 μm

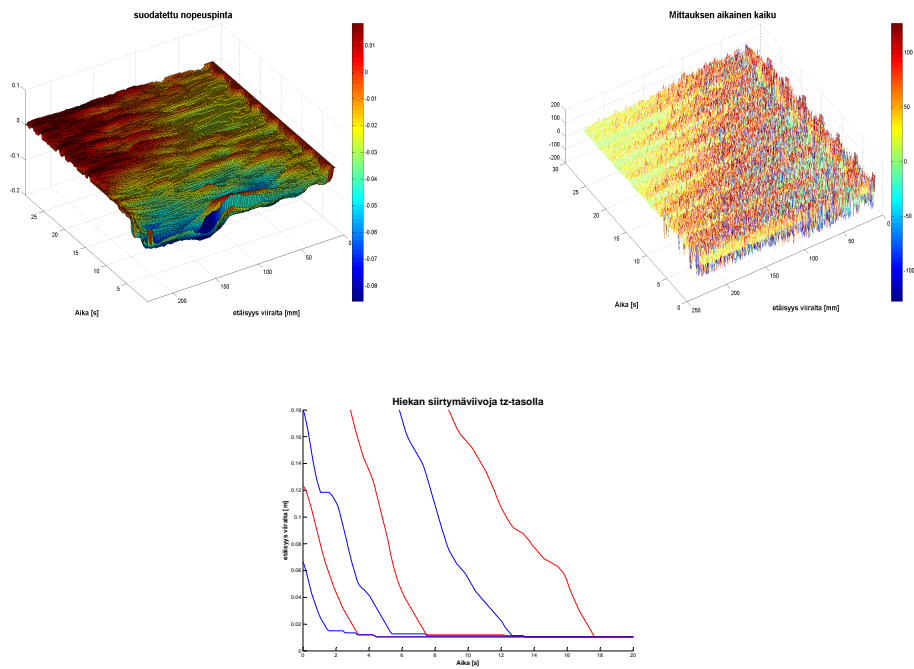
Recorded data type	velocity and echo
Nb of channel	4
Data recorded after trigger	Yes
Emission	
power	high
frequency	4000 KHz
burst length	4
PRF	478 μs
Reception	
number of gates	294
resolution	1000 ns
emissions/profile	128
Memory	
number of profiles	1120
skipped profiles	0



Kuva A.1: Sekoitusmenetelmä fraktiolla 90-120 μm , kun $\phi=0,9\%$. Vasemmalla suodatettu nopeuspinta, jonka vieressä mittauksen aikainen kaiku. Alhaalla nopeusprofilista lasketut hiekan siirtymäviivat.

A.2 125-250 μm

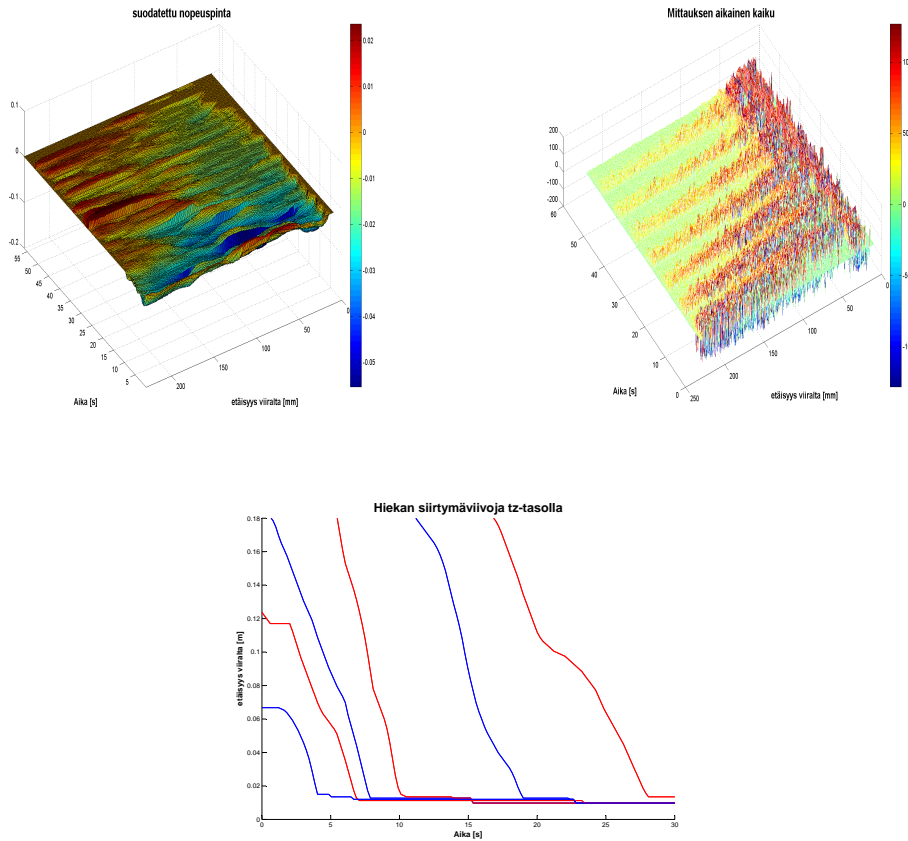
Recorded data type	velocity and echo
Nb of channel	4
Data recorded after trigger	Yes
Emission	
power	high
frequency	4000 KHz
burst length	4
PRF	478 μs
Resepition	
number of gates	294
resolution	1000 ns
emissions/profile	200
Memory	
number of profiles	280
skipped profiles	0



Kuva A.2: Sekoitusmenetelmä fraktiolla 125-250 μm , kun $\phi = 0,15\%$. Vasemmalla suodatettu nopeuspinta, jonka vieressä mittauksen aikainen kaiku. Alhaalla nopeusprofiilista lasketut hiekan siirtymäviivat.

A ESIMERKKEJÄ SEKOITUSMENETELMÄSTÄ

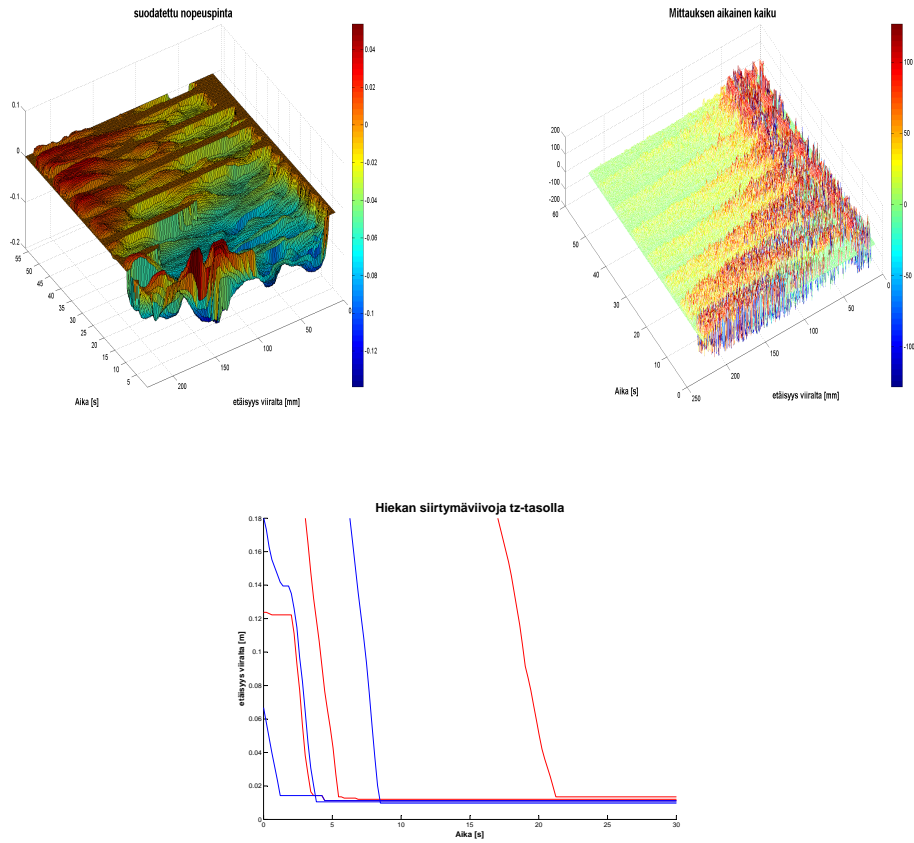
Recorded data type	velocity and echo
Nb of channel	4
Data recorded after trigger	Yes
Emission	
power	high
frequency	4000 KHz
burst length	4
PRF	478 μs
Reception	
number of gates	294
resolution	1000 ns
emissions/profile	200
Memory	
number of profiles	280
skipped profiles	0



Kuva A.3: Sekoitusmenetelmä fraktiolla 125-250 μm , kun $\phi = 0,29 \%$. Vasemmalla suodatettu nopeuspinta, jonka vieressä mittauksen aikainen kaiku. Alhaalla nopeusprofilista lasketut hiekan siirtymäviivat.

