



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**VILJELYMAIDEN TIIVISTYMIEN SIMULOINTI  
JA SEN HYÖDYNTÄMINEN  
KONEENSUUNNITTELUSSA**

Eemeli Keskitalo

Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatin työ

Joulukuu 2021

# Tiivistelmä

Viljelymaiden tiivistymien simulointi ja sen hyödyntäminen koneensuunnittelussa

Eemeli Keskitalo

Oulun yliopisto, konetekniikan tutkinto-ohjelma

Kanditaatintyö 2021

Kandiohjaaja: Jari Laukkanen

Työn tarkoitus on antaa lukijalle sekä tekijälle pohjatietoja siitä, miten tiivistymiä mallinnetaan, mitä seikkoja siinä on otettava huomioon ja minkälaista mallinnusta on tähän mennessä tehty, sekä myös tietoa siitä, mihin suuntaan alaa ollaan kehittämässä. Työ on toteutettu kirjallisuuskatsaus tyyppisesti, eikä se sisällä itsessään tutkimusta. Työssä havaittiin, että numeerinen menetelmä DEM, eli diskreettielementtimenetelmä on ottamassa jalansijaa tällä osa-alueella, ja suuri osa tutkimuksesta kohdistuu sen kehittämiseen sekä sen hyödyntämiseen erityyppisissä simulointitapauksissa. Hyödyntämistä koneensuunnittelussa tarkastellaan erilaisia julkaisuja esittelemällä, mitkä koskevat maa-aines simuloinnin yhdistämistä maatalouskoneiden suunnitteluun. Työ voisi soveltua vastaavan tutkimuksen kirjallisuuskatsaukseksi, ja sen luettuaan lukijalla on käsitys alan trendeistä

*Keywords: DEM, tiivistymät, maatalous, maatalouskoneet*

# SISÄLLYSLUETTELO

1 Viljelysmaiden tiivistymien simulointi .....	5
1.1 Johdanto .....	5
1.2 Historiikki ja kehitys .....	6
2 Mallinnusmenetelmät .....	8
2.1 Analyttiset menetelmät .....	8
2.1.1 Boussinesqin teoria .....	8
2.1.2 Westergaardin teoria .....	9
2.1.3 Söhnen malli .....	9
2.2 Diskreettielementtimenetelmä (DEM) .....	12
2.3 Vuorovaikutusmallit .....	14
3 Hyödyntäminen koneensuunnittelussa .....	17
3.1 Koneen kuormitusten simulointi .....	17
3.2 Maa-aineksen rasitusten simulointi .....	18
3.3 Maa-aineksen käyttäytymisen mallinnus muokkauksessa .....	19
4 yhteenveto .....	21
5 Lähdeluettelo .....	23

## MERKINNÄT JA LYHENTEET

DEM	Discrete Element Method
FEM	Finite Element Method
$F$	voima
HMCM	Hertz-Mindlin Contact model
HSCM	Hysteretic Spring Contact Model
$k$	jousivakio
$m$	massa
PBCM	Parallel Bond Contact Model
$v$	nopeus
$\sigma$	jännitys
$\tau$	leikkausjännitys

# 1 VILJELYMAIDEN TIIVISTYMIEN SIMULOINTI

## 1.1 Johdanto

Ruoka on ihmisen ravintoa, ja välttämättömyys ihmisen selviämiseksi. Ruokaa voi hankkia luonnosta esimerkiksi kalastamalla, metsästäällä, tai poimimalla puolukoita. Edellä mainitut ruoanhankkimismenetelmät ovat kuitenkin työläitä ja aikaa kuluttavia, ja ongelmaksi muodostuu myös luonnossa kasvavan ravinnon riittävyys kaikille. Niinpä on keksitty maanviljely, joka mahdollistaa ruoan kasvattamisen. Maanviljely tapahtuu pääsääntöisesti viljelyyn tarkoitetuilla maa-alueilla, eli pelloilla. Tosin ruokaa tuotetaan muillakin tavoilla, kuten kasvihuoneissa.

Tässä työssä käsitellään kuitenkin perinteiseen peltoviljelyyn liittyvää maailmanlaajuista haastetta, joka on viljelymaiden tiivistyminen. Se heikentää pellon viljavuutta, sekä lisää viljelyn aiheuttamia päästöjä ilmakehään ja vesistöihin mm. typpikadon, ravinteiden huuhtoutumisen, sekä mekaanisen muokkauksen energiatarpeen lisääntymisen johdosta. (Soane, van Ouwerkerk 1995).

Nykyään lähes kaikki peltoviljely on koneellistunutta, johtuen siitä mistä muidenkin alojen koneellistuminen; se lisää tehokkuutta. Tehokkuutta, joka on välttämätöntä valtavan ihmispopulaatiomme ruoan tuotantoa varten. Asialla on kuitenkin kääntöpuoli, sillä koneellistuminen on myös maaperän tiivistymien takana, johtuen koneiden suuresta pintapaineesta ja maan rakenteen kannalta epäedullisten muokkausmenetelmien käytöstä. Koneensuunnittelulla on siis tärkeä rooli maanviljelyssä myös tiivistymien ehkäisyssä.

Maa-aineksen ja erilaisten koneiden välistä vuorovaikutusta on mahdollista simuloida. Vuorovaikutusta voidaan tarkastella siltä kannalta, minkälaisia vaikutuksia koneella on maa-ainekseen, että toiseen suuntaan, minkälaisia kuormituksia muokkauksesta aiheutuu koneeseen. Nykyään tärkeimpänä menetelmänä voidaan pitää numeerista diskreettielementtimenetelmää (DEM). Tiivistymien mallinnukseen on aiemmin käytetty laajalti analyttisiä menetelmiä.

Työn tarkoitus on siis tutkia tiivistymien simulointia, sekä sen hyödyntämistä koneensuunnittelussa. Työssä siis tarkastellaan ainoastaan maa-aineksen mekaniikkaa, eikä sen enempää puututa esimerkiksi siihen, mitä haittaa tiivistymistä on.

