

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU

Metsätalouden koulutusohjelma

Atso Tarkkinen

LASERKEILAUSPISTEPILVESTÄ TUOTETUN DIGITAALISEN  
KORKEUSMALLIN SOVELTUVUUS METSÄTEIDEN KUNNOS-  
TUSTARPEEN SELVITTÄMISEKSI

Opinnäytetyö  
Toukokuu 2015



**OPINNÄYTETYÖ**  
**Toukokuu 2015**  
**Metsätalouden koulutusohjelma**

Sirkkalantie 12 A  
80100 JOENSUU  
013 260 6900

Tekijä(t)  
Atso Tarkkinen

Nimeke  
Laserkeilauspistepilvestä tuotetun digitaalisen korkeusmallin soveltuvuus metsäteiden kunnostustarpeen selvittämiseksi.

Toimeksiantaja  
Metsähallitus

Tiivistelmä

Metsäteiden kunnossapito aiheuttaa Metsähallitukselle suuret vuotuiset kustannukset. Resursseja yritetään kohdentaa tarkemmin ja jokaiselle tieosuudelle pyritään suunnittelemaan vain tarvittavat tienpidon toimenpiteet. Jotta kunnostustoimet voidaan suunnitella tarkasti, teiden kuntoa mitataan muun muassa kantavuusmittauksilla. Tarkat mittaukset edellyttävät ennakkotietoa tiestön mahdollisista heikoista kohdista.

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin, kuinka laserkeilauspistepilvestä tuotetusta digitaalisesta korkeusmallista saadut tienpinnan ja sitä ympäröivän maaston korkeuserot selittävät metsätielle tehtyjen kantavuusmittausten tuloksia. Lisäksi tutkittiin, kuinka hyvin korkeusmalli kuvaa kesällä 2014 mitattua tien kuivavaraa ja kuinka korkeusmallista saadaan tietoa tienpinnan muodoista. Selittävyystutkimukset tehtiin tilastollisilla regressioanalyysillä. Analyysit tehtiin luokittain kivennäismaalle, suolle ja soistumalle sekä suolle. Korkeusmallista muodostettiin lisäksi uusi malli, joka esittää maanpinnan korkeuseroa tien keskiviivaan nähden.

Tietä ympäröivän maanpinnan ja tienpinnan korkeuserojen ei havaittu korreloivan tien kantavuuden kanssa. Tien kantavuus riippuu niin monesta muuttujasta, että pelkkä tienpinnan korkeus ympäröivään maaston nähden ei riitä sitä selittämään. Korkeusmallista saatu kuivavaratieto korreloi mitatun kuivavaran kanssa, mutta regressiomallissa on suuri harha, keskivirhe ja luottamusväli. Korkeuseromallista nähtiin tienpinnan poikittaisia muotoja, mutta tässä työssä löydettyjä havaintoja ei todennettu. Tämän vuoksi tarvitaan lisätutkimuksia. Jatkuvaa pitkittäisen tienpinnan muodon havainnollistamista kannattaa myös selvittää.

Kieli  
suomi

Sivuja 39

Liitteet 1

Asiasanat  
opinnäytetyö, maanpinnan korkeus, metsätiet, tienpito



**THESIS**  
**May 2015**  
**Degree Programme in Forestry**  
Sirkkalantie 12 A  
FI 80100 JOENSUU  
FINLAND  
013 260 6901

Author(s)  
Atso Tarkkinen

Title  
The Suitability of Digital Elevation Model Produced from Lidar Point Cloud in Determination of Need for Forest Road Maintenance

Commissioned by  
Metsähallitus

Abstract

Forest road maintenance causes great annual costs for Metsähallitus. Therefore, the use of resources must be planned more accurately. For more precise maintenance planning the condition of forest roads are measured amongst other things for their bearing capacity. Precise measurement planning requires some advance information of possible places with reduced bearing capacity.

The aim of this thesis was to study the correlation between ground relief of road surface and the surrounding ground surface collected from digital elevation model, and the measurements of the bearing capacity. In addition, the correlation between dry soil margin collected from the elevation model and margin measured on site in 2014 was studied. For the statistic regression analyses the data was categorized into mineral soil, peat covered area and mire, and mire only. New digital model was also introduced. It represents the relief between the road centre and the surrounding ground.

There was not any correlation discovered between the relief and road bearing capacity. The dry margin measured correlates with the margin collected from the elevation model. However, there is a great bias, standard error of the mean and confidence interval. Transverse ground shapes were observed from the relief model.

There are too many variables affecting the bearing capacity for the relief between the road and surrounding ground to explain it. The observations of the relief model were not confirmed on site in this thesis. Therefore, the use of the model for representing the roads condition must be studied further. Also discovering of the longitudinal shapes in the roads surface from elevation model must be studied more.

Language  
Finnish

Pages 39

Appendices 1

Keywords  
thesis, ground elevation, forest roads, road maintenance

## Sisältö

1	Johdanto .....	5
2	Metsätiet ja Metsähallitus tienpitäjänä .....	6
2.1	Soratien kantavuuteen vaikuttavat seikat.....	7
2.2	Metsähallitus tienpitäjänä.....	10
2.2.1	Nykyiset kunnostussuunnittelun ja tienpidon menetelmät Metsähallituksessa .....	11
2.2.2	Metsähallituksen metsäteiden käyttötarkoitus.....	12
2.3	Pudotuspainomittaus .....	12
2.4	Laserkeilaus ja maanpinnan korkeusmalli .....	14
2.4.1	Ilmalaserkeilaus .....	14
2.4.2	Maanpinnan korkeusmallit .....	15
3	Opinnäytetyön tavoite .....	17
4	Aineisto ja menetelmät.....	18
4.1	Aineisto ja sen käsittely.....	19
4.1.1	Laserkeilaus- ja korkeusmalliaineisto .....	19
4.1.2	Pudotuspainomittausaineisto .....	19
4.1.3	Maastosta mitattu ja arvioitu aineisto.....	20
4.1.4	Aineiston käsittely .....	21
4.1.5	Korkeuseromalli .....	23
4.2	Aineiston analysointimenetelmät .....	24
4.2.1	Korrelaatioanalyysi .....	26
4.2.2	Regressioanalyysi.....	26
5	Tulokset .....	27
5.1	Pientareiden ja tienpinnan korkeuserot.....	27
5.2	Ojien syvyydet ja kantavuus .....	29
5.3	Kuivavara.....	30
5.4	Korkeuseromalli .....	30
6	Yhteenveto.....	34
	Lähteet.....	38

## Liitteet

Liite 1      Regressioanalyysien tulokset

## 1 Johdanto

Tämä on opinnäytetyö aiheesta laserkeilauspistepilvestä muodostetun digitaalisen korkeusmallin soveltuvuus metsäteiden kunnostustarpeen selvittämiseksi. Työn toimeksiantajana oli Metsähallitus.

Metsähallituksella on metsäteitä yli 30 000 kilometriä ja tiestön ylläpitoon kuluu vuosittain jopa 15 miljoonaa euroa. Tämän vuoksi tienpitoon ja sen suunnitteluun pyritään löytämään uusia keinoja kustannustehokkuuden parantamiseksi. Suunnittelun apuna käytetään nykyään kantavuusmittauksia, jolloin kunnostustoimenpiteitä voidaan kohdentaa tehokkaammin. Mittaustarkkuudesta joudutaan kuitenkin kustannussyistä tinkimään. Siksi olisi hyvä olla menetelmä, jolla maan kantavuutta voitaisiin ennustaa eri tien osissa. Tällöin mittaukset voitaisiin suunnitella tarkemmin.