A ESIMERKKEJÄ SEKOITUSMENETELMÄSTÄ

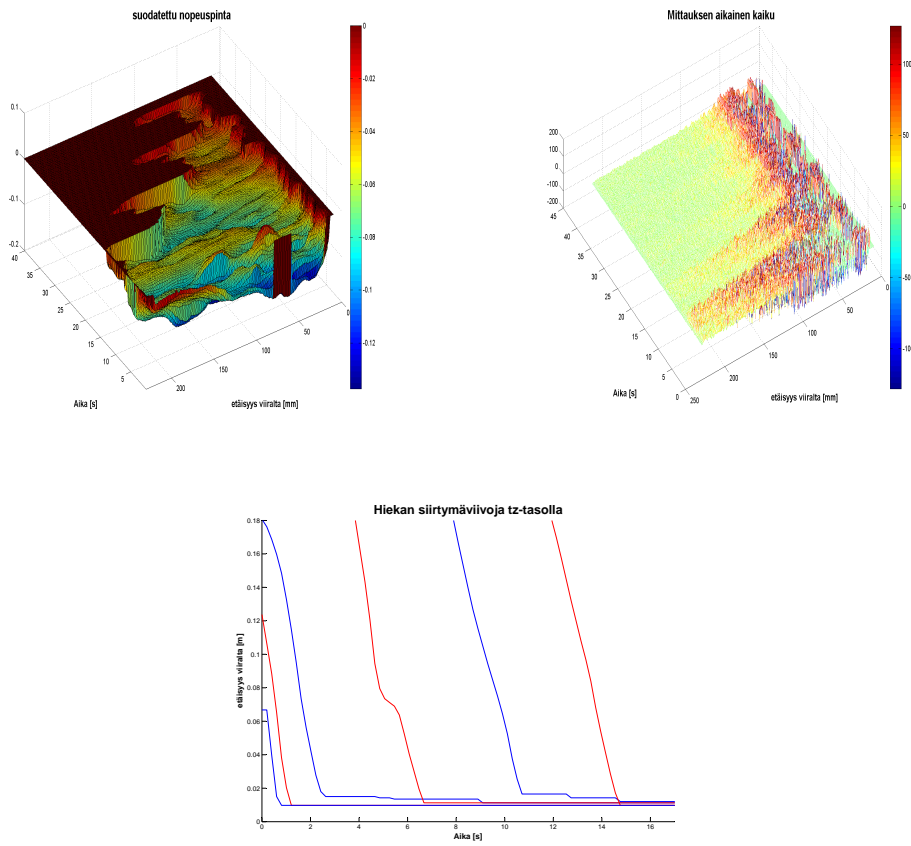
Recorded data type	velocity and echo
Nb of channel	4
Data recorded after trigger	Yes
Emission	
power	high
frequency	4000 KHz
burst length	4
PRF	927 μs
Reception	
number of gates	294
resolution	1000 ns
emissions/profile	200
Memory	
number of profiles	280
skipped profiles	0



Kuva A.4: Sekoitusmenetelmä fraktiolla 125-250 μm , kun $\phi = 0,43 \%$. Vasemmalla suodatettu nopeuspinta, jonka vieressä mittauksen aikainen kaiku. Alhaalla nopeusprofiilista lasketut hiekan siirtymäviivat.

A ESIMERKKEJÄ SEKOITUSMENETELMÄSTÄ

Recorded data type	velocity and echo
Nb of channel	4
Data recorded after trigger	Yes
Emission	
power	high
frequency	4000 KHz
burst length	4
PRF	927 μs
Reception	
number of gates	294
resolution	1000 ns
emissions/profile	200
Memory	
number of profiles	200
skipped profiles	0

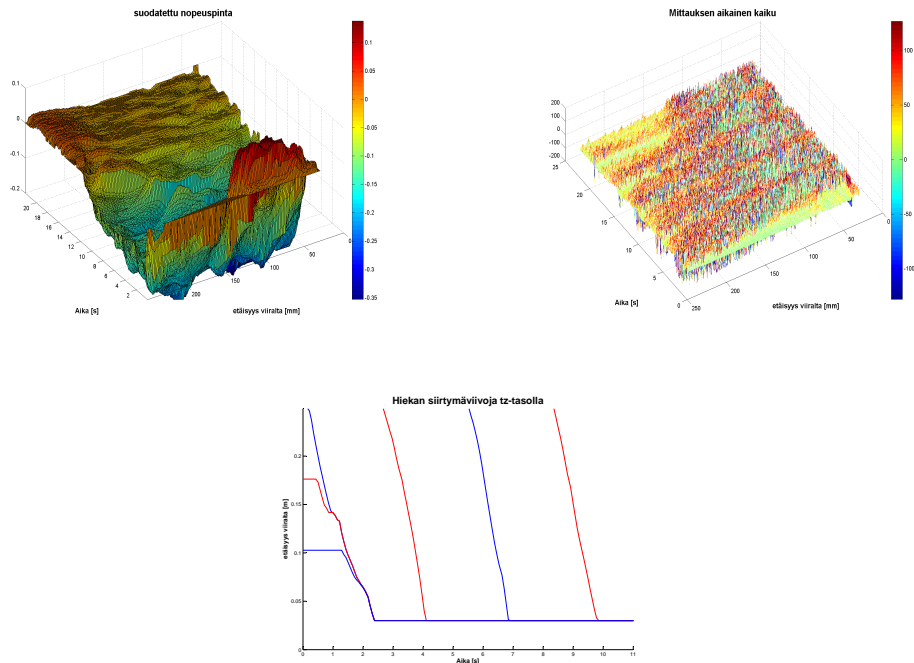


Kuva A.5: Sekoitusmenetelmä fraktiolla 125-250 μm , kun $\phi = 0,55 \%$. Vasemmalla suodatettu nopeuspinta, jonka vieressä mittauksen aikainen kaiku. Alhaalla nopeusprofilista lasketut hiekan siirtymäviivat.

B Esimerkkejä sirottelumenetelmästä

B.1 90-125 μm

Recorded data type	velocity and echo
Nb of channel	4
Data recorded after trigger	Yes
Emission	
power	high
frequency	4000 KHz
burst length	4
PRF	478 μs
Reception	
number of gates	294
resolution	1000 ns
emissions/profile	128
Memory	
number of profiles	300
skipped profiles	0

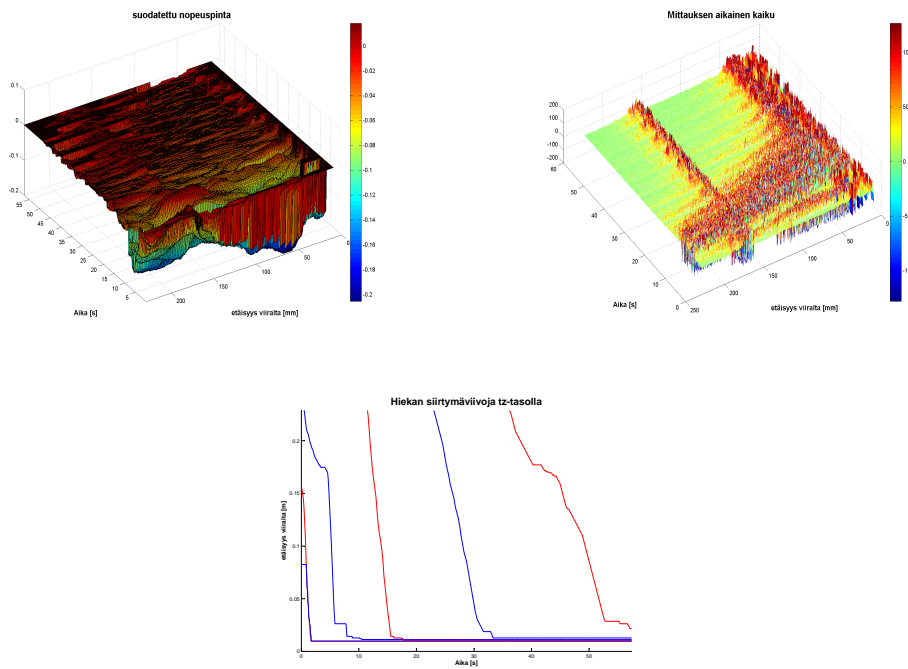


Kuva B.1: Sirottelu fraktiolle 90-120 μm . Vasemmalla suodatettu nopeuspinta, jonka vieressä mittauksen aikainen kaiku. Alhaalla nopeusprofiilista lasketut hiekan siirtymäviivat.

B.2 125-250 μm

Taulukko B.1: BINWDOPV4.06.1 Main parameters.