## 1.2 Historiikki ja kehitys

Maa-aineksen, ja muiden partikkelisysteemien käyttäytymisen mallinnusta sovelletaan maatalouden lisäksi useissa eri kohteissa. Esimerkiksi rakennustekniikassa on tärkeää pystyä approksimoimaan maaperän kantavuutta. Mallinnus on alkanut analyyttisin menetelmin. Vuonna 1885 Boussinesq esitteli teorian maaperän jännitysjakaumalle pistekuorman alla (Boussinesq 1885). Teoria olettaa, että maaperä on homogeenista ja lineaarisesti elastista, ja ei huomioi maa-aineksen ominaisuuksia. Vuonna 1938 Westergaard esitteli Boussinesqin teoriasta johdetun teorian koskien teiden pohjarakenteiden kestävyden mallinnusta, joka ottaa huomioon myös maa-aineksen Poissonin vakion (Westergaard 1925). Mittaustulosten perusteella jännitysjakouma on tosiasiaa hieman keskittyneempi kuin Boussinesqin mallissa. Vuonna 1934 Fröhlich kehitti empiiristen tutkimusten perusteella oman jännitysvakionsa, jolla täydensi Boussinesqin teoriaa (Fröhlich 1934)

Vuonna 1953 Walter Söhne esitteli mallinsa maaperään ilmakumirenkaan aiheuttaman jännityksen mallintamiseen (Söhne 1953). Malli pohjautuu Boussinesqin ja Fröhlichin teorioihin, ja se on laajennettu kolmiulotteiseksi ja sen avulla voidaan muodostaa halutussa pisteessä jännitystensori. Kyseessä on eräänlainen uranuurtaja, mitä tulee maa-aineksen tiivistymien mallintamiseen, ja se toimii pohjana monille myöhemmin kehitetyille malleille.

Myöhemmin on kehitetty Söhnen malliin pohjautuvia kontinuumimekaniikan malleja, sellaisia ovat esimerkiksi SoilFlex (Keller, Défossez et al. 2007) ja Terranimo (Stettler, Keller et al. 2014).

Vuonna 1958 Deresiewicz esitteli teorian kuutiomaiselle partikkelisysteemille (Deresiewicz 1958, Cundall, Strack 1979). Teoria mallintaa epäelastisen partikkelisysteemin käyttäytymistä ja sortumista kuormituksen alaisena. Se on kuitenkin rajoitteellinen kuormitustapausten suhteen, ja toimii vain kuution muotoisille partikkelisysteemeille. (Cundall, Strack 1979)

Tärkeä askel numeerisen menetelmän kehittämiseen otettiin 1970-luvun alkupuoliskolla, kun Cundall & Strack julkaisi numeerisen laskentamallin partikkelisysteemeille. Menetelmää kutsuttiin nimellä distinct/discrete element method. Menetelmää käytettiin BALL nimisessä tietokoneohjelmassa, ja sillä simuloitiin 2-ulotteisia pyöreistä partikkeleista koostuvia malleja. Menetelmän antamia tuloksia verrattiin aiemmin tehtyihin fotoelastisiin kokeisiin (De Josselin de Jong, G & Verruijt, A 1969). Ne vastasivat toisiaan hyvällä tarkkuudella. (Cundall, Strack 1979)

Sitten DEM on yleistynyt partikkelisysteemien simuloinnissa, ja markkinoilla on useita DEM-ohjelmistoja, esimerkiksi Edem ja Rocky Dem. DEM tuo paljon mahdollisuuksia useisiin insinööri-käyttötarkoituksiin, sitä voidaan hyödyntää viljelysmaiden simuloinnin lisäksi esimerkiksi prosessitekniikassa, kaivostekniikassa, rakennustekniikassa ja lääketieteessä.

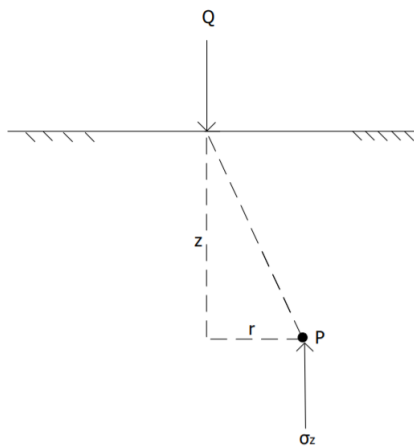
## 2 MALLINNUSMENETELMÄT

Tässä kappaleessa käydään läpi maa-aineksen tiivistymien ja partikkelisysteemien mallinnusmenetelmiä

### 2.1 Analyttiset menetelmät

#### 2.1.1 Boussinesqin teoria

Teoria olettaa maa-aineksen elastiseksi ja homogeeniseksi. Yhtälöllä voidaan approksimoida pistevoiman aiheuttamaa pystysuuntaista jännitystä (1) 2-ulotteisessa tapauksessa. (kuva 1.)



Kuva 1. Boussinesqin teoria

$$\sigma_z = \frac{3Q}{2\pi z^2} \frac{1}{[1+(r/z)^2]^{5/2}} = \frac{Q}{z^2} I_B \quad (1)$$

Jossa  $\sigma_z$  on jännityksen pystykomponentti pisteessä P [pa]

$Q$  on pistevoiman suuruus [N]

$z$  on pystysuuntainen etäisyys maan pinnasta [m]

$r$  on vaakasuuntainen etäisyys voiman vaikutussuoralta [m]



Yhtälössä esiintyvä  $I_B$  on Boussinesqin jännitysvakio

$$I_B = \frac{3}{2\pi} \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{r}{z}\right)^2\right]^{5/2}} \quad (2)$$

### 2.1.2 Westergaardin teoria

Teoria olettaa maa-aineksen elastiseksi ja isotrooppiseksi, ja siten huomioon otetaan myös maa-aineksen Poissonin vakio. Teoria pätee kuvan 1. mukaiselle 2D tapaukselle

$$\sigma_z = \frac{Q}{2\pi z^2} \frac{\sqrt{(1-2\mu)/(2-2\mu)}}{\left[\frac{1-2\mu}{2-\mu} + \left(\frac{r}{z}\right)^2\right]^{3/2}} \quad (3)$$

Jossa  $\mu$  on Poissonin vakio

Usein käytännön laskennassa Poissonin vakio kuitenkin oletetaan olevan 0, jolloin yhtälö yksinkertaistuu.