Metsäteiden kantavuuteen vaikuttavia tekijöitä on monia, aina pohjamaan laadusta tien pinnan muotoon. Liika vesi tien rakenteissa huonontaa tien kantavuutta merkittävästi. Maan pohjavesi mukailee maanpinnan muotoja. Metsien puuvarannon mittaamiseen tarkoitettua laserkeilausaineistosta voidaan muodostaa maanpinnalle korkeusmalli.

Tämän työn tavoitteena oli selvittää, voidaanko laserkeilausaineistosta tuotettua maaston digitaalista korkeusmallia hyödyntää Metsähallituksen tieverkkosuunnittelussa kantavuudeltaan heikentyneiden tien kohtien etsimiseen. Työssä keskityttiin korkeusmallista saatavien tien ja läheisen maaston korkeuserojen ja kantavuustulosten vertailuun. Lisäksi tutkittiin voidaanko korkeusmallista nähdä tien pinnan muotoja.

## 2 Metsätiet ja Metsähallitus tienpitäjänä

Metsätiet ovat teitä, joita käytetään ensisijaisesti metsätalouden tarpeisiin joko ympärivuotisesti tai osan vuotta. Metsätiet jaetaan runkoteihin, alueteihin ja varsiteihin niiden merkityksen mukaan tieverkossa. (Metsäteho 2001a, 4.)

Metsäteitä ylläpidetään hoidoin, kunnostuksin ja perusparannuksin. Hoidot ovat jokapäiväisen liikennöinnin sujumisen mahdollistavia toimenpiteitä. Kunnostustoimilla saatetaan kuluneet ja vaurioituneet rakenteet ennalleen. Perusparannuksen tarkoituksena on korjata tietä niin, että sen kunto vastaa nykypäivän tarpeita. (Metsäteho 2001a, 4–5.)

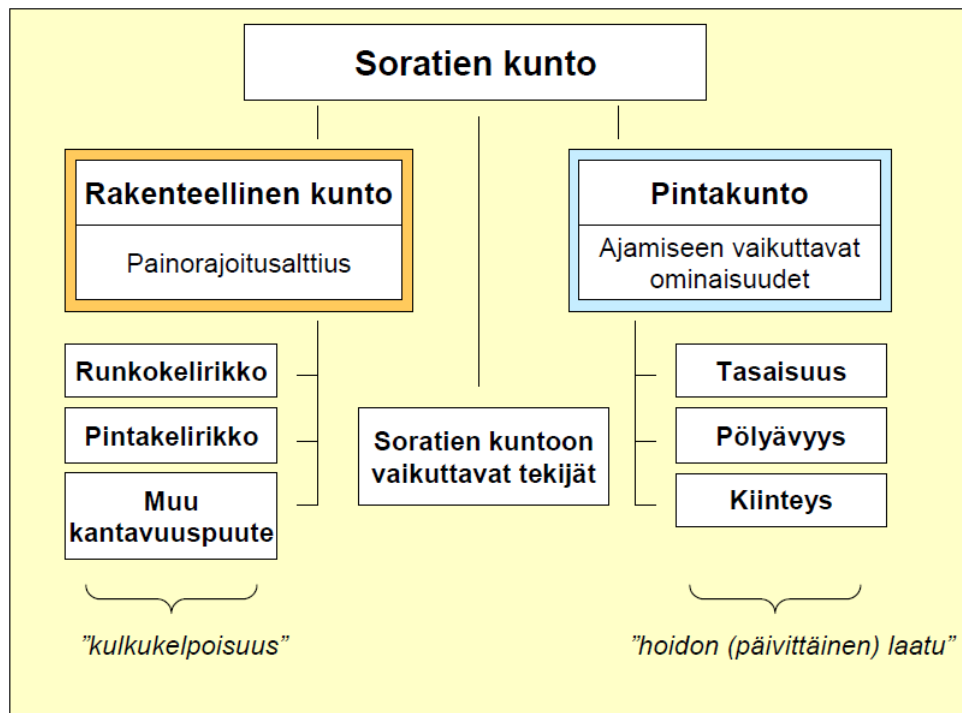
Hoitotoimet ovat keveitä toimenpiteitä. Niihin kuuluvat muun muassa höyläykset, lanaukset ja auraus. Kunnostustoimiin kuuluvat kevyemmät rakenteen korjaukset, esimerkiksi sorastus, kivien poisto tai rumpujen kunnostus. Peruskorjaus on järein toimenpide ja siinä voidaan joutua avaamaan ja korjaamaan teiden perustuksia. (Metsäteho 2001a, 4–5.) Peruskorjauksiin kuuluu muun muassa sivuojien avaaminen. (kuva 1).



Kuva 1. Metsätie, josta sivuojat avattu. (Kuva: Atso Tarkkinen)

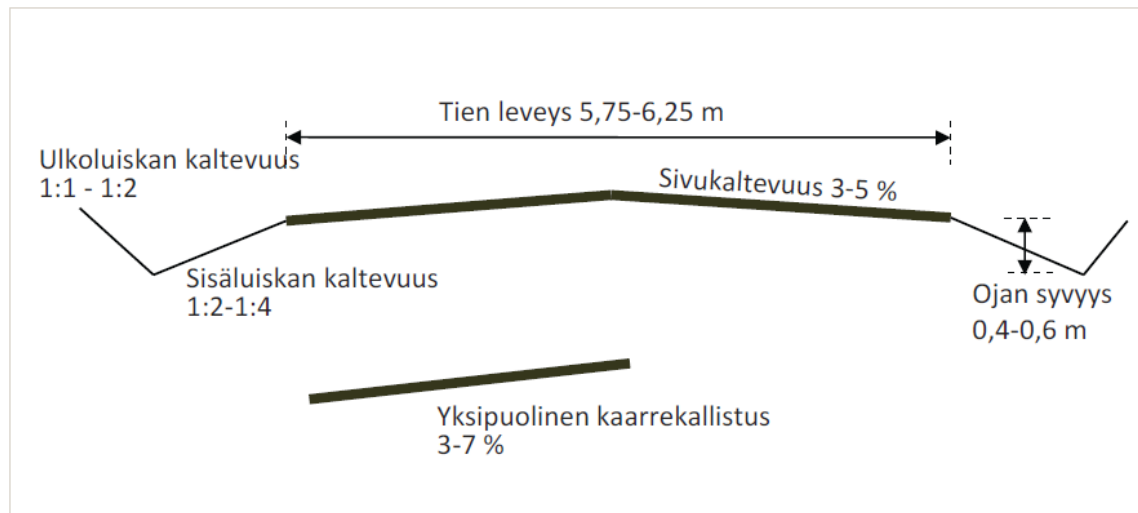
## 2.1 Soratien kantavuuteen vaikuttavat seikat

Soratien kunto voidaan jakaa rakenteelliseen kuntoon ja pintakuntoon (Kuva 2). Rakenteelliseen kuntoon voidaan vaikuttaa ylläpidolla ja pintakuntoon hoidolla. Tien kuntoon vaikuttavat tien muoto, kuivatus, tien rakenne, materiaalit, pohjamaan laatu, olosuhteet, liikenne ja tien rakennuksen ja kunnossapidon laatu. Kuivatus ja kulutuskerros ovat tärkeitä hoidon ja ylläpidon kohteita. (Liikennevirasto 2014, 10.)