Recorded data type	velocity and echo
Nb of channel	4
Data recorded after trigger	Yes
Emission	
power	high
frequency	4000 KHz
burst length	4
PRF	478 μs
Reseption	
number of gates	294
resolution	1000 ns
emissions/profile	128
Memory	
number of profiles	800
skipped profiles	0

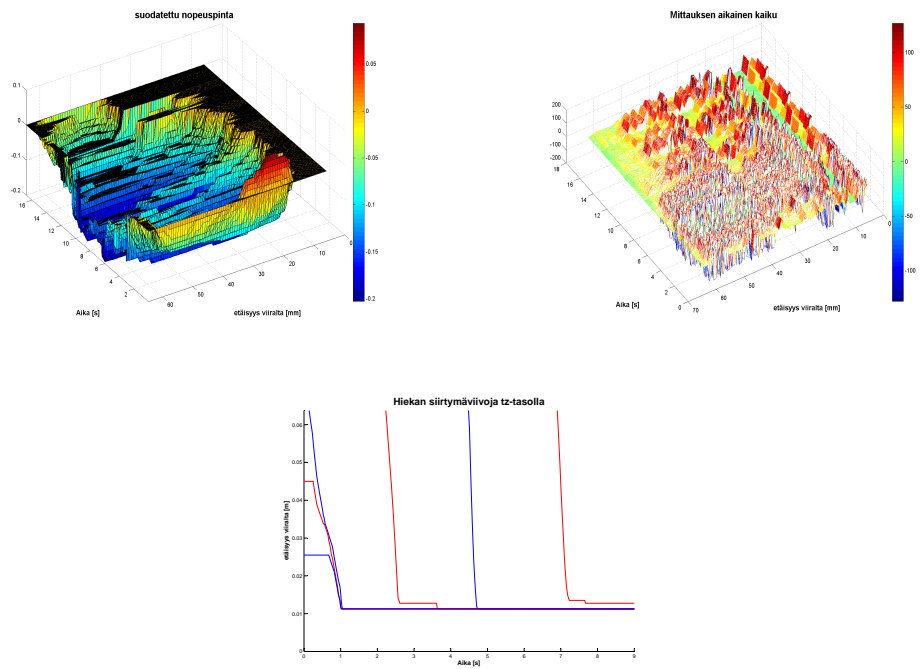


Kuva B.2: Sirottelumenetelmä fraktiolla 125-250 μm . Vasemmalla suodatettu nopeuspinta, jonka vieressä mittauksen aikainen kaiu. Alhaalla nopeusprofiilista lasketut hiekan siirtymäviivat.

B.3 250-500 μm

Taulukko B.2: BINWDOPV4.06.1 Main parameters.

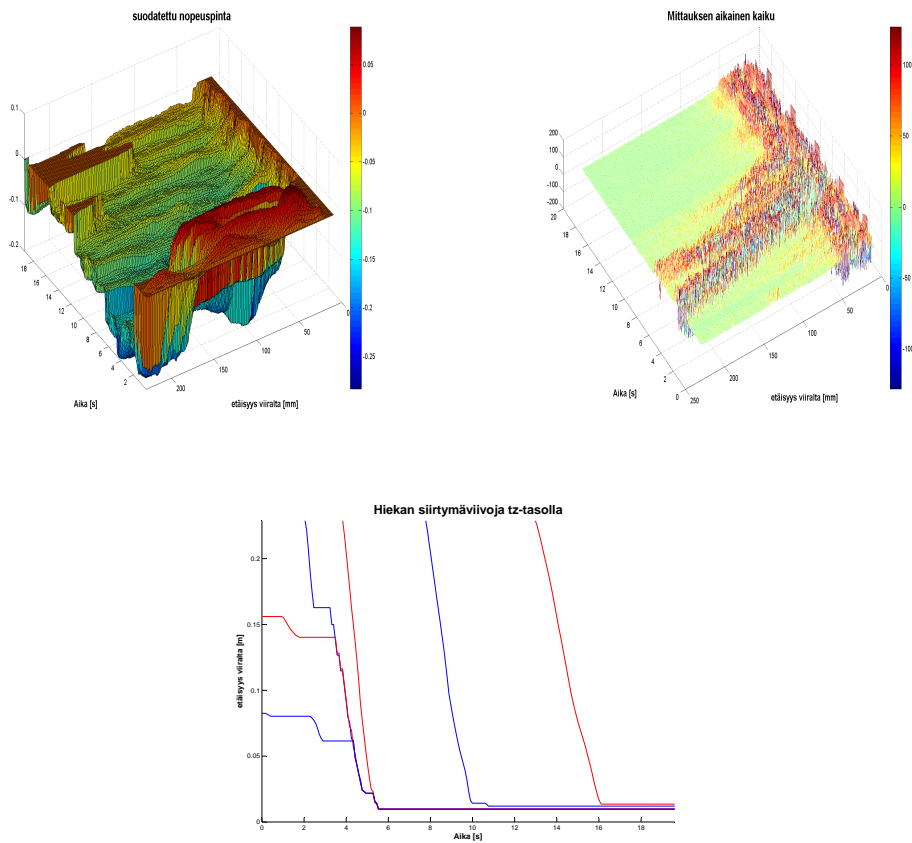
Recorded data type	velocity and echo
Nb of channel	4
Data recorded after trigger	Yes
Emission	
power	high
frequency	4000 KHz
burst length	4
PRF	94 μs
Reception	
number of gates	79
resolution	1000 ns
emissions/profile	150
Memory	
number of profiles	800
skipped profiles	0



Kuva B.3: Sirottelumenetelmä fraktiolla 250-500 μm . Vasemmalla suodatettu nopeuspinta, jonka vieressä mittauksen aikainen kaiu. Alhaalla nopeusprofiilista lasketut hiekan siirtymäviivat.

Taulukko B.3: BINWDOPV4.06.1 Main parameters.

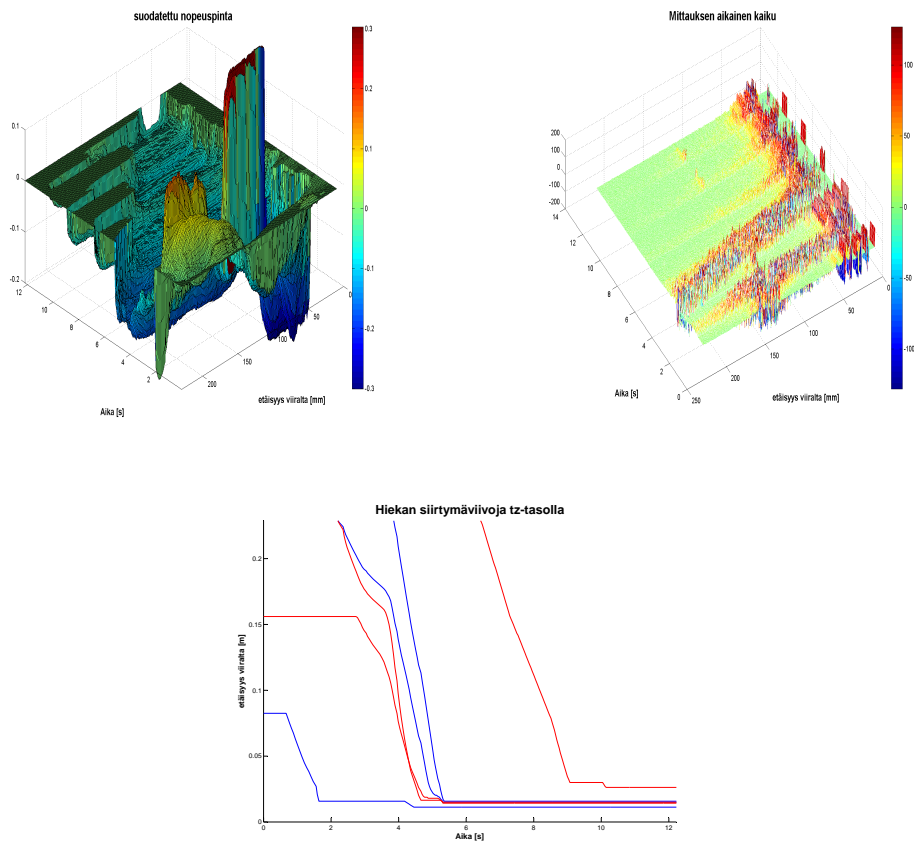
Recorded data type	velocity and echo
Nb of channel	4
Data recorded after trigger	Yes
Emission	
power	high
frequency	4000 KHz
burst length	4
PRF	528 μs
Resepion	
number of gates	294
resolution	1000 ns
emissions/profile	140
Memory	
number of profiles	230
skipped profiles	0



Kuva B.4: Sirottelumenetelmä fraktiolle 250-500 μm . Vasemmalla suodatettu nopeuspinta, jonka vieressä mittauksen aikainen kaihu. Alhaalla nopeusprofiilista lasketut hiekan siirtymäviivat.

Taulukko B.4: BINWDOPV4.06.1 Main parameters.