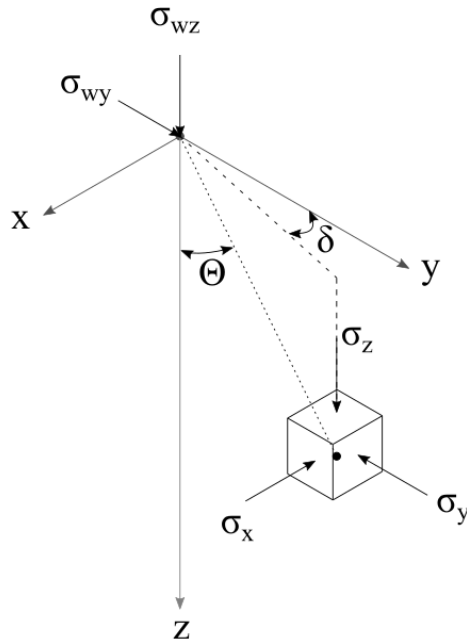
$$\sigma_z = \frac{Q}{z^2} I_w \quad (4)$$

Yhtälössä (4) esiintyvä  $I_w$  on Westergaardin jännitysvakio

$$I_w = \frac{Q}{\pi z^2 \left[1 + 2\left(\frac{r}{z}\right)^2\right]^{3/2}} \quad (5)$$

### 2.1.3 Söhnen malli

Söhnen malli pohjautuu Boussinesqin teoriaan, ja siinä hyödynnetään Fröhlichin jännitysvakiota, jonka vaikutusta havainnollistaa kuva 3. Se on laajennettu 3-ulotteiseksi, ja sen tulokset voidaan koota Cauchy'n jännitystensoriksi (7)(kuva 2.)



Kuva 2, Söhnen jännitysmalli (mukaillen (Söhne 1953))

Säteen suuntainen normaalijännitys  $\sigma_{ri}$  on

$$\sigma_{ri} = \frac{\xi \sigma_{wz}}{2\pi r_i^2} \cos^{\xi-2} \theta_i + \frac{\xi \sigma_{wy}}{2\pi r_i^2} \sin^{\xi-2} \theta_i \cos \delta_i \quad (6)$$

Jossa  $\sigma_{wz}, \sigma_{wy}$  on pinnalla vaikuttavat pysty-, ja vaaka jännitykset [pa]  
 $\xi$  on Fröhlichin jännitysvakio (3-6)  
 $\theta$  on säteen kulma pystyakselistä  
 $\delta$  on säteen kulma vaaka-akselista

Cauchy'n jännitystensori

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (7)$$

Jossa 
$$\sigma_z = \sum_{i=0}^{i=n} (\sigma_z)_i = \sum_{i=0}^{i=n} \sigma_{ri} \cos^2 \theta_i \quad (8)$$

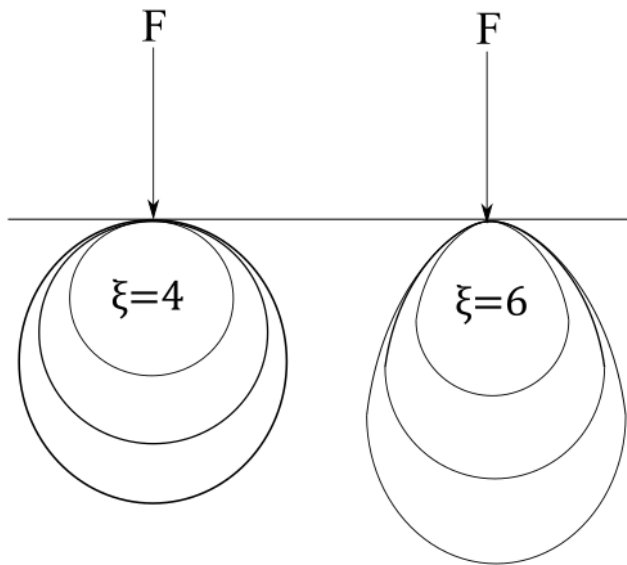
$$\sigma_x = \sum_{i=0}^{i=n} \sigma_{ri} \sin^2 \theta_i \sin^2 \delta_i \quad (9)$$

$$\sigma_y = \sum_{i=0}^{i=n} \sigma_{ri} \sin^2 \theta_i \cos^2 \delta_i \quad (10)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \sum_{i=0}^{i=n} \sigma_{ri} \sin^2 \theta_i \cos \delta_i \sin \delta_i \quad (11)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \sum_{i=0}^{i=n} \sigma_{ri} \cos \theta_i \sin \theta_i \sin^2 \delta_i \quad (12)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \sum_{i=0}^{i=n} \sigma_{ri} \cos \theta_i \sin \theta_i \cos^2 \delta_i \quad (13)$$



**Kuva 3, Fröhlichin jännitysvakion vaikutus voiman F aiheuttamaan jännityskuvioon. (mukaillen (Söhne 1953))**

## 2.2 Diskreettielementtimenetelmä (DEM)

DEM on numeerinen menetelmä partikkelisysteemien mallintamiseen, se on kehitetty 1970 luvulla, ja on tätä nykyä laajalti hyväksytty ja käytetty menetelmä.

Tässä menetelmässä kuormitetun partikkelisysteemin reaktivoimat ja siirtymät saadaan laskemalla yksittäisten partikkelien liikkeitä. Liikkeet lasketaan reunaehtojen alueella sijaitsevien partikkelien etenemisestä. Etenemisen nopeus riippuu partikkelien fyysisistä ominaisuuksista. (Cundall, Strack 1979)

Laskenta tapahtuu aika-askelittain, joiden aikana oletetaan nopeudet ja kiihtyvyydet vakioiksi. Menetelmä nojaa siihen, että aika-askeleet ovat niin pieniä, että yhden askeleen sisällä vain välittömässä läheisyydessä olevat partikkelit voivat vuorovaikuttaa keskenään. Siten kaikkien partikkelien reaktivoimat määrittyvät ainoastaan kontaktissa olevien partikkelien vuorovaikutuksesta. (Cundall, Strack 1979)

Laskenta on kaksivaiheinen, siinä sovelletaan sekä Newtonin II lakia sekä deformaation aiheuttamia voimia. Newtonin II lain avulla muutetaan partikkelien voimat liikkeiksi, ja deformaation avulla saadaan partikkelien kontaktivoimat. Yksittäisten partikkelien deformaatiot ovat hyvin pieniä verrattuna kokonaisten partikkelisysteemien deformaatioihin, ja ei ole tarpeellista mallintaa partikkelien deformaatiota tarkasti, jotta saataisi luotettavaa tietoa systeemin käyttäytymisestä. (Cundall, Strack 1979)