Kuva 2. Soratien kunnon eri osatekijät (Liikennevirasto 2014, 10).

Soratien poikkileikkausmuoto on esitetty kuvassa 3. Liikenneviraston ohjeen (2014, 20) mukainen soratien sivukaltevuus tulisi olla  $4\% \pm 1\%$  ja kaarteissa 3–7 %. Sivukaltevuuden on oltava tasainen, eikä muodoltaan pyöreä, jolloin keskellä kaltevuus olisi pienempi. (Liikennevirasto 2014, 20.)



Kuva 3. Soratien poikkileikkaus (Liikennevirasto 2014, 20).

Liian pieni sivukaltevuus aiheuttaa kuoppaisuutta ja uria veden ja liikenteen yhteisvaikutuksena (Kuva 4), kun vesi ei pääse poistumaan sivuojiin. Riittävä sivukaltevuus ehkäisee pintakelirikkoa sateisina aikoina sekä tien pituussuuntaista veden virtausta mäkisissä maastoissa vähentäen syöpymistä ja kuoppaisuutta. (Liikennevirasto 2014, 20.)



Kuva 4. Veden ja liikenteen kuluttama metsätie. (Kuva: Atso Tarkkinen)



Liian suuri sivukaltevuus voi olla ajomukavuuden kannalta epämiellyttävä. Lisäksi se voi jopa aiheuttaa korkeiden ja raskaiden ajoneuvojen kaatumisvaaran varsinkin, jos reunojen kantavuus on heikentynyt. Suuri kaltevuus voi myös aiheuttaa ajoneuvojen sivuttaista liukumista liukkailla keleillä. (Liikennevirasto 2014, 20.)

Rungon poikkileikkauksen mitoitus riippuu maapohjan kantavuudesta. Mitä heikompi maaperän kantavuus, ja mitä suurempi kantavuusvaatimus tielle, sitä vahvempi rungon täytyy olla. (Metsäteho 2001a, 37.)

Kun maan pintaan vaikuttaa pystysuuntainen voima, sen aiheuttama paine leviää maan sisässä sitä laajemmalle alueelle, mitä syvemmälle mennään. Tällöin syvällä maassa kuormitus pinta-alayksikköä kohti pienenee. Kantavuus voi olla hyvä huonosti kantavilla maalajeilla, jos kuormitetun pinnan alla oleva kantava kerros on tarpeeksi paksu. (Etelätalo 2014, 5.)

Maaperän kantavuus riippuu maalajin raekokojakaumasta ja vesipitoisuudesta. Yleisesti voidaan sanoa, että raekoon kasvaessa kantavuus paranee. Jos suurten rakeiden välit täyttyvät pienemmistä rakeista, maan huokoisuus pienenee ja tällöin kokoonpuristuvuus ja kimmoisuus pienenevät. Tämä lisää maaperän kantavuutta. Tällaisia maalajeja ovat esimerkiksi moreenimaat. (Etelätalo 2014, 5.)

Kostean kitkamaalajin kantavuus on yleensä parempi kuin kuivan, mutta märkinä kantavuus taas on huonompi. Koheesiomaalajit, kuten turve, lieju tai hienot hiesumaat ovat kuivana varsin kantavia, mutta märkinä niiden kantavuus on hyvin heikko. Erityisesti hiesu- ja hietamaalajeissa veden aiheuttama kantokyvyn heikkeneminen on voimakas. Maaperän vesipitoisuuteen vaikuttavat pintavesi, pohjavesi ja kapillaarinen vesi. (Etelätalo 2014, 5–6.)

Pohjaveden pinta mukailee maanpinnan muotoja. Painovoima liikuttaa pohjavettä, mutta veden liike ja liikkeen suuruus riippuvat maalajista. Hienojakoinen vettä pidättävä maalaji hidastaa veden liikettä, kun taas karkeajakoiset maalajit päästävät sen liikkumaan nopeammin. (Etelätalo 2014, 2.)

Pohjaveden korkeuteen vaikuttaa myös kapillaarinen nousukorkeus, joka on suurempi hienoilla maalajeilla. Karkean hiekan kapillaarinen nousukorkeus on muutamasta sentistä reiluun kymmeneen senttimetriin, kun taas hienolla hiesumaalla nousukorkeus voi olla useita metrejä. Samalla hienojakoisen maan vedenläpäisykyky on huomattavasti heikompi ja vettä sisältävän kerroksen paksuus on suurempi. (Etelätalo 2014, 2–3.)

Pohjamaan kantavuus on luokiteltu kirjaimin A–G, jossa kantavimpaan maaperäluokkaan A kuuluvat maa-aineksista kallio, louhe, murske ja murskesora. G-kantavuusluokkaan kuuluvat märkä siltti ja silttimoreeni sekä pehmeä savi ja turve. (Metsäteho 2001a, 35.)

Tien pinnan ja rungon kuivatus toteutetaan sivu-, niska- ja laskuojilla. Sivuoja tarvitaan aina, kun rakennetaan matalia penkereitä ja aina, kun viereinen maasto viettää tielle päin. Sivuojan syvyys riippuu kuivatustarpeesta. Syväkuivatuksen kannalta ojan pohjan tulisi olla aina vähintään 25 senttimetriä päällysrakenteen alareunan alapuolella. (Metsäteho 2001a, 40.) Syvyyttä lisätään tarvittaessa.

Kantavuusluokan A mailla tien perusta rakennetaan keveimmin. Kantavuusluokissa B–D sivuojen tulisi olla vähintään 50 senttimetriä. Luokissa E ja F tarvittava syvyys voi nousta jopa yli yhden metrin. Erittäin heikosti kantavien maiden (Kantavuusluokka G) päälle rakennettaessa ei ole varsinaista suositusta sivuojen syvyydelle, vaan sen tulee olla riittävä kuivatuksen varmistamiseksi. (Metsäteho 2001b, 5–9.)

## **2.2 Metsähallitus tienpitäjänä**

Metsähallitus hallinnoi nykyään noin 34 000 kilometriä metsäteitä, ja lisäksi se on osakkaana noin 5 000 yksityistiessä (Metsähallitus 2009). Tienpitoon kuluu vuosittain 12–14 miljoonaa euroa. Tämä summa sisältää teiden ja siltojen rakentamisen, peruskunnostuksen ja teiden hoidon. Vuosittain Metsähallituksen teitä peruskorjataan noin 1 000 kilometriä. Uusia teitä rakennetaan edelleen

noin 200 kilometriä, mutta rakentamismäärä laskee koko ajan ja painopiste onkin nykyisen tieverkoston kunnossapidossa. (Metsähallitus 2014a.)