Recorded data type	velocity and echo
Nb of channel	4
Data recorded after trigger	Yes
Emission	
power	high
frequency	4000 KHz
burst length	4
PRF	528 μs
Resepition	
number of gates	294
resolution	1000 ns
emissions/profile	50
Memory	
number of profiles	300
skipped profiles	0

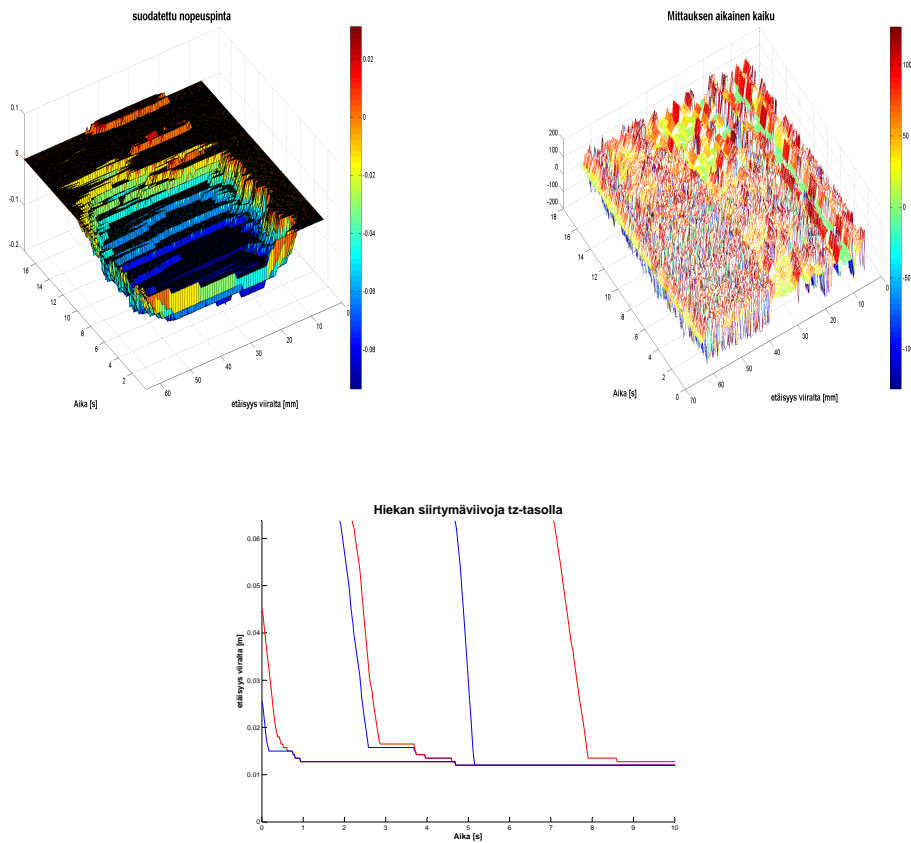


Kuva B.5: Sirottelumenetelmä fraktiolle 250-500 μm . Vasemmalla suodatettu nopeuspinta, jonka vieressä mittauksen aikainen kaihu. Alhaalla nopeusprofiilista lasketut hiekan siirtymäviivat.

B ESIMERKKEJÄ SIROTTELUMENETelmäSTÄ

Taulukko B.5: BINWDOPV4.06.1 Main parameters.

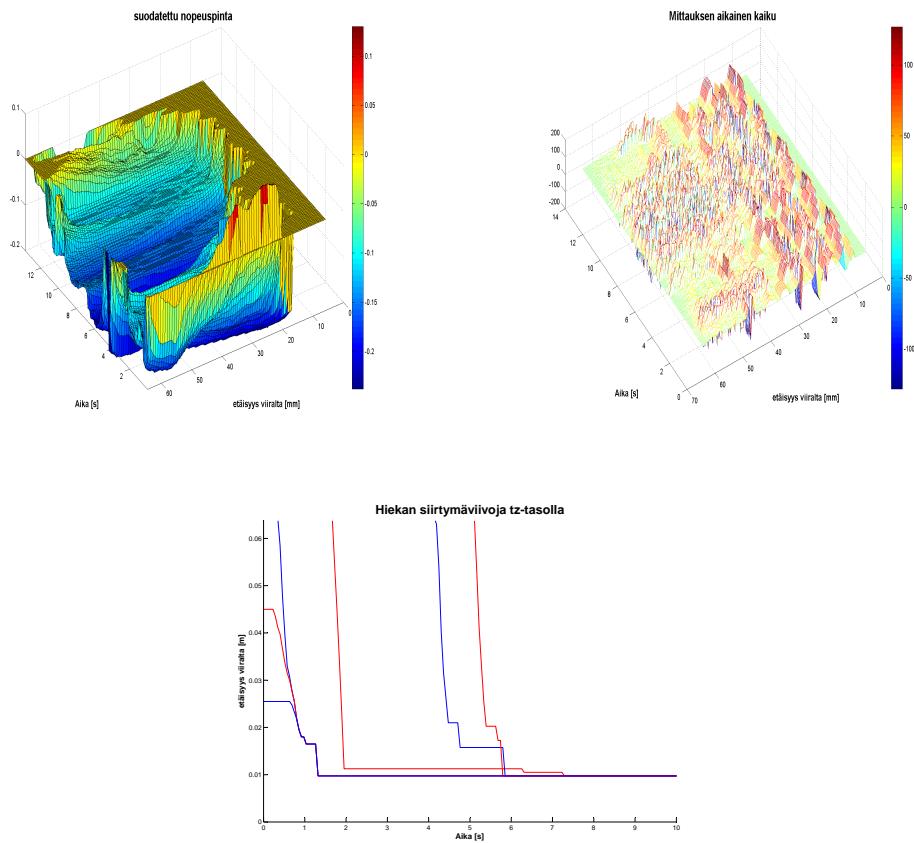
Recorded data type	velocity and echo
Nb of channel	4
Data recorded after trigger	Yes
Emission	
power	medium
frequency	4000 KHz
burst length	4
PRF	94 μ s
Reception	
number of gates	79
resolution	1000 ns
emissions/profile	100
Memory	
number of profiles	800
skipped profiles	0



Kuva B.6: Sirottelumenetelmä fraktiolle 250-500 μ m. Vasemmalla suodatettu nopeuspinta, jonka vieressä mittauksen aikainen kaihu. Alhaalla nopeusprofiilista lasketut hiekan siirtymäviivat.

Taulukko B.6: BINWDOPV4.06.1 Main parameters.

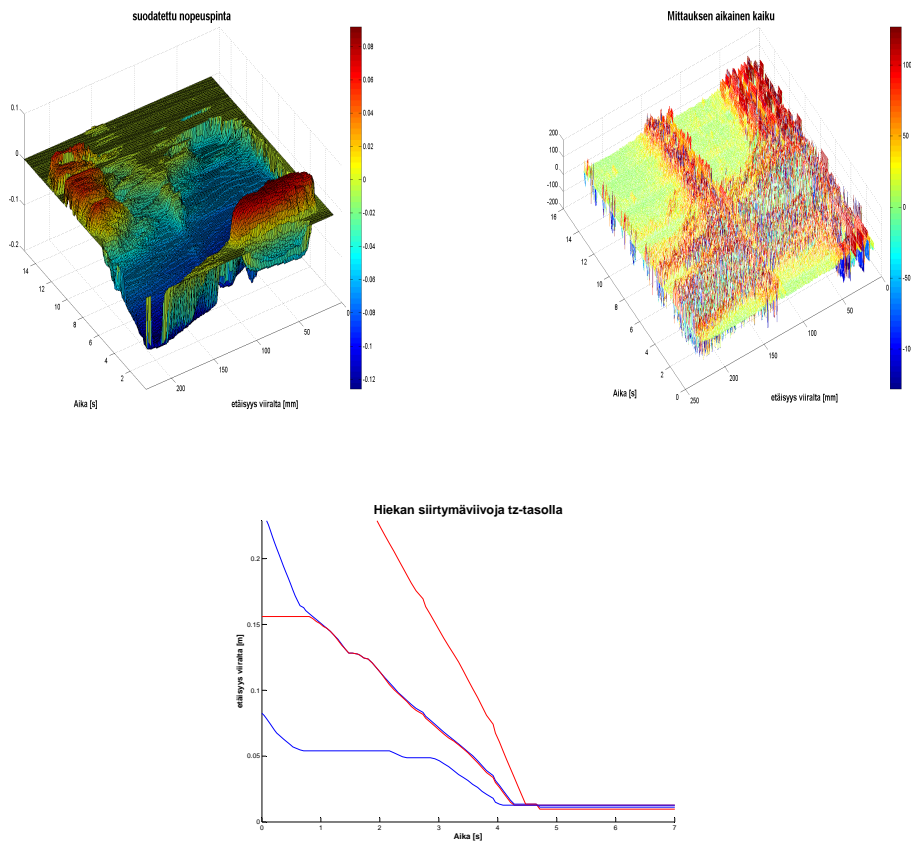
Recorded data type	velocity and echo
Nb of channel	4
Data recorded after trigger	Yes
Emission	
power	medium
frequency	4000 KHz
burst length	4
PRF	94 μ s
Reseption	
number of gates	79
resolution	1000 ns
emissions/profile	128
Memory	
number of profiles	240
skipped profiles	0



Kuva B.7: Sirottelumenetelmä fraktiolla 250-500 μ m. Vasemmalla suodatettu nopeuspinta, jonka vieressä mittauksen aikainen kaiu. Alhaalla nopeusprofiilista lasketut hiekan siirtymäviivat.