Menetelmässä partikkelien annetaan limittyä toistensa päälle kontaktin syntyessä, ja tämä tulkitaan partikkelin deformaatioksi. Limittymisen suuruus on suoraan verrannollinen siitä syntyvään reaktivoimaan. Limittymät ovat suhteessa pieniä verrattuna partikkelien kokoon. (Cundall, Strack 1979)

Voimien ja siirtymien määrittymistä havainnollistetaan alla olevalla esimerkillä, jossa kaksi massatonta pyöreää kiekkoa puristetaan kahden jäykän seinämän väliin. Seinät liikkuvat toisiaan kohti vakionopeudella  $v$ . Ajan hetkellä  $t = t_0$ , seinät ja kiekot koskettavat toisiaan, ja reaktivoimia ei synny. Ajan  $\Delta t$  kuluttua, seinämät ovat liikkuneet etäisyyden  $v\Delta t$ . Ottaen huomioon sen oletuksen, että häiriöt eivät voi yhden aika-askelen aikana siirtyä ylitse yhden partikkelin, molemmat kiekot pysyvät paikallaan

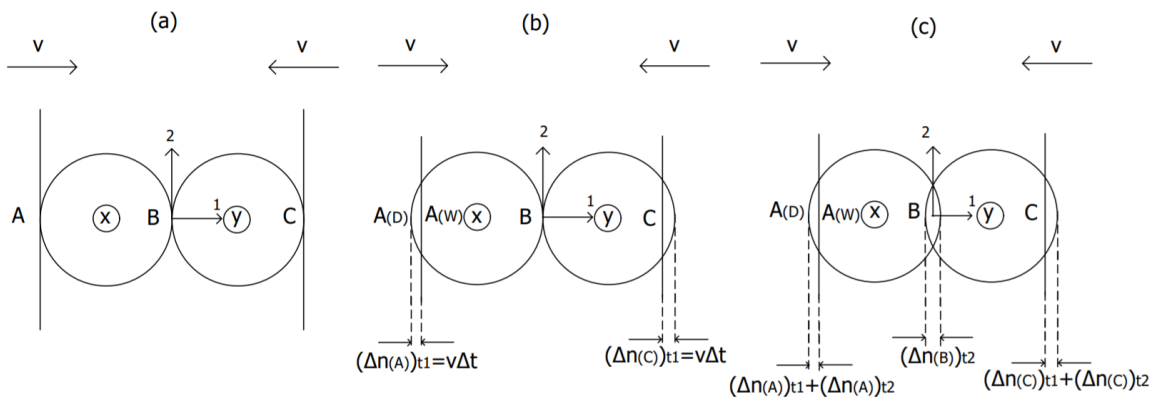
aikavälillä  $\{t_0, t_0 + \Delta t\}$ . Tällöin kiekot ja seinämät ovat limittyneet pisteissä A ja C, ajan hetkellä  $t_1 = t_0 + \Delta t$ , etäisyyden  $\Delta n = v\Delta t$  verran. (kuva 4.)

Pisteiden A ja C siirtymät ajan hetkellä  $t_1$  sijoitetaan edelleen jousivoiman yhtälöön (14), josta saadaan selville syntyvät reaktiivoimat

$$\Delta F_n = k_n(\Delta n)_{r1} = k_n v\Delta t \quad (14)$$

Jossa  $k_n$  on partikkelin jousivakio [N/m]

$\Delta F_n$  on reaktiivoiman muutos [N]



**Kuva 4** Systeemi, jossa kaksi kiekkoa litistyy seinämien väliin (a)  $t = t_0$ : (b)  $t = t_1 = t_0 + \Delta t$ : (c)  $t = t_2 = t_0 + 2\Delta t$  (mukaillen (Cundall, Strack 1979))

Eli esimerkiksi voimat  $F_{(x)1}$  ja  $F_{(y)1}$  kiekkoille x ja y ajan hetkellä  $t_1 = t_0 + \Delta t$  ovat

$$F_{(x)1} = k_n(\Delta n)_{t1}, \quad F_{(y)1} = -k_n(\Delta n)_{t1} \quad (15),(16)$$

Yhtälöstä 1. saatavat voimat sijoitetaan edelleen Newtonin II lakiin, josta saadaan selville kiekkojen x ja y kiihtyvyydet  $\ddot{x}_1$  ja  $\ddot{y}_1$  . [m/s<sup>2</sup>]

$$\ddot{x}_1 = \frac{F_{(x)1}}{m(x)}, \quad \ddot{y}_1 = \frac{F_{(y)1}}{m(y)} \quad (17),(18)$$

Jossa  $m(x), m(y)$  ovat kiekkojen massat [kg]

Yhtälöstä 3 saatavat kiihtyvyydet oletetaan vakioiksi aikavälillä  $t_1 \dots t_2$ , joten tästä voidaan edelleen integroida kiekkojen nopeudet  $\dot{x}_1$  ja  $\dot{y}_1$

$$[\dot{x}_1]_{t_2} = \left[ \frac{F(x)_1}{m_x} \right] \Delta t, \quad [\dot{y}_1]_{t_2} = \left[ \frac{F(y)_1}{m_y} \right] \Delta t \quad (19)$$

Kontaktien A, B, ja C siirtymät ajan hetkellä  $t_2$  voidaan nyt laskea yhtälöistä 20, 21, ja 22.

$$(\Delta n_A)_{t_2} = (v - [\dot{x}_1]_{t_2}) \Delta t \quad (20)$$

$$(\Delta n_B)_{t_2} = ([\dot{x}_1]_{t_2} - [\dot{y}_1]_{t_2}) \Delta t \quad (21)$$

$$(\Delta n_C)_{t_2} = ([\dot{y}_1]_{t_2} - [-v]) \Delta t \quad (22)$$

Laskennassa yllä kuvattu sykli on toistuva, eli limittymistä syntyvät voimat (15, 16) sijoitetaan yhtälöihin 17,18, josta saadaan edelleen siirtymät. Useampien kiekkojen tai partikkelien tapauksessa laskenta tapahtuu vektorimuotoisena. (Cundall, Strack 1979)

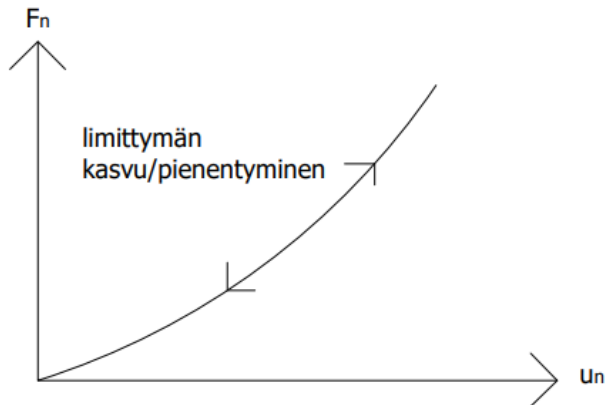
Laskennassa otetaan huomioon myös partikkeleiden pyörimisestä johtuva hitausmomentti, kitka, ja vaimennus, mutta niiden vaikutusta ei käydä tässä työssä läpi, ne on tarkemmin selostettu Cundall & Strackin julkaisussa.