Teiden hoitotoimiin kuuluvat höyläys, kuivatuksen parannus sekä pintarakenteiden uusiminen, ja niitä tehdään tarpeen mukaan. Metsäteiden hoitoa kehitetään ja nykyään käytetään apuvälineinä pudotuspainomittauksia, maatutkauksia rakenteen arvioinnissa ja videotulkintaa tien pintakunnon arvioinnissa. (Metsähallitus 2014a.) Kunnossapidon täsmällisen suunnittelun myötä kunnossapitotoimet voidaan keskittää sellaisiin kohtiin, joissa niille on tarvetta (Metsähallitus 2009).

Metsähallitus hoitaa itse oman puun korjuun ja kuljetukset käyttäjille. Metsähallituksen tulos muodostuu 85-prosenttisesti puun myyntituloista, ja nykyinen metsäteollisuus vaatii hyvin suunnitellun raaka-ainehuollon. Siksi puunhuollon toimivuus on taattava jokaisena vuodenaikana. Myös lyhentyvien talvien vuoksi metsäteistä on tehtävä hyvin kantavia. (Metsähallitus 2007.)

### **2.2.1 Nykyiset kunnostussuunnittelun ja tienpidon menetelmät Metsähallituksessa**

Kunnostustarpeen määrittäminen on Länsi-Kainuun alueella perinteisesti tehty silmäääräisesti. Suunnittelija on ajanut tien läpi ja määrittänyt vesakontorjunnan, kuivatuksen parantamisen ja muut tarvittavat toimet tapauskohtaisesti. Hoitotarpeen määritykset todetaan usein samalla, kun alueelle tehdään hakkuu- tai metsänhoitosuunnitelmia. Tällöin hoitotoimien välinen aika voi olla pitkä. Suuria korjaustoimia tehdään usein vasta silloin, kun alueelle on suunniteltu hakkuuta ja raskaan kaluston on päästävä työmaalle. (Juntunen 2014.)

Kun tiellä on todettu peruskorjauksen tarve, koko tie on korjattu kerralla kokonaan, samalla tavalla päästä päähän. Tien koko pituudella voi kuitenkin olla pätkiä, joissa riittäisi kevyemmin suoritettu hoitotoimi tai sille ei olisi tarvetta lainkaan. Tällöin voitaisiin säästää merkittäviä rahamääriä, jos nämä kohdat voitaisiin löytää ennalta. (Juntunen 2014.)

Puolangan ja Utajärven alueella on meneillään pilottihanke, jossa pyritään kehittämään tienpitoa kustannustehokkaammaksi. Tällä hetkellä on käytössä muun muassa tapa, jossa urakoitsija ottaa vastuun sopimuksessa määrättyjen teiden kunnostustarpeen määrittämisestä ja tekee tarvittavat korjaustoimet itsenäisesti. Tämän tavan on todettu helpottavan tienrakennusesimiehen kiireitä ja vähentävän urakoitsijan päivittäistä ohjausta. (Metsähallitus 2014c.)

### **2.2.2 Metsähallituksen metsäteiden käyttötarkoitus**

Metsähallituksen metsäautotiet on rakennettu ensisijaisesti metsätalouksikäyttöön. Näin ollen niiden täytyy kestää raskaita ajoneuvoja. (Metsähallitus 2014b.)

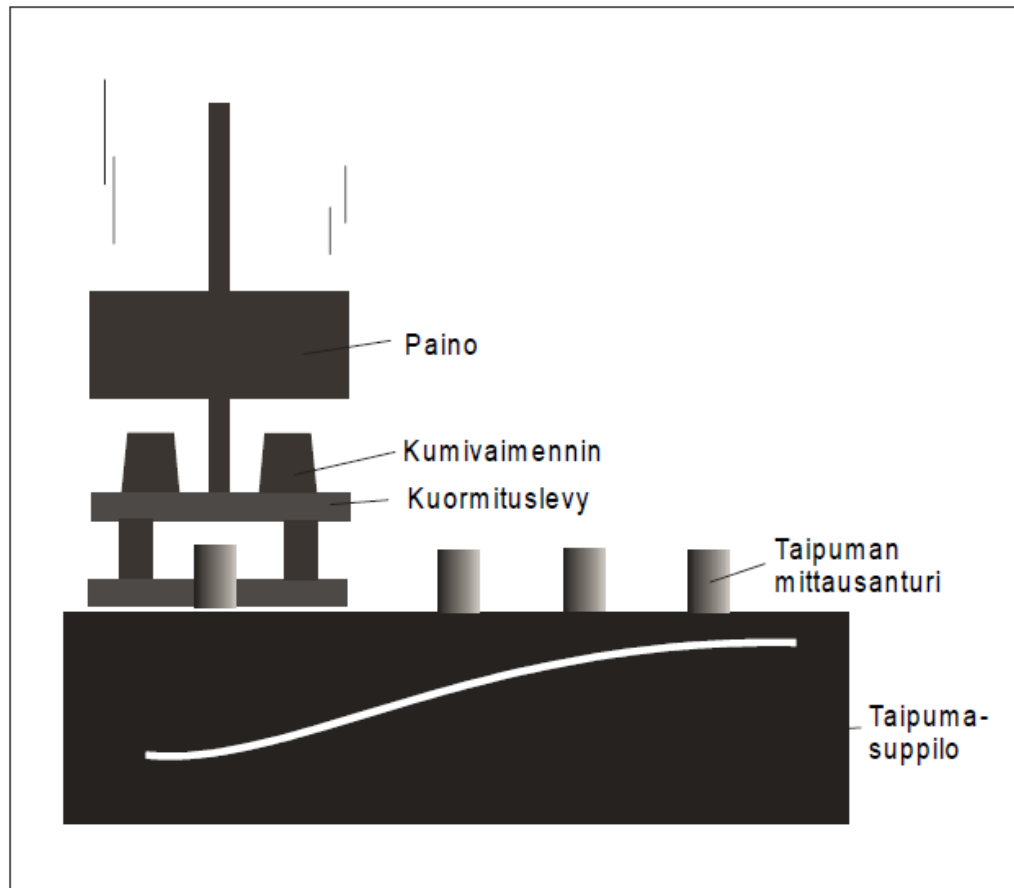
Metsähallituksen tekemässä selvityksessä on todettu, että noin 85 prosenttia metsäautotien käytöstä on kuitenkin muuta kuin metsätalousajoa. Suurimmat käyttäjäryhmät ovat metsästäjät ja marjastajat. Tiet ovat tärkeitä paikalliselle väestölle sekä useille elinkeinoille, kuten porotaloudelle ja matkailulle. (Metsähallitus 2014b.)

### **2.3 Pudotuspainomittaus**

Pudotuspainolaitetta käytetään simuloimaan liikenteen tien pinnalle aiheuttamaa kuormitusta. Tien rakenteen käyttäytymistä kuvaa rasiuksen aiheuttama pystysuora siirtymä eli niin sanottu taipuma. Pudotuspainomittauksella mitataan tiehen kohdistuvaa voimaa ja sen aiheuttamaa taipumaa. Pudotuspainolaitteiden on todettu simuloivan kuorma-auton aiheuttamaa rasiusta hyvin, mutta syvemmälle tien rakenteisiin kohdistuvan voiman kuormitusaika on pidempi kuorma-autolla, noin 220 millisekuntia, kun pudotuspainomittalaitteen kuormitusaika on 20–60 millisekuntia. (Petäjä & Spoo 2000, 4–5.)