Taulukko B.7: BINWDOPV4.06.1 Main parameters.

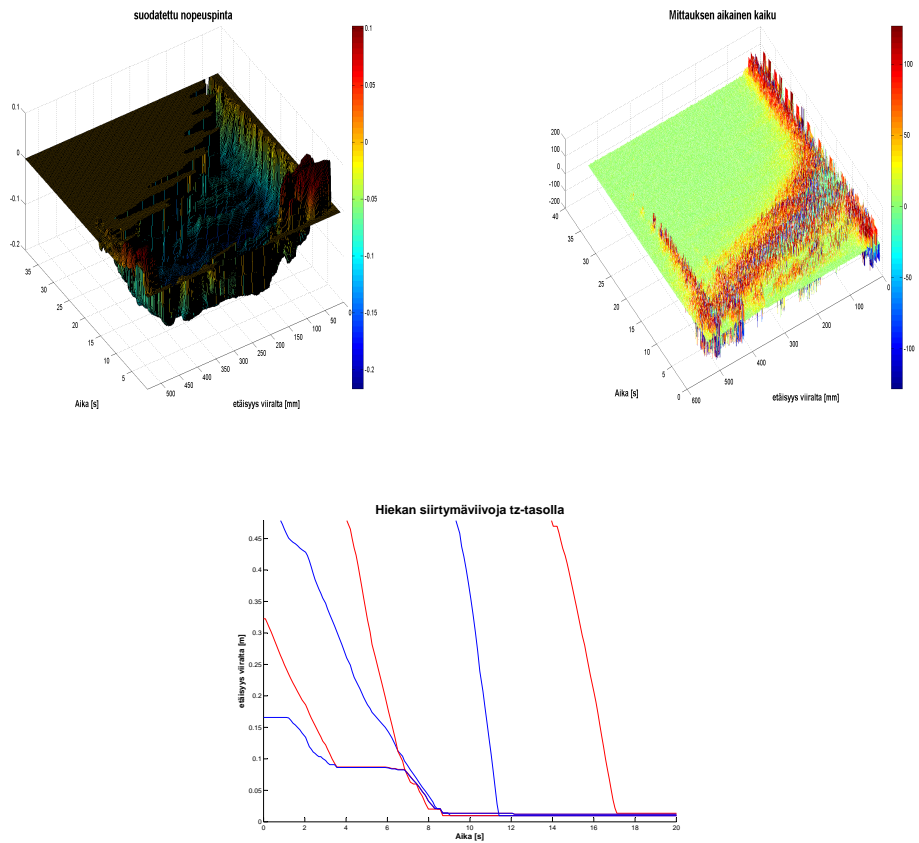
Recorded data type	velocity and echo
Nb of channel	4
Data recorded after trigger	Yes
Emission	
power	medium
frequency	4000 KHz
burst length	4
PRF	478 μs
Reception	
number of gates	294
resolution	1000 ns
emissions/profile	50
Memory	
number of profiles	315
skipped profiles	0



Kuva B.8: Sirottelumenetelmä fraktiolle 250-500 μm . Vasemmalla suodatettu nopeuspinta, jonka vieressä mittauksen aikainen kaiaku. Alhaalla nopeusprofiilista lasketut hiekan siirtymäviivat.

Taulukko B.8: BINWDOPV4.06.1 Main parameters.

Recorded data type	velocity and echo
Nb of channel	4
Data recorded after trigger	Yes
Emission	
power	medium
frequency	4000 KHz
burst length	4
PRF	478 μs
Resepion	
number of gates	730
resolution	705 ns
emissions/profile	100
Memory	
number of profiles	400
skipped profiles	0

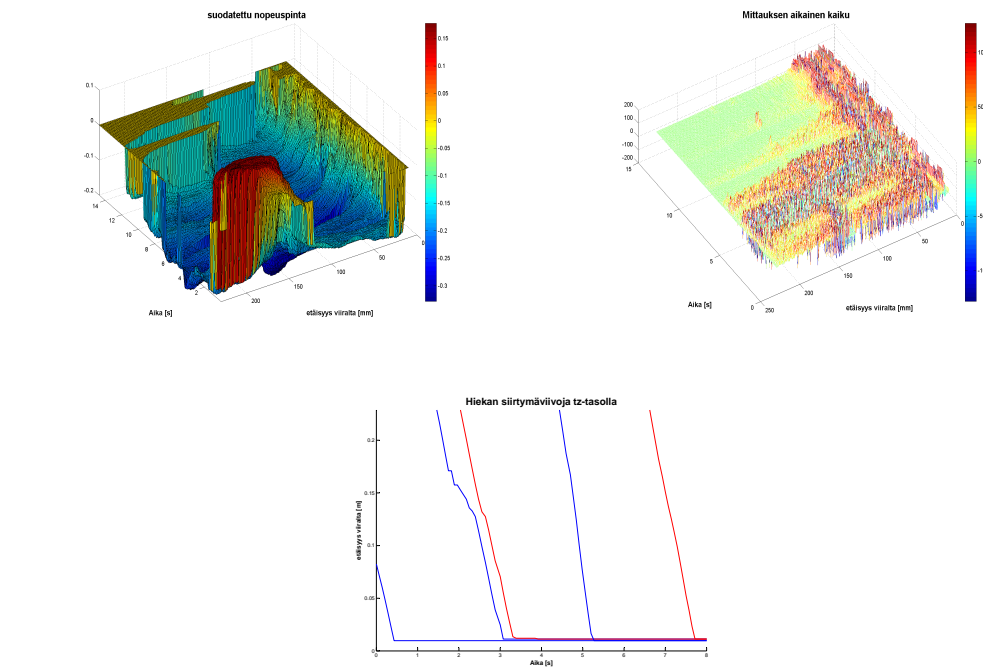


Kuva B.9: Sirottelumenetelmä fraktiolla 250-500 μm . Vasemmalla suodatettu nopeuspinta, jonka vieressä mittauksen aikainen kaiiku. Alhaalla nopeusprofiilista lasketut hiekan siirtymäviivat.

B.4 500-1000 μm

Taulukko B.9: BINWDOPV4.06.1 Main parameters.

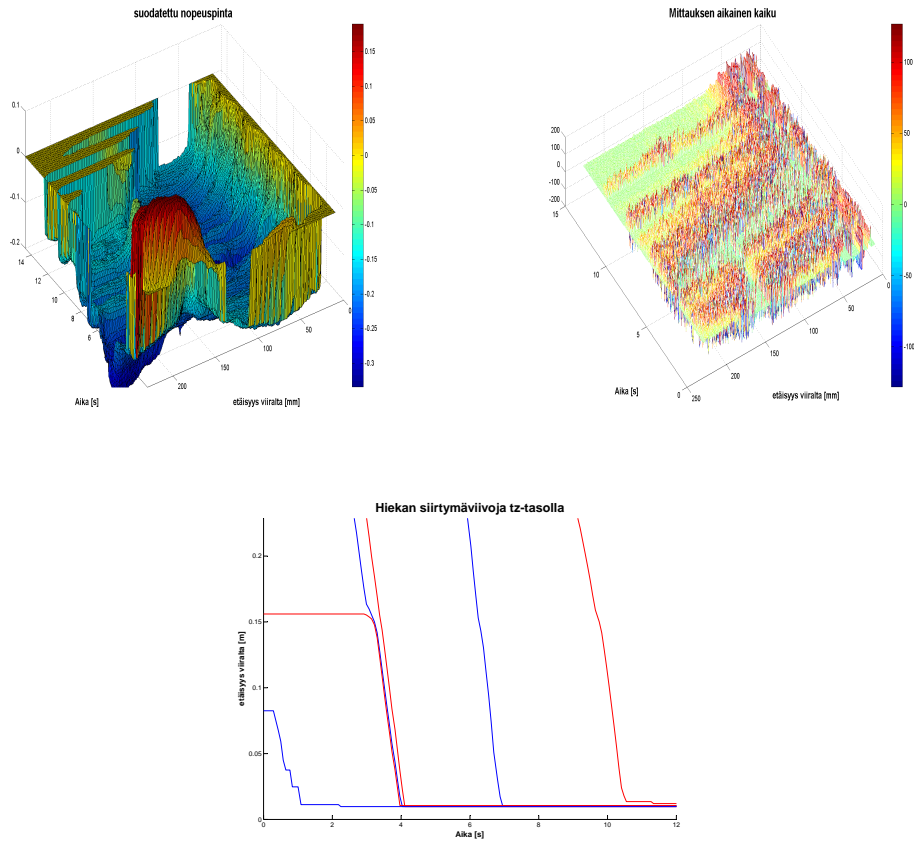
Recorded data type	velocity and echo
Nb of channel	4
Data recorded after trigger	Yes
Emission	
power	high
frequency	4000 KHz
burst length	4
PRF	478 μs
Reseption	
number of gates	294
resolution	705 ns
emissions/profile	128
Memory	
number of profiles	200
skipped profiles	0



Kuva B.10: Sirottelumenetelmä fraktiolla 500-1000 μm . Vasemmalla suodatettu nopeuspinta, jonka vieressä mittauksen aikainen kaiku. Alhaalla nopeusprofiilista lasketut hiekan siirtymäviivat.