## 2.3 Vuorovaikutusmallit

Tärkeä osa maa-aineksen käyttäytymisen simuloinnissa on oikeanlainen vuorovaikutusmalli. Alun perin Cundall & Strackin DEM mallissa partikkelien välinen vuorovaikutus on lineaarisesti elastinen, kontaktivoimien muodostuessa partikkelin limittymän ja määritetyn jousivakion avulla. Etuna tässä vuorovaikutusmallissa on laskentatehokkuus. Kuitenkaan todellisuudessa vuorovaikutus ei ole useinkaan niin yksinkertaisesti määriteltävissä, vaan siinä saattaa olla tarpeen huomioida myös adheesio- ja koheesivoimat sekä materiaalin plastisuus. Sen vuoksi on otettu käyttöön muitakin vuorovaikutusmalleja, joita ovat HMCN (Hertz-Mindlin Contact Model (Hertz 1882,

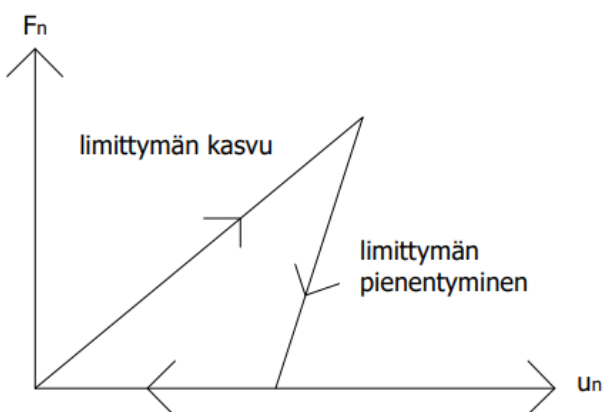
Mindlin 1949)), HSCM (Hysteretic Spring Contact Model (Walton, Braun 1986)), ja PCBM (Parallel Bond Contact Model (Potyondy, Cundall 2004)). (Ucgul, Fielke et al. 2015)

HSCM kuvaa vuorovaikutuksen epälineaarisesti elastisena, reaktivoiman seurattessa samaa käyrää limittymän funktiona (kuva 5.) (Ucgul, Fielke et al. 2014)



**Kuva 5. Epälineaarisesti elastinen vuorovaikutus.  $F$  = reaktivoima[N],  $u$  = limittymä[m]**

HSCM kuvaa materiaalin elastisena tiettyyn ennalta määritettyyn jännitykseen asti, jonka jälkeen se alkaa käyttäytyä plastisesti. Jousivakio on myös määritelty erikseen limittymän kasvulle ja pienentymiselle. Se selittää myös vuorovaikutusmallin nimen, joka juontaa juurensa sen hystereesistä käyttäytymisestä (kuva 6.)



**Kuva 6. HSCM vuorovaikutus.  $F$  = reaktivoima[N],  $u$  = limittymä[m]**

PBCM kuvaa partikkelien välistä koheesiota, ja sitä käytetään yhdessä HSCM:n kanssa. Mikäli PBCM mallissa koheesion vaikutus astetaan nolnaan, on jäljellä vain puhdas HSCM vuorovaikutus. Koheesio kuvataan partikkelien välisenä liitoksena, joka vastustaa tangenti- ja normaalivoimia määritettyyn arvoon asti, jolloin liitos ”rikkoutuu” eikä sitä enää huomoida. (EDEM 2011) . Menetelmä on riittävän hyvä mitä tulee partikkelien välisen koheesion simulointiin, mutta sillä ei voi mallintaa muokkauskoneen ja partikkelien välistä adhesiivista vuorovaikutusta (Ucgul, Fielke et al. 2015)

Adheesion ja koheesio voimat voidaan kuitenkin huomioida myös periaatteella, jossa niiden aiheuttamat voimat ovat suoraan verrannollisia koheesioenergiatiheyteen, joka määritellään partikkelien erottamiseen tarvittulla energialla jaettuna partikkelien tilavuudella. Voima saadaan tästä kertomalla energiatiheys partikkelien tai muun pinnan välisellä pinta-alalla. Tämä yhdessä HSCM:n kanssa on todettu olevan edellämaituista realistisimpia tuloksia saavuttava vuorovaikutusmalli mitä tulee muokkauskoneeseen syntyviin kuormituksiin, kun tuloksia verrataan aiemmin tehtyihin empirisiin kokeisiin. (Fielke 1988) (Ucgul, Fielke et al. 2015)



### 3 HYÖDYNTÄMINEN KONEENSUUNNITTELUSSA

Tietokoneiden laskentatehon suuren kasvamisen johdosta insinöörin on mahdollista hyödyntää erilaisten simulaatioiden yhdistelmiä, esimerkiksi minkälaisia jännityksiä maanmuokkauskoneeseen syntyy, kun sitä vedetään pellossa. Toisaalta myös simulaatioiden avulla voidaan tarkastella, miten erilaiset maa-ainekset käyttäytyvät erilaisten kuormien alla, ja myös tietysti miten erilaiset maanmuokkauskoneet toimivat maa-aineksen sekoittamisessa ja kuohkeuttamisessa. Tässä osiossa esittelen artikkeleita koskien yllä mainitun kaltaisia tapauksia.