Pudotuspainomittauksessa pudotetaan paino kuormituslevylle, jolloin saadaan nopea, dynaaminen kuormitus. Mittausantureita on suoraan mittauslevyn alla ja tietyin välimatkoin sen sivuilla. Tällöin saadaan mitattua niin sanottu taipu-

masuppilo, joka kuvaa tien kuormituskestävyyttä. Taipumasuppilosta voidaan laskea tien rakenteiden muodonmuutoksia. (Petäjä & Spoof 2000, 4.) Kuvassa 5 on esitetty pudotuspainomittauksen toimintaperiaate.



Kuva 5. Pudotuspainomittauslaitteen toimintaperiaate. (Petäjä & Spoof 2000, 4)

Pudotuspainolaitteita käytetään tien tilan tutkimiseen rakenteen parantamiseen tähtäävän suunnittelun yhteydessä. Yleensä mittaustuloksista lasketaan rakennekerrosten moduulit. Pudotuspainomenetelmiä voidaan käyttää myös rakennusvaiheessa laadun valvomiseksi. (Petäjä & Spoof 2000, 5.)

Taipumien ja taipumaerojen avulla voidaan määrittää eri rakennekerrosten ominaisuuksia. Kuormituksen aiheuttamat jännitykset ja muodonmuutokset kertovat tien kestoiästä. Parannustyössä tierakenteen mitoituksen lähtötietoina tarvitaan mittaushetken rakennemuodulit ja niiden paksuudet sekä viimeisen rakenteellisen toimenpiteen jälkeinen liikennekuormitus ja ennuste tulevasta kuormituksesta. (Petäjä & Spoof 2000, 5.)

Kantavuus- tai maatutkamittauksilla voidaan tarvittavat toimenpiteet kohdistaa jopa metrien tarkkuudella. Tällöin kustannussäästö on merkittävä. Säästöjä syntyy myös, kun saadaan tieto tien perustan rakennepaksuuksista, ja tielle lisättävän tai vaihdettavan materiaalin määrä voidaan optimoida. (Korpilahti 2008, 35–36.)

## **2.4 Laserkeilaus ja maanpinnan korkeusmalli**

### **2.4.1 Ilmalaserkeilaus**

Metsäalueiden laserkeilauksessa käytetään lähi-infrapuna-aallonpituusalueen (800–1600 nm) säteilyä (Holopainen, Hyyppä & Vastaranta 2013, 14). Helikopteriin tai lentokoneeseen asetettu keilain lähettää korkealla taajuudella (esimerkiksi 50–400 kHz) muutaman nanosekunnin laserpulsseja, jotka heijastuvat takaisin kohteestaan. Keilaimessa on sensori, joka kerää heijastuneen pulssin. Paluupulssista voidaan määrittää keilaimen asennon, tarkan sijainnin ja pulssin kulkeman ajan perusteella kohteen tarkat x-, y- ja z-koordinaatit. Keilain rekisteröi myös heijastuneen pulssin voimakkuuden. (Kokkila 2011, 13.)

Laserpulssi on maanpinnalle saapuessaan käytettävän laitteiston ja lentokorkeuden mukaan 0,1–2 metrin levyinen, ja pulssitiheys metsien inventoinnissa vaihtelee välillä 0,5–20 pulssia neliömetrillä (Holopainen, Hyyppä, Vastaranta & Hyyppä 2011, 130). Pulssi voi hajota useaan osaan törmätessään eri etäisyydellä oleviin kohteisiin. Tällöin yhdestä lähetetystä pulssista tulee sensorille useita paluupulsseja. Viimeinen heijastuma on yleensä kohteesta, jota pulssi ei enää läpäise. Pulssien tuottamat kaiut muodostavat kolmiulotteisen pistepilven mitattavasta kohteesta. (Kokkila 2011, 13.)

Verrattuna perinteisiin kaukokartoitusmenetelmiin ilmalaserkeilauksen etuna on kolmiulotteisen mallin luominen suurilta alueilta nopeasti ja tarkasti. Menetelmä ei ole herkkä sääolosuhteille, ja se toimii myös peitteisessä maastossa. (Alho ym. 2011, 116.)

Koska menetelmässä käytetään lasertykin lähettämää energiaa, se ei ole riippuvainen auringon lähettämästä säteilystä, eivätkä auringon valoon perustuvien optisten menetelmien kuvantulkinnan haitat (esimerkiksi varjot) ole ongelma. Lisäksi menetelmän tuottama mittausparvi on varsin homogeeninen. Huonoja puolia fotogrammetrisiin mittausmenetelmiin verrattuna ovat huonompi alueellinen erotuskyky ja spektritiedon puute. Kohteen luokittelua voidaan kuitenkin tarkentaa paluupulssin intensiteetin ja aaltomuodon avulla. (Holopainen, Hyypä & Vastaranta 2013, 13–14.)

Puhdas vesi absorboi infrapuna-aallonpituusalueen säteilyä voimakkaasti vesialtaissa sekä kasvillisuudessa ja maaperässä, mutta veteen sekoittuneet epäpuhtaudet saattavat heijastaa säteilyä (Törmä 2015). Heijastuman intensiteetti on kuitenkin heikompi verrattuna maasta heijastuneeseen pulssiin, ja tämä voi aiheuttaa sen, että veden pinnasta saatava pistetiheys on pienempi (Lihong & Gibeaut 2009, 2).

#### **2.4.2 Maanpinnan korkeusmallit**

Boreaalisella kasvillisuusvyöhykkeellä, tiheässäkin metsässä, noin 30 prosenttia laserkeilauksen heijastuksista tulee maasta. Näiden avulla on mahdollista muodostaa maanpinnan korkeusmalli. (Maltamo & Pitkänen 2003, 3.) Vaikka perinteisiä kartta-aineistoon perustuvia korkeusmalleja käytetään edelleen, laserkeilaukseen perustuva korkeusmallin muodostaminen on syrjäyttämässä niitä siitä saatavien mallien laadun ja yksityiskohtaisuuden vuoksi (MML Paikkatietokeskus 2015).

Ilmalaserkeilauksella saatavan maanpinnan korkeusmallin tarkkuus vaihtelee yleensä 5–30 senttimetriä. Tarkkuus riippuu lentokorkeudesta, pistetiheydestä sekä maanpinnan peitteisyydestä ja kaltevuudesta. (Alho, Hyypä, Hyypä, Flener, Kasvi, Vaaja, Kukko, Lotsari, Hohenthal, Kurkela, Kaartinen & Haggrén 2011, 116.)

DEM (digital elevation model) eli digitaalinen korkeusmalli on maanpinnan muotojen esitys numeerisesti. Se sisältää varsinaisia pinnan muotoja kuvaavan kor-

keuspisteiden joukon sekä menetelmän laskea arvoja näiden pisteiden väliin. Tyypillisesti mallin kuvausmuotona käytetään joko tasavälistä hilaa, eli rasteria tai epäsäännöllistä kolmioverkkoa (TIN). (MML Paikkatietokeskus 2015.)

TIN-malli (Triangulated Irregular Network) on yksi digitaalinen korkeusmallin kuvaustapa. Mallissa pinta muodostuu xyz-koordinaatiston tunnettuja pisteitä yhdistävien vektoreiden muodostamista kolmioista. Malleja muodostavia interpolointimenetelmiä ovat muun muassa Delaunayn kolmiointi ja ”distance ordering”. (esri... 2014.)