Taulukko B.10: BINWDOPV4.06.1 Main parameters.

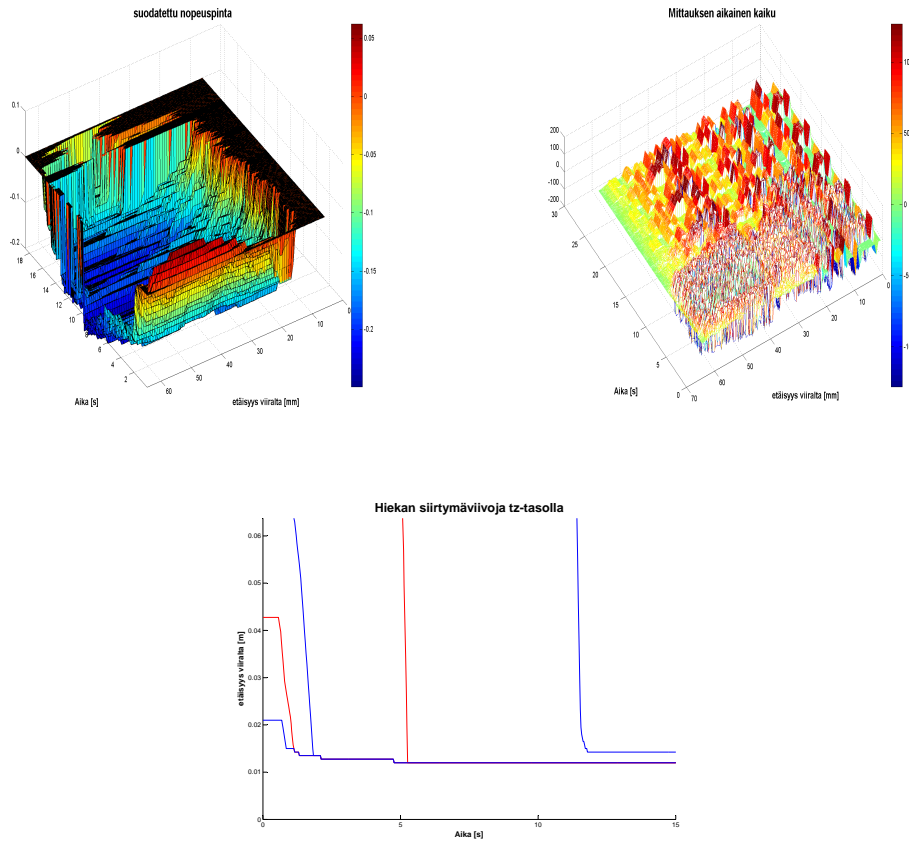
Recorded data type	velocity and echo
Nb of channel	4
Data recorded after trigger	Yes
Emission	
power	high
frequency	4000 KHz
burst length	4
PRF	478 μs
Resepition	
number of gates	294
resolution	1000 ns
emissions/profile	128
Memory	
number of profiles	200
skipped profiles	0



Kuva B.11: Sirottelumenetelmä fraktiolle 500-1000 μm . Vasemmalla suodatettu nopeuspinta, jonka vieressä mittauksen aikainen kaiku. Alhaalla nopeusprofiilista lasketut hiekan siirtymäviivat.

Taulukko B.11: BINWDOPV4.06.1 Main parameters.

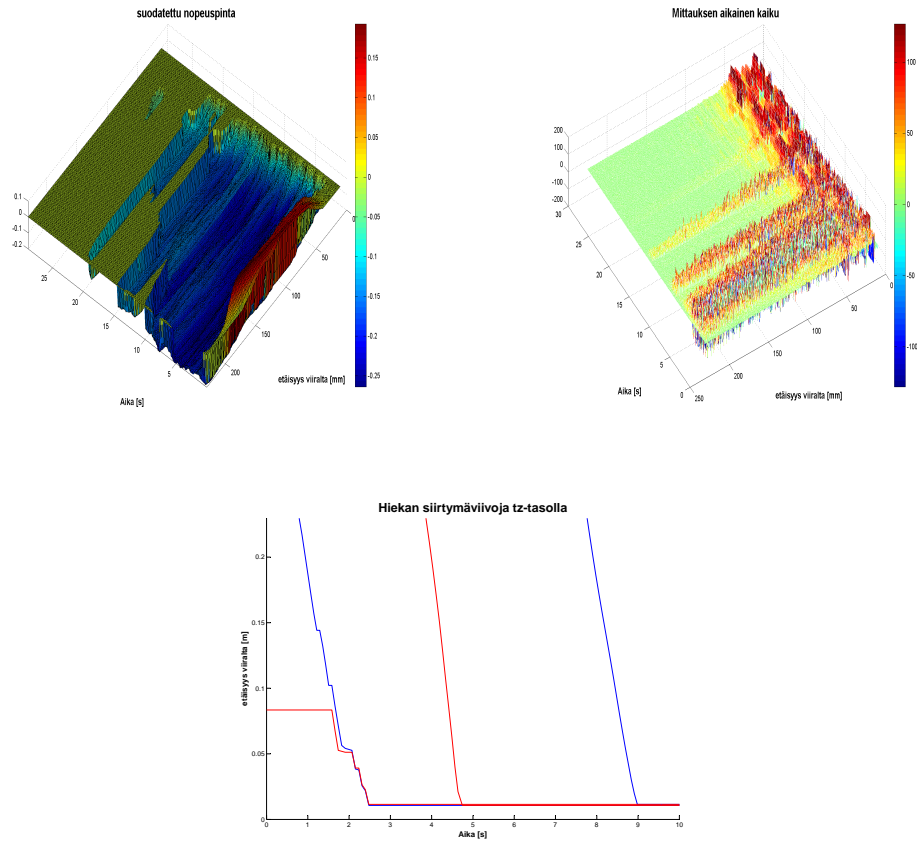
Recorded data type	velocity and echo
Nb of channel	4
Data recorded after trigger	Yes
Emission	
power	high
frequency	4000 KHz
burst length	4
PRF	94 μ s
Resepion	
number of gates	79
resolution	1000 ns
emissions/profile	150
Memory	
number of profiles	600
skipped profiles	0



Kuva B.12: Sirottelumenetelmä fraktiolle 500-1000 μ m. Vasemmalla suodatettu nopeuspinta, jonka vieressä mittauksen aikainen kaiku. Alhaalla nopeusprofiilista lasketut hiekan siirtymäviivat.

Taulukko B.12: BINWDOPV4.06.1 Main parameters.

Recorded data type	velocity and echo
Nb of channel	4
Data recorded after trigger	Yes
Emission	
power	high
frequency	4000 KHz
burst length	4
PRF	478 μs
Resepition	
number of gates	294
resolution	1000 ns
emissions/profile	128
Memory	
number of profiles	400
skipped profiles	0

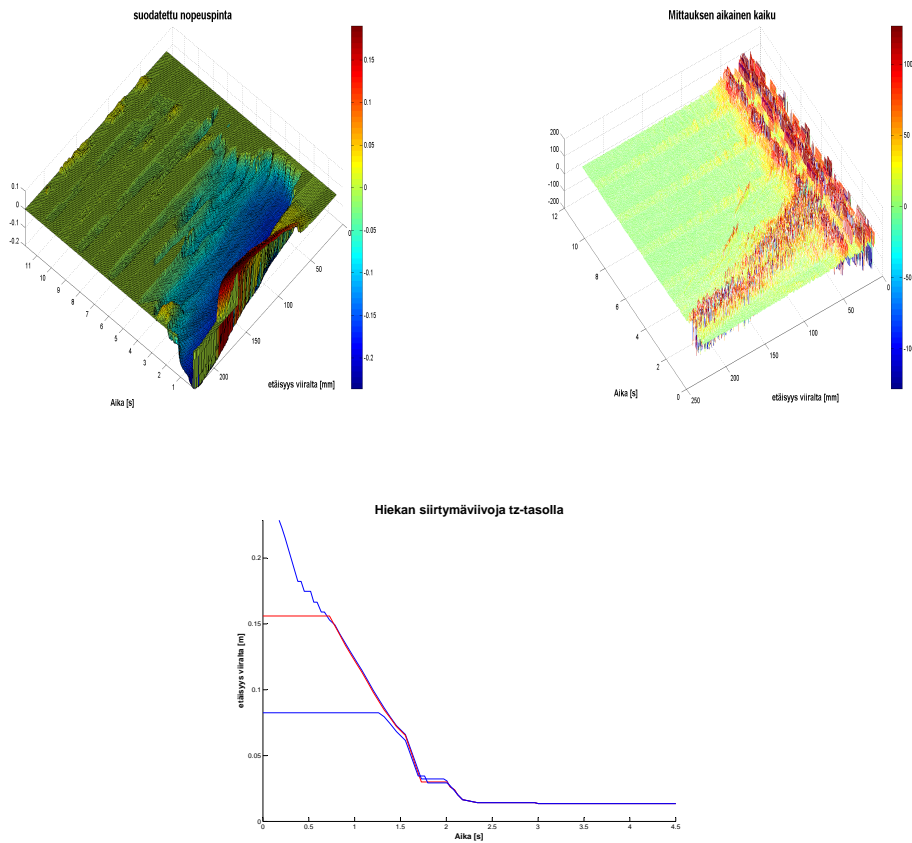


Kuva B.13: Sirottelumenetelmä fraktiolle 500-1000 μm . Vasemmalla suodatettu nopeuspinta, jonka vieressä mittauksen aikainen kaiku. Alhaalla nopeusprofiilista lasketut hiekan siirtymäviivat.