#### 3.1 Koneen kuormitusten simulointi

Kenties eniten koneensuunnitteluun liittyvä sovellus DEM:lle, on koneeseen työssä syntyvien kuormitusten mallinnus. Sen tyyppistä simulointia on tehty ja tutkittu viimeisten vuosikymmenten aikana. Esittelen tässä yhden uusimmista julkaisuista aiheeseen liittyen. (Kešner, Chotěborský et al. 2021)

Artikkelissa simuloidaan kultivaattorin runkoon työssä syntyviä jännityksiä, ja niitä verrataan tosielämässä tehtyyn venymäliuskakokeen tuloksiin. Simulointi tehdään siten, että ensin DEM:ssä simuloidaan jäykän muokkauskoneen geometrian avulla siihen syntyvät kuormat, jonka jälkeen ne edelleensijoitetaan muokkauskoneen FEM malliin, jossa siihen syntyvät jännitykset lasketaan. Tätä kutsutaan transientiksi simuloinniksi. . (Kešner, Chotěborský et al. 2021)

Artikkelissa DEM vaiheessa FEM:iin siirrettävä data kerättiin DEM:istä 0,05 sekunnin välein, aika-askeleen ollessa  $8.68 \cdot 10^{-6}$ s. Maa-ainesta simuloiva alue on kooltaan 12x2x0,5m, ja partikkelien koko on kerroksesta riippuen 10-20mm. Kokonaislaskenta-aika simulaatiolle oli 17,5 tuntia. Käytetty vuorovaikutusmalli on HSCM, ja adheesio kuvataan lineaarisesti. Käytetty DEM ohjelma on Rocky DEM, ja FEM ohjelmana toimii ANSYS. . (Kešner, Chotěborský et al. 2021)

Maa-ainesta kuvaava malli on muodostettu kartiopenetrometrillä suoritettujen mittausten avulla. Tulosten perusteella päätettiin simulaatiossa jakaa maa-aines kolmeen kerrokseen.

Mitattu suure on penetraatiovastus [Pa] syvyyden funktiona. (Kešner, Chotěborský et al. 2021)

Yhteenvedona lopussa todetaan, että simulaation tulokset vastaavat melko hyvin venymäliuskamittausten tuloksia, suurimman eron ollen 28,42%, mutta kuitenkin suurimman osan tuloksista ollen alle 20% päässä mitatuista. Laskennan tulokset olivat pääsääntöisesti optimistisia, eli jännitykset olivat mitattuja pienempiä. (Kešner, Chotěborský et al. 2021)

### 3.2 Maa-aineksen rasiusten simulointi

DEM tuo mahdollisuuksia tällekin alueelle, aiemmin simuloinnin perustuen analyyttisiin menetelmiin pohjaaviin ratkaisuihin. Tässä kappaleessa esittelen kolmiosaisen, viimevuosina julkaistun artikkelisarjan jossa on tutkittu DEM:n hyödyntämistä tiivistymien simulointiin. (De Pue, Cornelis 2019, De Pue, Lamandé, and Cornelis 2020, De Pue, Lamandé, Schjønning et al. 2020). Ensimmäisessä osassa esitellään käytettyä DEM-, sekä analyyttistä mallia, toisessa osassa käsitellään renkaan ja maanpinnan välistä vuorovaikutusta, ja kolmannessa tuloksia vertaillaan koetulosten kanssa.

Artikkelissa käytetty DEM malli on luotu YADE ohjelmalla. Partikkelien vuorovaikutusmalli on HSCM. Partikkelit ovat pallon muotoisia laskennan keventämiseksi. Niiden rotaatiovapausaste on lukittu, jolla tavoitellaan epämääräisen muotoisten partikkelien käyttäytymistä. (De Pue, Cornelis 2019)

Analyttisissä malleissa haasteena on luoda oikeanlaiset reunaehdot. Staattisessa tapauksessa erilaiset renkaan ja maanpinnan vuorovaikutusta kuvaavat reunaehdot antavat vielä luotettavia tuloksia, mutta dynaamisissa tapauksissa kysymykseen tulee vaakasuuntaisten pitovoimien vaikutusten mallintaminen. Artikkelisarjan toisessa osassa (De Pue, Lamandé et al. 2020) kokeillaan erilaisia reunaehdoja painejakauman mallintamiseen analyyttisellä menetelmällä. Esimerkiksi yksi reunaehto perustuu aiemmin kehitettyyn FRIDA nimiseen malliin (Schjønning, Lamandé et al. 2008), joka otaksuu painejakauman superellipsin muotoiseksi. Tuloksia verrataan DEM:in tuloksiin, jossa pyörivä rengas mallinnetaan jäykkänä kappaleena. Tulokset ovat vaihtelevia, eikä tämän tutkimuksen perusteella ole järkevää linjata, mikä menetelmä on luotettavin.

Analyttisten menetelmien kohdalla ei ole syntynyt yleistä konsensusta siitä minkälaisia voimia kuormaa vetävä pyörä aiheuttaa maan ja renkaan rajapinnassa, joskin kehitetyissä ohjelmissa, kuten SoilFlex (Keller, Défossez et al. 2007) se kuitenkin on huomioitu. Tuloksia ei kuitenkaan ole todennettu. (De Pue, Lamandé et al. 2020)

DEM mallissa taas pyörivä rengas voidaan mallintaa jäykkänä kappaleena, pohjautuen aiempaan julkaisuun (Wong, Reece 1967) koskien pyörän ja maa-aineksen vuorovaikutusta. Tällöin painejakauma on haettu analyttisiä malleja vastaavaksi muuttamalla pyörän sädettä. Tulokset ovat jotakuinkin luotettavia. Kuitenkaan täydelliseen vastaavuuteen mittaustulosten kanssa ei päästä. (De Pue, Lamandé et al. 2020)

Yhteenvedon todetaan, että mekaniikka tiivistymien takana pysyy vielä osittain hämärän peitossa. Tärkeä huomio on pitovoimien huomioimisen tärkeys, kuten useissa lähteissä on todettu aiemminkin. Kumpikaan menetelmä, analyttinen tai DEM, ei kyennyt mallintamaan pitovoimien vaikutusta koetuloksia vastaaviksi. Kuitenkin DEM:n tulokset olivat huomattavasti lähempänä, ja täten DEM:llä voisi olla potentiaalia etenkin pitovoimien mekaniikan tutkimisessa. (De Pue, Lamandé et al. 2020)

### **3.3 Maa-aineksen käyttäytymisen mallinnus muokkauksessa**

Maataloudessa tarvitaan paljon erilaisia muokkaukoneita, jotka tyypillisesti ovat kehitetty tietynlaista käyttötarvetta varten. Erilaiset maalajit tarvitsevat erilaisia muokkausmenetelmiä. Pääsääntöisesti tarkoitus on maa-aineksen kuohkeutus, eri tavoilla ja eri syvyyksillä. Esimerkiksi pohjoismaissa laajalti käytetty, piikin värähtelyyn perustuva joustopiikkiäes muokkaa vain pintamaata, kun taas kyntöaura kääntää koko pintamaan, eli 15-30cm syvän kerroksen n. 30-50cm leveä ”viilu” kerrallaan.