Korkeusmallit voidaan luokitella maasto- (DTM) ja pintamalleihin (DSM). Maastomalli kuvaa paljaan maan pintaa. Pintamalli kuvaa maanpinnan korkeuksia avomailla ja muilla alueilla esimerkiksi metsän latvustoa tai rakennusten kattoja. (MML Paikkatietokeskus 2015.)

DTM eli digital terrain model on rasterityyppinen paljaan maanpinnan korkeusmalli, jossa jokaisella rasterin alkiolla on oma z-arvonsa. Mallin tarkkuus riippuu rasterialkion koosta. Esimerkiksi kahden metrin resoluution mallissa yksi rasterin alkio vastaa 2 x 2 metrin aluetta maastossa. (MML Paikkatietokeskus 2015.)

Maanmittauslaitos on tuottanut uutta kahden metrin resoluutiolla olevaa maaston korkeusmallia, mutta tämä ei ole vielä kovin kattava. Koko maan kattava Maanmittauslaitoksen tuottama korkeusmalli on resoluutioltaan 10 metriä. (MML Paikkatietokeskus 2015.)

Korkeusmalleilla on lukemattomia käyttökohteita. Niitä käytetään muun muassa muun kartografisen aineiston parantamiseen ja kolmiulotteiseen esitykseen, geologisiin ja geomorfologisiin analyysihin, maanpinnan hydrologisten ominaisuuksien ja olosuhteiden analysointiin, maisema-analyysihin, erilaisiin infrastruktuurin, kuten teiden ja taajamien rakennuksen suunnitteluun, eroosio- ja tulvariskien analysointiin sekä metsätalouden eri sovelluksiin. (MML Paikkatietokeskus 2015.)

Korkeusmalleja käytetään usein maaperän kosteusolojen analysointiin. Oletus, jonka mukaan veden liikkumista maaperässä ohjaa topografia, on toimiva Suo-



men moreenimailla, joilla syvemmälle mentäessä maaperän vedenjohtavuus heikkenee. Kosteusoloja kuvataan usein kosteusindeksillä. Näistä yleisimmällä, SWI-indeksillä kuvataan veden kerääntymistä valuma-alueen ja rinnekaltevuuksien mukaan. (Kokkila 2011, 14–15.)

Kanadassa ja Yhdysvalloissa kosteusindeksianalyysit on todettu hyödyllisiksi maaperän kosteikkojen ja pienten vesiuomien etsimisessä. Suomessakin niitä on käytetty muun muassa paikkatietopohjaiseen maaston kantavuusmallinnuksen tutkimiseen puunkorjuussa. (Kokkila 2011, 15). Pitkälle viedyissä hydrologisissa laskentaohjelmissa mukana ovat myös sadannan ja haihdunnan analyysit, sekä erilaisten maalajien huomioon ottaminen veden liikkumisen suhteen (Kokkila 2001, 643).

### **3 Opinnäytetyön tavoite**

Metsähallituksella on huollettavanaan yli 30 000 kilometriä metsäautoteitä. Kustannussyiden vuoksi on tarve selvittää menetelmiä, joilla kunnostustarpeet voitaisiin määrittää mahdollisimman tarkasti. Tien mittaaminen esimerkiksi pudotuspainotekniikalla on hyvä keino mitata suoraan tien kantavuutta, mutta kustannusten vuoksi mittaustarvuuudesta joudutaan tinkimään. Menetelmä, jolla voitaisiin tutkia metsätiestön kuntoa aluksi suuressa mittakaavassa, auttaisi priorisoimaan kunnostustoimia sekä kohdistamaan tarkemmat tutkimus- ja korjaustoimet tarvittaviin tienkohtiin. Yksi menetelmä voi olla kaukokartoitus.

Hypoteesina on, että esimerkiksi laserkeilausaineistosta ja satelliittikuvista saadaan selville tiestä ja sen ympäristöstä ominaisuuksia, jotka vaikuttavat kantavuuteen. Tällaisia ovat muun muassa tienpinnan pitkittäiset ja poikittaiset muotokijät, sivu- ja veto-ojien syvyydet, tietä ympäröivän maaston ojien syvyydet, ojapiennarten kaltevuudet, tien perustan leveys sekä veden kerääntymispisteet. Lisäksi satelliittikuvista saadaan määritettyä esimerkiksi kasvillisuusindeksi (NDVI), joka kertoo maaperän kosteusoloista.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia millä keinoilla voidaan tunnistaa niitä tiestön kohtia, joilla kantavuus on heikentynyt. Tarkastelukohteeksi valittiin digitaalinen maanpinnan korkeusmalli ja tarkoituksena oli selvittää löytyisikö siitä selittäviä tekijöitä tienpinnan kantavuudelle.

Toimeksiantajan pyynnöstä työssä keskityttiin tienpinnan, tienpinnan ja ympäröivän maaston korkeuseron sekä niin sanotun kuivavaran tutkimiseen korkeusmallista. Ympäröivään maastoon luetaan tien sivuojat ja ojien takainen maanpinta. Tämän lisäksi tutkittiin, voidaanko korkeusmalliaineistosta nähdä tienpinnan pitkittäisiä ja poikittaisia muotoja.

Tuloksia tarkasteltiin luokiteltuina kangas- ja turvemaille. Turvemaille riittävä tienpinnan korkeus ja sivuojen syvyys korostuu. Luokittelussa voidaan käyttää myös kivennäismaalajeja. Ne päätettiin kuitenkin jättää tarkastelujen ulkopuolelle, koska tarkkaa kivennäismaalajipaikkatietoa ei ole saatavilla, eikä niitä pystytä laserkeilausaineistosta tunnistamaan.

## **4 Aineisto ja menetelmät**

Tämä opinnäytetyö oli osa Metsähallituksen kehittämistyötä, jossa pyritään kehittämään tienpidon menetelmiä. Työssä autettiin kehittämään tienpidon suunnittelua selvittämällä kaukokartoitusaineiston ja tarkemmin laserkeilausaineistosta luodun digitaalisen maaston korkeusmallin käyttömahdollisuuksia suunnittelun apuna.

Tutkimusmenetelmä oli kvantitatiivinen. Tutkimus oli selittävä eli se pyrki selittämään asian taustalla olevia syitä ja seuraussuhteita. Tutkimusta oli myös vertaileva, sillä siinä verrattiin tiettyä ilmiötä eri paikoissa.

Tutkimuksen otanta valittiin painomitatuista teistä sillä perusteella, että sen varrelta on mitattu kattavasti erisuuruisia kantavuustuloksia. Otannan valinta ei ollut minkään perinteisen otantamenetelmän mukainen, vaan siinä käytettiin harkintaa.

Otannan suuruus oli 225 mittauspistettä. Vuonna 2013 Puolangan ja Utajärven alueella on mitattu metsäteitä yhteensä noin 98 kilometriä. Tällä matkalla on tehty yhteensä 1936 mittausta. Tällöin otoskoko oli noin 11,6 prosenttia perusjoukosta.