B ESIMERKKEJÄ SIROTTELUMENETELMÄSTÄ

Taulukko B.13: BINWDOPV4.06.1 Main parameters.

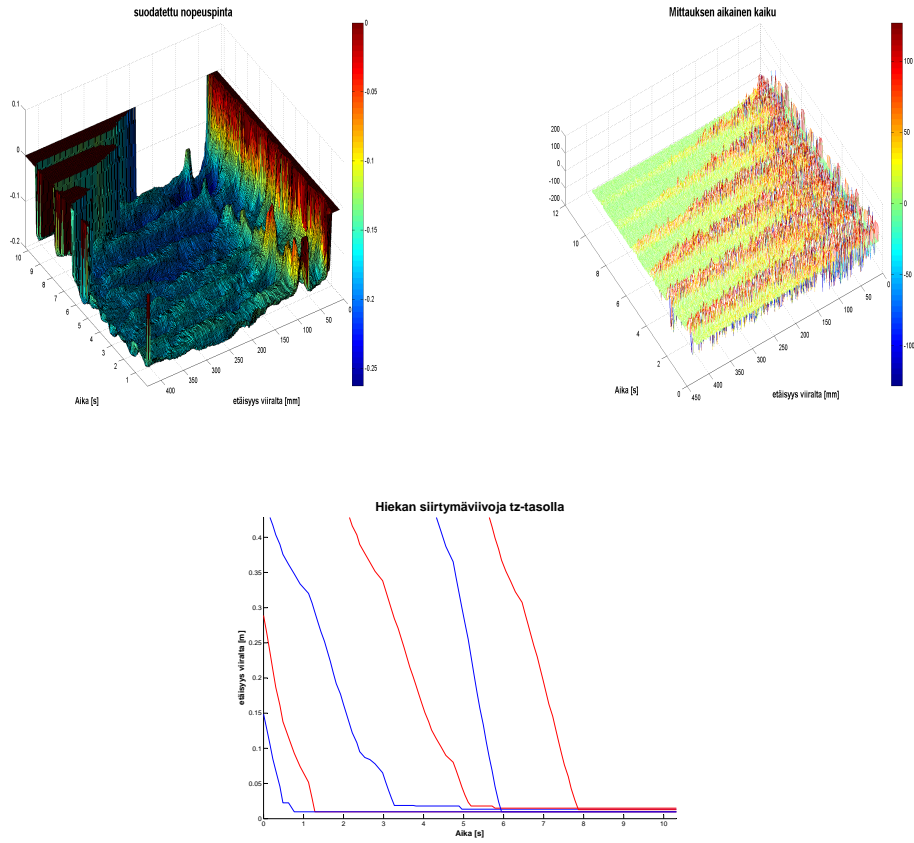
Recorded data type	velocity and echo
Nb of channel	4
Data recorded after trigger	Yes
Emission	
power	medium
frequency	4000 KHz
burst length	4
PRF	478 μs
Reception	
number of gates	294
resolution	1000 ns
emissions/profile	50
Memory	
number of profiles	315
skipped profiles	0



Kuva B.14: Sirottelumenetelmä fraktiolla 500-1000 μm . Vasemmalla suodatettu nopeuspinta, jonka vieressä mittauksen aikainen kaiku. Alhaalla nopeusprofilista lasketut hiekan siirtymäviivat.

B ESIMERKKEJÄ SIROTTELUMENETelmäSTÄ

Recorded data type	velocity and echo
Nb of channel	4
Data recorded after trigger	Yes
Emission	
power	medium
frequency	4000 kHz
burst length	4
PRF	580 μs
Reception	
number of gates	561
resolution	1000 ns
emissions/profile	100
Memory	
number of profiles	120
skipped profiles	0



Kuva B.15: Sirottelumenetelmä fraktiolla 500-1000 μm . Vasemmalla suodatettu nopeuspinta, jonka vieressä mittauksen aikainen kaiku. Alhaalla nopeusprofiilista lasketut hiekan siirtymäviivat.

C Työssä käytetyt Matlab-koodit

C.1 Esitetyt nopeuspinnat

```
%Koodi, joka lukee ensin tallennetut binäärimuotoiset mittaustulokset ,
%suodattaa dataa ja piirtää nopeuspinnan sekä mitatusta, että suodatetusta datasta

clear all

[vel,echo,z,time,tgc,mpxchannel,par,mpxpar] = BinDop('Pudotus_whole_shake2_5001000_8_
BDD');%Lukee tallennetun binäärimuotoisen datan.BinDOP - rutiini saatavilla osoitteesta
http://www.signal-processing.
%com/applic_notes/matlab.htm. Esimerkissä luettava tiedosto nimeltään
Pudotus_whole_shake2_5001000_8

[dis, index] = min(abs(z - 10)); %hakee paikkavektorin indexin joka kuvaa viiran
paikkaa (-10mm)
time = time*1e-3 %muuntaa millisekunnit sekunneiksi
vel = (cosd(par(14)))^(-1) * vel; %huomioi mahdollisen doppler - kulman
vel = par(11)*vel %huomioi mahdollisen nopeuden skaalaustekijän

%seuraavassa suodatetaan mitattu nopeusmatriisi. Suodatus tehdään erikseen
%viiran ylä- ja alapuoliselle osalle, jotta suodatus vaikuttaisi viiran
%pinnalle mahdollisimman vähän

if (index>1) %tarkastaa index - muuttujan avulla, onko viira
tallennetulla mittausalueella %tallentaa mahdollisen viiran alapuolisen osan
Vel_low = vel(1:index,:);
luetusta datasta %tallentaa varsinaisen sedimentoituvan osan
Vel_up = vel(index+1:end,:);
datasta
Vel_lowS = medfilt2(Vel_low,[25,5]);%mediaanisuodatus viiran alapuoliselle osalle
Vel_upS = medfilt2(Vel_up,[25,5]); %mediaanisuodatus sedimentoituvalla osalle
vel_smth = [Vel_lowS;Vel_upS]; %kokoaa suodatetun ylä- ja alaosan yhteen
else vel_smth = medfilt2(vel,[25,5]) %mikäli viiran pinta asetettu jo mitattaessa
aloitusyyvytyksi, suodatetaan koko matriisi kerralla
end

%pintojen piirto ajan ja paikan funktiona
[X,Y] = meshgrid(time,z);

surf(X,Y,vel_smth), title('suodatettu nopeuspinta', 'fontsize',16, 'FontWeight',
'bold')
axis([min(time) max(time) min(z) max(z) min(min(vel_smth)) 0.1])
view([-122,50]),colorbar;
xlabel('Aika [s]', 'fontsize',12, 'FontWeight', 'bold');
ylabel('etäisyys viiralta [mm]', 'fontsize',12, 'FontWeight', 'bold');

AXIS([0.001 max(time) 0 max(z) -0.2 0.1])
lighting phong
```