Muokkaukoneiden kehitykseenkin DEM tuo mahdollisuuksia, sillä se voidaan valjastaa myös maa-aineksen sekoittumisen ja kuohkeutumisen simulointiin erilaisissa muokkaustapauksissa. Tämän tyyppistä simulointia on tehnyt esimerkiksi (Barr, Ucgul et al. 2018), jota tässä osiossa käsitellään.

Artikkelissa käsitellään Australiassa laajalti käytetyn suorakylvökoneen maakerrosten sekoituskykyä. Koneen tarkoitus on muokata maahan sopiva ura johon siemenet ja

lannoite sijoitetaan. Simuloinnissa kokeillaan kahta eri teräkulmaa. Tuloksia verrataan aiemmin tehtyisiin empiirisiin kokeisiin (Solhjou, Fielke et al. 2012), jossa on kokeiltu erilaisia teräkulmia. Siinä maa-aineksen sekoittumista on tutkittu asettamalla jäljittämiä eri kerrokseen muokkauskoneen vaikutusalueelle, ja tutkimalla niiden siirtymää. Vertailua tehdään myös vielä aiemmin julkaistuun, empiirisiin havaintoihin (Godwin, Spoor 1977) pohjautuvaan malliin kyseisen terätyypin vaikutuksesta maa-ainekseen.

DEM mallissa on jälleen käytössä vuorovaikutusmalli HSCM. Partikkelien koko on 2-3mm satunnaisella jakaumalla. Sen katsottiin olevan pienin partikkelikoko järkevän laskenta-ajan puitteissa, joka on määritetty 125 tuntiin. (Barr, Ucgul et al. 2018)

Tulosten tarkasteluun DEM simuloinnissa käytettiin menetelmää, jossa simuloitulle alueelle luodaan 3-ulotteinen verkko, joka muodostaa suorakulmaisen särmiön muotoisia soluja. Tämän avulla muodostetaan systeemin nopeusprofiili laskemalla kunkin solun sisällä olevien partikkelien keskimääräinen nopeus. Lisäksi verkon avulla muodostetaan profiili, joka kuvaa osuutta solun kokonaistilavuudesta, mitä partikkelit eivät ole syrjäyttäneet. Se kertoo siis aineen tiheydestä tai kuohkeudesta. (Barr, Ucgul et al. 2018)

Maa-aineksen sekoittumista tarkastellaan samaan tapaan kuin empiirisissä kokeissa, seuraamalla partikkelien liikkeitä. Partikkelisysteemi jaettiin 9 kerrokseen, ja kunkin kerroksen partikkelien liikkeitä seurattiin koneen kulkusuuntaan kohtisuorassa poikkileikkauksessa, vastaavasti kuten empiirisissä kokeissa. (Barr, Ucgul et al. 2018) Lisäksi tutkittiin partikkelien vaakasuuntaista liikettä, joita verrattiin 2012 tehtyihin kokeisiin. Myös muokkausvoimia tutkittiin ja niitä verrattiin Godwind & Spoorin tuloksiin.

Yhteenvedossa todetaan vuorovaikutusmalli HSCM:n sekä tulosten tarkasteluun käytetyn verkotusmenetelmän vievän DEM:n yhä lähemmäs koetuloksia. Tarkasteluverkon kokoa suhteessa partikkelikokoon tutkittiin myös, ja sille löydettiin sopiva suhdeluku. Kehityksen kohteina mainitaan partikkelikoon pienentäminen, adheesiomallien kehittäminen sekä erilaisten vuorovaikutusmallien tutkiminen.

## 4 YHTEENVETO

Työ suoritettiin kirjallisuuskatsauksena. Siinä käytiin läpi tiivistymien simuloinnin lisäksi partikkelisimulaation teoriaa, sekä maanmuokkauskoneiden toimivuuden-, ja niihin työssä syntyvien rasitusten mallinnusta.

Tiivistymien aiheuttamat ongelmat maataloudessa ovat olleet kauan tiedossa. Tutkimus on aiemmin kohdistunut suurimmalta osin tiivistymien haittoihin, ja niiden ehkäisyyn, mutta niiden mekaniikka on suhteellisen uusi tutkimuksen kohde. Se on ottanut kehitysaskelaita viimeisen 20 vuoden aikana paljon. Kenties lupaavin menetelmä on DEM. Sen kehitys keskittyy suurilta osin partikkelien vuorovaikutusmallien kehittämiseen.

Tässä työssä käsitellyt tutkimukset ja artikkelit ovat suhteellisen uusia, viime-, tai tällä vuosikymmenellä julkaistuja. Julkaisujen määrä koskien maa-aineksen mekaniikan simulointia on viimeisen parinkymmenen vuoden aikana kasvanut, ja voidaan linjata, että kyseessä on kasvava ala ja tutkimuskohde.

Työssä käsitellyissä julkaisuissa käytetty menetelmä on poikkeuksetta DEM. Usein myös analyttiset menetelmät ovat kuitenkin yhä tutkimuksissa ja mallinuksissa käytössä. Aiemmin etenkin tiivistymien mekaniikkaan on käytetty analyttisiin malleihin pohjautuvia ratkaisuja. Niiden käyttö on kuitenkin rajoitteellista. Ongelmia tuottaa dynaamiset tapaukset ja soveltaminen esimerkiksi muokkauskoneen ja maan vuorovaikutuksen simulointiin. Tämän työn perusteella ei voida olettaa, onko analyttiset menetelmät historiaa, vaikka DEM viehättääkin monine mahdollisuuksineen. Analyttisten mallien etuna on kuitenkin laskentatehokkuus.

DEM:n tapauksessa myös tietokoneiden laskentatehon kasvaminen on ehdottomasti tärkeä osa simuloinnin kehitystä, sillä mallit ovat suuren partikkelimäärän vuoksi raskaita. Simulaatiot kestävät nykyisilläänkin tietokoneilla usein kymmeniä tai satoja tunteja. Aiemmin kynnyks esimerkiksi muokkauskoneen ja maa-aineksen vuorovaikutusta kuvaavalle simulaatiolle on siis ollut korkea, vaikka laskentamallit ovat sinänsä olleet tiedossa.