## **4.1 Aineisto ja sen käsittely**

### **4.1.1 Laserkeilaus- ja korkeusmalliaineisto**

Opinnäytetyössä oli käytössä ilmalaserkeilauksesta saatu pistepilvi. Laserkeilaus on tehty Puolangan ja Utajärven alueella kesällä 2011 ja se on ollut Metsähallituksen oma hanke. Hankkeessa on kilpailutettu keilaus, ilmakuvaus ja puustotulkinta yhtenä kokonaisuutena ja työn on tehnyt Terratec Oy. Keilauksen tarkkuus on 0,5–1 pulssia/m<sup>2</sup>. Tarkka keilauspäivämäärä ei ole tiedossa.

Metsähallituksella on yhden metrin resoluution rasteri-korkeusmalli Takalo–Leipiharju -alueen maastosta. Malli on muodostettu vuonna 2011 tehdystä laserkeilauksesta. Keilaus on tehty keskikesällä lehden ollessa puissa. Ajankohta on valittu metsäsuunnittelullisesta lähtökohdasta, eikä maaston korkeusmallin tarkkuuden maksimoimiseksi. (Määttä 2015.) Puuston ollessa lehdessä, maanpinnasta heijastuneiden pulssien määrä on voinut olla alentunut. Lisäksi matala aluskasvillisuus on voinut aiheuttaa harhaa.

Korkeusmallista kerättiin tien viereisen maaston korkeustietoja pudotuspainomittauskohdista tien molemmin puolin. Korkeustietoa otettiin tien keskikohdasta, sivuojen kohdalta sekä kaksi metriä ojista maaston puolelle. Tiedot kerättiin käyttäen ArcMap 10.2.2 -ohjelmistoa.

### **4.1.2 Pudotuspainomittausaineisto**

Oulun Geolaboratorio on tehnyt pudotuspainomittauksia Metsähallituksen metsäteillä vuoden 2013 aikana. Tässä työssä tutkimuskohteena käytetyn Utajär-

ven kunnan, Juorkunan kylän läheisyydessä sijaitsevan Takalo–Leipiharju -välisen metsätien mittaukset on tehty 28.8.2013. Tien varrella on 225 mittauspistettä 11 150 metrin matkalla. Takalo–Leipiharju-metsätie valittiin työhön, koska sen matkalla on mitattu paljon erilaisia kantavuustuloksia.

Metsätien kantavuus on mitattu 50 metrin välein auton perässä vedettävällä KUAB-pudotuspainomittauslaitteella. Mittauksista tuotettu aineisto oli taulukko-muodossa ja siinä oli ilmoitettu jokaiselle mittauspisteelle paaluluku, koordinaatit, mittausiskun numero, kuormituksen suuruus, taipuma-arvot seitsemällä eri etäisyydellä pudotuspaikasta, ilman ja tienpinnan lämpötilat, kantavuusarvo ja mittauksen kellonaika.

Oulun Geolaboratorion tekemät metsäteiden kantavuusmittaukset tehdään kesällä, kuivan kelin aikaan. Yrityksen toimitusjohtaja Jari Lapin (2015) mukaan todellinen tiestön kantavuus saadaan selville, kun kelirikko tai vesisateet eivät vaikuta mittaustuloksiin.

KUAB-mittauslaitteessa käytettävässä GPS-paikantimessa ei ole käytetty minikäänlaista paikannuksen korjausta. Tällöin paikantimen ja mittauksista tuotetun aineiston maantieteellinen tarkkuus on muutamia metrejä. (Lappi 2015.)

Pudotuspainomittauksista saatuja tuloksia käytettiin vertailutietona laserkeilausaineiston käsittelyssä. Mittaustuloksia verrattiin laserkeilausaineistosta saatuihin korkeus- ja korkeuserotietoihin.

#### **4.1.3 Maastosta mitattu ja arvioitu aineisto**

Kesällä 2014 Takalo–Leipiharju -väliselle metsätielle tehtiin kunnostustarvemääritys sekä kunnostussuunnitelma pudotuspainomittaustulosten pohjalta. Tien kunto arvioitiin 11.–16.7.2014 Metsätehon kuntoluokitusohjeen mukaan ja se tehtiin silmämääräisesti. Luokituksessa tarkasteltiin pinta- ja runko-kelirikkoa, sivu- ja veto-ojien kuntoa, tierumpujen kuntoa, tien kulutuskerrosta, luiskan vesakoitumista sekä tien pintakuntoa. Näiden tekijöiden osalta tehtiin luokitus silmämääräisesti pudotuspainomittauspisteittäin. Runko- ja pintakelirik-

koa ei heinäkuussa ollut, mutta aineistossa on kuitenkin merkitty näistä näkyvissä olleita merkkejä.

Kuntoluokituksen lisäksi tehtiin mittauksia ja merkittiin havaintoja muun muassa seuraavista asioista: ojan veden syvyys, ojien syvyys, kuivavara, palteiden korkeus, tien sivukaltevuus ja tien perustan leveys. Ojien syvyudet, vedenpinnan korkeus ja tienpinnan kuivavarat mitattiin jokaisella pudotuspainomittauspisteellä ja mittaukset tehtiin 10 senttimetrin luokissa käyttäen pinomittaa ja hypsometriä. Kuivilla osuuksilla, missä ojien kunto oli pidemmällä matkalla sama, mitattiin ojien syvyyksiä harvemmin (noin joka 5.–10. mittauspisteeltä) ja arvioitiin silmämääräisesti loput. Tien perustan leveyksiä mitattiin noin joka kymmenenneltä painomittauspisteeltä ja loput arvioitiin silmämääräisesti.

#### **4.1.4 Aineiston käsittely**

Paikkatietoaineistosta saatavan tiedon keräämiseen käytettiin Esrin ArcGIS 10.2.2 -ohjelmistoa. Sillä luotiin jokaiselle mittauspisteelle tiedon keräystä varten tarvittavat työkalut, joilla saatiin vertailukelpoista aineistoa maaston muodoista. Kerätyt tiedot siirrettiin edelleen Microsoft Excel -ohjelmistoon, jolla varsinainen tietojen käsittely ja analysointi tapahtui.

Korkeus- ja korkeuseromallin tietojen keräämiseen käytettiin 5 x 1 metrin kokoisia alueita. Näin päätettiin tehdä, koska pudotuspainomittauslaitteiston GPS-laitteen tarkkuus on muutama metri. Lisäksi kesällä 2014 maastomittauksia tehdessä käytössä oleva GPS oli tarkkuudeltaan samanlainen. Polygonit muodostettiin tien keskiviivalle, ojiin, sekä ojien taakse pientareelle, eli yhteensä tien suuntaisesti tehtiin viisi riviä tiedonkeräyskohtia.

Tiedonkeruu aloitettiin piirtämällä käsin Takalo–Leipiharju-tielle keskiviiva. Tämän jälkeen digitoitiin tien viereiset sivuojat. Jokaisen painomittauspisteen kohdalle piirrettiin myös tien pituussuunnan suhteen poikittaiset viivat. Tien keskiviivaa käytettiin muodostaessa korkeuseromallia tielle ja sitä ympäröivälle maastolle. Sivuojista muodostettuja viivoja sekä tielle piirrettyjä poikkiviivoja käytettiin maaston korkeustiedon keruuseen tarkoitettujen polygonien muodostamiseen.