C.2 Esitetyt siirtymäviivat

```

%Koodi, joka lukee ensin tallennetut binäärimuotoiset mittaustulokset ,
%suodattaa dataa ja laskee soudatetusta datasta partikkeleiden
%siirtymäviivat

clear all

%-----
%Lukee tallennetun binäärimuotoisen datan. BinDOP - rutiini saatavilla
%osoitteesta http://www.signal-processing.com/applic\_notes/matlab.htm
%esimerkissä luettava tiedosto nimeltään Pudotus_whole_shake2_5001000_8
%-----

[vel,echo,z,time,tcg,mpxchannel,par,mpxpar] = BinDop('Pudotus_whole_shake2_5001000_8.k
BDD');

[dis, index] = min(abs(z - 10)); %haake paikkavektorin indexin joka kuvaa
viiran paikkaa (-10mm)

time = time*1e-3 %muuntaa millisekunnit sekunneiksi

z = z*1e-3 %muuntaa millimetrit metreiksi

vel = (cosd(par(14)))^(-1) * vel; %huomioi mahdollisen doppler - kulman

vel = par(11)*vel %huomioi mahdollisen nopeuden
skaalaustekijän

vel(vel > 0) = 0 %vaihtaa positiiviset nopeudet nolllaksi,
jotta ne eivät vaikuta myöhempään suodatukseen

%-----
%seuraavassa suodatetaan mitattu nopeusmatriisi. Soudatus tehdään erikseen
%viiran ylä- ja alapuoliselle osalle, jotta suodatus ei pyöristä viiran
%-----
if (index>1) %tarkastaa index - muuttujan avulla, onko
viira tallennetulla mitta-alueella
Vel_low = vel(1:index,:); %tallentaa mahdollisen viiran alapuolisen
osan luetusta datasta
Vel_up = vel(index+1:end,:); %tallentaa varsinaisen sedimentoituvan osan
datasta

Vel_lowS = medfilt2(Vel_low,[25,5]); %mediaanisuodatus viiran alapuoliselle
osalle
Vel_upS = medfilt2(Vel_up,[25,5]); %mediaanisuodatus sedimentoituvalla
osalle

vel_smth = [Vel_lowS;Vel_upS]; %kokoaa suodatetun ylä- ja alaosan yhteen
else vel_smth = medfilt2(vel,[25,5]) %mikäli viiran pinta asetettu jo
mitattaessa aloitusvyydeksi, suodatetaan koko matriisi kerralla
end

n = size(vel_smth,1); %rivien lkm
m = size(vel_smth,2); %sarakkeiden lkm

%-----
%partikkeleiden radat, joille parametri i kuvaa aloitusriviä ja j aloitussaraketta
kullekin radalle
%-----
A = round(m/5) %jakaa soudatetun matriisin tasaisiin osiin
B = round(n/3)
%-----

```

C TYÖSSÄ KÄYTETYT MATLAB-KOODIT

```
j = 1 %aloituspaikka
path0(1:j) = z(n) %partikkeli alkusijainti
displacement = z(n) + (vel_smth(end,j))*(time(j+1,1) - time(j,1)) %partikkelin
siirtymä alkupisteestä seuraavaan
[min_difference, array_position] = min(abs(z - displacement)); %etsii
paikkavektorin indeksin jota kyseinen sijainti kuvaa
path0(j+1) = z(array_position) %radan seuraava piste

for k = j:m %vastaava kuin edellä kaikille j=1->m

displacement = path0(k)+vel_smth(array_position,k)*(time(j+1,1) - time(j,1))
[min_difference, array_position] = min(abs(z - displacement));
path0(k+1) = z(array_position)

end

path0(path0 < z(index))= z(index) %varmistaa ettei hiukkanen mene viiran läpi

%-----
%Myöhemmille ajanhetkille, kuten edellä. Alkaen kohdasta j=A
%-----
j = A
path20(1:j) = z(n)
displacement = z(n) + (vel_smth(end,j))*(time(j+1,1) - time(j,1))

[min_difference, array_position] = min(abs(z - displacement));
path20(j+1) = z(array_position)

for k = j:m

displacement = path20(k)+vel_smth(array_position,k)*(time(j+1,1) - time(j,1))
[min_difference, array_position] = min(abs(z - displacement));
path20(k+1) = z(array_position)

end

path20(path20 < z(index))= z(index)

%-----
j = 2*A
path40(1:j) = z(n)
displacement = z(n) + (vel_smth(end,j))*(time(j+1,1) - time(j,1))

[min_difference, array_position] = min(abs(z - displacement));
path40(j+1) = z(array_position)

for k = j:m

displacement = path40(k)+vel_smth(array_position,k)*(time(j+1,1) - time(j,1))
[min_difference, array_position] = min(abs(z - displacement));
path40(k+1) = z(array_position)

end

path40(path40 < z(index))= z(index)

%-----

j = 2.5*A
```

C TYÖSSÄ KÄYTETYT MATLAB-KOODIT

```
path60(1:j) = z(n)
displacement = z(n) + (vel_smth(end,j))*(time(j+1,1) - time(j,1))

[min_difference, array_position] = min(abs(z - displacement));
path60(j+1) = z(array_position)

for k = j:m

displacement = path60(k)+vel_smth(array_position,k)*(time(j+1,1) - time(j,1))
[min_difference, array_position] = min(abs(z - displacement));
path60(k+1) = z(array_position)

end

path60(path60 < z(index))= z(index)

%-----
%Aivan, kuten aiemmin mutta suoritettuna paikalle, eli ratojen aloitus
%tapahuu rivien mukaan
%-----

i = B
path_place30(1) = z(n-i)
displacement = z(n-i) + (vel_smth(end-i,1))*(time(10,1) - time(9,1));

[min_difference, array_position] = min(abs(z - displacement));
path_place30(2) = z(array_position)

for k = 2:m

displacement = path_place30(k)+vel_smth(array_position,k)*(time(10,1) - time(9,1))
[min_difference, array_position] = min(abs(z - displacement));
path_place30(k+1) = z(array_position)

end

path_place30(path_place30 < z(index))= z(index)

%-----

i = 2*B
path_place60(1) = z(n-i)
displacement = z(n-i) + (vel_smth(end-i,1))*(time(10,1) - time(9,1));

[min_difference, array_position] = min(abs(z - displacement));
path_place60(2) = z(array_position)

for k = 2:m

displacement = path_place60(k)+vel_smth(array_position,k)*(time(10,1) - time(9,1))
[min_difference, array_position] = min(abs(z - displacement));
path_place60(k+1) = z(array_position)

end

path_place60(path_place60 < z(index))= z(index)

time(end+1)=time(end) + (time(end)-time(end-1)) %varmistaa, että aikavektori saman
kokoinen kuin lasketut radat (1x401)
```

C TYÖSSÄ KÄYTETYT MATLAB-KOODIT

```
hold on
plot(time,path0,'b','LineWidth',1.5)
plot(time,path20,'r','LineWidth',1.5)
plot(time,path40,'b','LineWidth',1.5)
plot(time,path60,'r','LineWidth',1.5)

plot(time,path_place30,'r','LineWidth',1.5)
plot(time,path_place60,'b','LineWidth',1.5)

xlabel('Aika [s]', 'fontSize',12, 'FontWeight', 'bold');
ylabel('etäisyys viiralta [m]', 'fontSize',12, 'FontWeight', 'bold');
title('Hiekan siirtymäviivoja tz-tasolla', 'fontSize',19, 'FontWeight', 'bold');
axis([0 max(time) 0 z(n-1)])
```

C.3 Terminaalinopeus, Reynoldsin luku ja vastuskerroin

```

clear all

[vel,echo,z,time,tgc,mpxchannel,par,mpxpar] = BinDop('Pudotus_whole_shake2_5001000_8_
BDD');

%-----
%tarvittavat vakiot
%-----
a = ((500+1000)/2)*1e-6 %partikkelin halkaisija. fraktion keskiarvo
rho_s = 2787 %fraktion tiheys
rho_f = 998 %veden tiheys
delta_rho = rho_s - rho_f %tiheyksien ero
g = 9.81 %gravitaatio
mu = 0.001 %veden viskositeetti

vel = (cosd(par(14)))^(-1) * vel; %huomioi mahdollisen doppler - kulman
vel = par(11)*vel %huomioi mahdollisen nopeuden
skaalaustekijän

vel(vel > 0) = 0 %vaihtaa positiiviset nopeudet nollassi,
jotta ne eivät vaikuta myöhempään suodatukseen

[dis, index] = min(abs(z - 10)); %etsii viiran paikan

Vel_up = vel(index+1:end,:); %poimii viiran yläpuoliset arvot
Vel_upS = medfilt2(Vel_up,[25,5]); %käsiteltävän osan suodatus

%-----
%Stokesin lain mukaiset rajat. Maksimi ja minimiarvot laskettu fraktion
%suurimman ja pienimmän mahdollisen partikkelin mukaan
V_max = (((1000e-6)^2)*delta_rho*g)/(18*mu)
V_min = (((500e-6)^2)*delta_rho*g)/(18*mu)
%-----
% Rajat, joilla voidaan rajata huomioitavat alkio V(i,j), joille 0.5V_Min < V(i,j) <
1.5V_Max
% miinusmerkit koska aiemmat V_min ja V_max positiivisina
V_Min = -0.5 * V_min
V_Max = -1.5 * V_max

Vel_low_lim = Vel_upS(Vel_upS < V_Min) %hylätään liian pienet
vajoamisnopeudet
Vel_accept = Vel_low_lim(Vel_low_lim > V_Max) %hylätään liian suuret
vajoamisnopeudet

%-----
Vel_t = mean(Vel_accept) %terminaalinopeus rajoihin sopivien
alkioiden keskiarvona

Re = abs((rho_f * Vel_t * a) / mu) %Reynoldsin luku terminaalinopeuden avulla

C_d = (4/3)*(a*delta_rho*g)/(rho_f*Vel_t^2) %vastuskerroin

```