Vuorovaikutusmallit ovat tärkeä osa simulointia, koska maa-aineksen tapauksessa vuorovaikutus ei ole yksinkertaisesti kuvailtavissa. Useimmissa tapauksissa on otettava huomioon partikkelien ja niihin vuorovaikuttavien kappaleiden väliset adheesio- ja koheesiovoimat, sekä materiaalin plastisuus. Kaikissa tässä työssä käsitellyissä artikkeleissa vuorovaikutusmalli on ollut HSCM, ja tämän työn perusteella sitä voidaan pitää tähän mennessä luotettavimpana vuorovaikutusmallina.

Keskustelut kandiohjaajani Jari Laukkasen kanssa toivat ilmi, että tiivistymien simuloinnille on tarvetta myös rakennustekniikassa, esimerkiksi pohjarakenteiden kantavuuden, tai esimerkiksi veden läpäisykyvyn määrittämisessä.

## 5 LÄHDELUETTELO

- BARR, J.B., UCGUL, M., DESBIOLLES, J.M.A. and FIELKE, J.M., 2018. Simulating the effect of rake angle on narrow opener performance with the discrete element method. *Biosystems Engineering*, **171**, pp. 1-15.
- BOUSSINESQ, J., 1885. Auteur du texte. Application des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques, principalement au calcul des déformations et des pressions que produisent, dans les solides, des efforts quelconques exercés sur une petite partie de leur surface ou de leur intérieur : mémoire suivi de notes étendues sur divers points de physique mathématique et d'analyse / par J. Boussinesq,... Gauthier-Villars (Paris); 1885.
- CUNDALL, P.A. and STRACK, O.D.L., 1979. A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, **29**(1), pp. 47-65.
- DE JOSSELIN DE JONG. G & VERRUIJT. A, 1969. Etude photo-élastique d'un empilement de disques.
- DE PUE, J. and CORNELIS, W.M., 2019. DEM simulation of stress transmission under agricultural traffic Part 1: Comparison with continuum model and parametric study. *Soil and Tillage Research*, **195**.
- DE PUE, J., LAMANDÉ, M. and CORNELIS, W., 2020. DEM simulation of stress transmission under agricultural traffic Part 2: Shear stress at the tyre-soil interface. *Soil and Tillage Research*, **203**.
- DE PUE, J., LAMANDÉ, M., SCHJØNNING, P. and CORNELIS, W.M., 2020. DEM simulation of stress transmission under agricultural traffic Part 3: Evaluation with field experiment. *Soil and Tillage Research*, **200**.
- DERESIEWICZ, H., 1958. *Mechanics of Granular Matter*.
- EDEM, 2011. EDEM theory reference guide.
- FIELKE, J.M., 1988. *The influence of the geometry of chisel plough share wings on tillage forces in sandy loam soil / John Milton Fielke*.
- FRÖHLICH, O.K., 1934. *Druckverteilung im Baugrunde*.
- GODWIN, R.J. and SPOOR, G., 1977. Soil failure with narrow tines. *Journal of Agricultural Engineering Research*, **22**(3), pp. 213-228.
- HERTZ, H., 1882. Ueber die Berührung fester elastischer Körper. *Journal fur die Reine und Angewandte Mathematik*, **1882**(92), pp. 156-171.
- KELLER, T., DÉFOSSEZ, P., WEISSKOPF, P., ARVIDSSON, J. and RICHARD, G., 2007. SoilFlex: A model for prediction of soil stresses and soil compaction due to

agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches. *Soil and Tillage Research*, **93**(2), pp. 391-411.

KEŠNER, A., CHOTĚBORSKÝ, R., LINDA, M., HROMASOVÁ, M., KATINAS, E. and SUTANTO, H., 2021. Stress distribution on a soil tillage machine frame segment with a chisel shank simulated using discrete element and finite element methods and validate by experiment. *Biosystems Engineering*, **209**, pp. 125-138.

MINDLIN, R.D., 1949. No title. , pp. 259-268.

POTYONDY, D.O. and CUNDALL, P.A., 2004. A bonded-particle model for rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **41**(8 SPEC.ISS.), pp. 1329-1364.

SCHJØNNING, P., LAMANDÉ, M., TØGERSEN, F.A., ARVIDSSON, J. and KELLER, T., 2008. Modelling effects of tyre inflation pressure on the stress distribution near the soil-tyre interface. *Biosystems Engineering*, **99**(1), pp. 119-133.

SOANE, B.D. and VAN OUWERKERK, C., 1995. Implications of soil compaction in crop production for the quality of the environment. *Soil and Tillage Research*, **35**(1-2), pp. 5-22.

SÖHNE, W., 1953. *Druckverteilung im Boden und Bodenverformung unter Schleppereifen (Pressure distribution in soil and soil deformation under tractor tyres)*.

SOLHJOU, A., FIELKE, J.M. and DESBIOLLES, J.M.A., 2012. Soil translocation by narrow openers with various rake angles. *Biosystems Engineering*, **112**(1), pp. 65-73.

STETTLER, M., KELLER, T., WEISSKOPF, P., LAMANDÉ, M., LASSEN, P. and SCHJØNNING, P., 2014. Terranimo® - a web-based tool for evaluating soil compaction. *Landtechnik*, **69**(3), pp. 132-138.

UCGUL, M., FIELKE, J.M. and SAUNDERS, C., 2015. Three-dimensional discrete element modelling (DEM) of tillage: Accounting for soil cohesion and adhesion. *Biosystems Engineering*, **129**, pp. 298-306.

UCGUL, M., FIELKE, J.M. and SAUNDERS, C., 2014. Three-dimensional discrete element modelling of tillage: Determination of a suitable contact model and parameters for a cohesionless soil. *Biosystems Engineering*, **121**, pp. 105-117.

WALTON, O.R. and BRAUN, R.L., 1986. Stress calculations for assemblies of inelastic speres in uniform shear. *Acta mechanica*, **63**(1-4), pp. 73-86.

WESTERGAARD, H.M., 1925. *Theory of Stresses in Road Slabs*.

WONG, J. and REECE, A.R., 1967. Prediction of rigid wheel performance based on the analysis of soil-wheel stresses part I. Performance of driven rigid wheels. *Journal of terramechanics*, **4**(1), pp. 81-98.