Polygonien muodostamiseksi täytyi tehdä ensin toispuoleiset kolmen metrin puskuripolygonit ojia kuvaaville viivoille. Tähän käytettiin ArcMapin buffertyökalua. Työkalu muodosti tien suuntaisen, kolmen metrin levyisen polygonin ojaviivasta maaston puolelle. Seuraavaksi muodostettiin puskuripolygonia kehystävä viiva, josta tien puoleinen osa leikattiin pois. Jäljelle jäävä viiva toimi keskiviivana pientareen korkeustiedon keräämiseen käytettäville polygoneille.

Tien keskiviivalle, ojaviivoille sekä piennarten viivoille muodostettiin yhden metrin levyiset puskurit niin, että ne kattoivat puoli metriä molemmin puolin viivaa. Tien poikkiviivoille tehtiin viiden metrin levyiset puskurit. Näistä sekä tien suuntaisista polygoneista muodostettiin tiedonkeruupolygonit. Tähän käytettiin ArcMapin toimintoa, jolla muodostetaan uudet polygonit kahden eri polygonin leikkauskohtiin.

Korkeusmallista oli havaittavissa tien reunoilla maakasoja, jotka on kasattu tieuralta poistettavasta maasta. Muutamia muodostetuista tiedonkeruupolygoneista osuivat joko osittain tai kokonaan tällaisen kasan kohdalle. Kasoista aiheutuvan virheen välttämiseksi näitä polygoneja siirrettiin keskiviivan suuntaisesti muutama metri kasan viereen.

Data kerättiin ArcMapin Zonal Statistics as Table -työkalulla. Tällä saatiin otettua polygonien alueelta erilaisia tietoja korkeus- ja korkeuseromalleista ja kerätyt tiedot tulivat näkyviin taulukkomuodossa, mittauspisteittäin. Taulukoista tarvittavat tiedot siirrettiin edelleen Microsoft Excel -ohjelmistoon, missä varsinainen analysointi tapahtui. Tässä työssä keskityttiin alueittaisten korkeus- ja korkeuserotietojen keskiarvoihin.

Excel-tilukossa tietoja käsiteltiin siten että saatiin tienpintaan nähden neljä eri korkeuseroarvoa: vasemmalle pientareelle, vasemmalle ojalle, oikealle pientareelle ja oikealle ojalle. Näistä laskettiin vielä keskiarvot pientareille ja ojille.

#### 4.1.5 Korkeuseromalli

Varsinaisen korkeusmallin haittana on suhteellisen korkeustiedon puute. Tarkasteltaessa tiestöä ja sen ympäristöä, vinovalovarjostusta voidaan käyttää havainnollistamaan maaston muotoja ja ojien kuntoa, mutta siitä ei saada tarkempaa syvyys- ja korkeustietoa. Esimerkiksi tien painumista voi olla vaikea havaita.

Metsähallituksen korkeusmallista muodostettiin suhteellinen korkeuseromalli Takalo–Leipiharju-metsätien ympäristölle. Tätä varten mallia täytyi muokata. Mallin tietomuoto oli liukuluku (123,456789 m), joka täytyi muuttaa kokonaisluvuksi (12345 cm). Muutokseen käytettiin Raster calculator -työkalua.

Aluksi korkeusmallista erotettiin tien keskiviivaa kuvaavat rasterialkiot Extract to Mask -työkalulla. Erottamiseen käytettiin tielle piirrettyä keskiviivaa. Tällöin saatiin uusi rasterimalli, jossa oli pelkästään tien keskiviivan halkomat rasterialkiot. Tästä muodostettiin uusi rasteri Euclidean allocation -työkalulla. Tämä työkalu muodostaa rasterin, jonka jokainen alkio saa lähimmän tunnetun rasterialkion arvon. Näin muodostetun rasterin jokainen rasterialkio sai arvonsa lähimmästä tien keskiviivan korkeutta kuvaavasta alkioista.

Lopullinen korkeuseromalli saatiin, kun kokonaislukumuotoon muutetusta korkeusmallirasterista vähennettiin luotu rasteri. Uudessa mallissa tien keskiviivan korkeus oli koko sen pituudella nolla, ja rasterialkiot sen ympärillä saivat maaston korkeuseroarvon tien pintaan nähden. Negatiivinen arvo tarkoittaa, että maaston pinta on tienpintaa matalammalla ja positiivinen tarkoittaa, että se on korkeammalla.

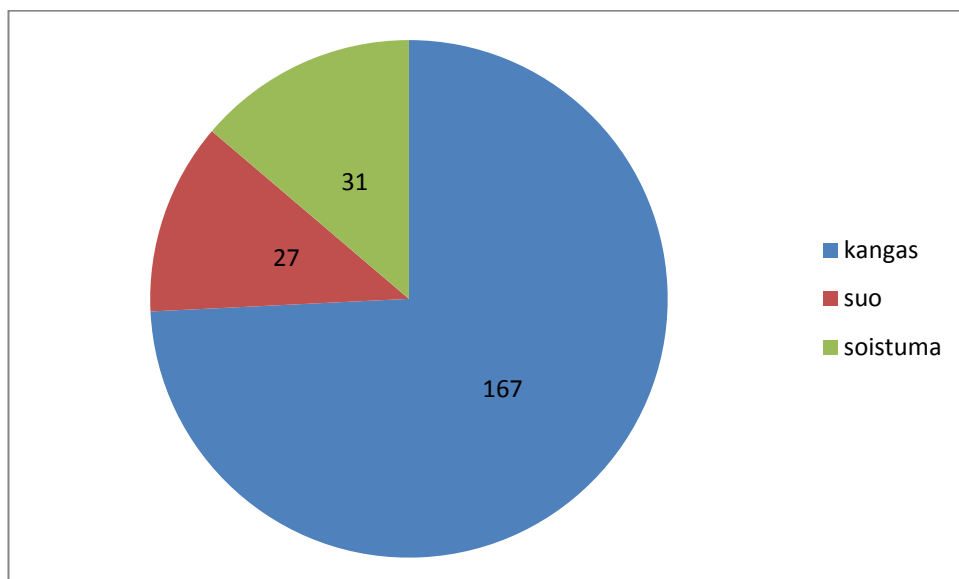
Tämä malli on tarkin vertailukohdan eli tien keskiviivan ympäristössä. Siirryttäessä kauemmas maastoon mallista tulee hyvin karkea ja vierekkäisten rasterialkioiden korkeuseroarvot voivat olla hyvin erisuuruiset. Malli onkin käytännön syistä hyvä rajata esimerkiksi 20 metrin päähän tien keskiviivasta.

## 4.2 Aineiston analysointimenetelmät

Aineisto luokiteltiin maaperän mukaan kangas- ja turvemaihin, koska turvemaila kantavuus on yleisempi ongelma ja kuivatuksen merkitys on suurempi. Tällöin erilaiset korkeuserot voivat antaa samansuuntaisia tuloksia. Turvemaille tie voi myös painua, mikä näkyy tien korkeudessa suhteessa ympäröivään maastoon.

Kangasmaiden kantavuus riippuu maalajista, mutta tätä ei otettu työssä huomioon, koska maalajin selvittäminen laserkeilaus- ja korkeusmalliaineistosta ei ole mahdollista. Geologian tutkimuskeskuksella on tarjolla maaperäaineistoa, mutta tutkitulle alueelle ei ole saatavissa tarkkaa maalajitietoa.

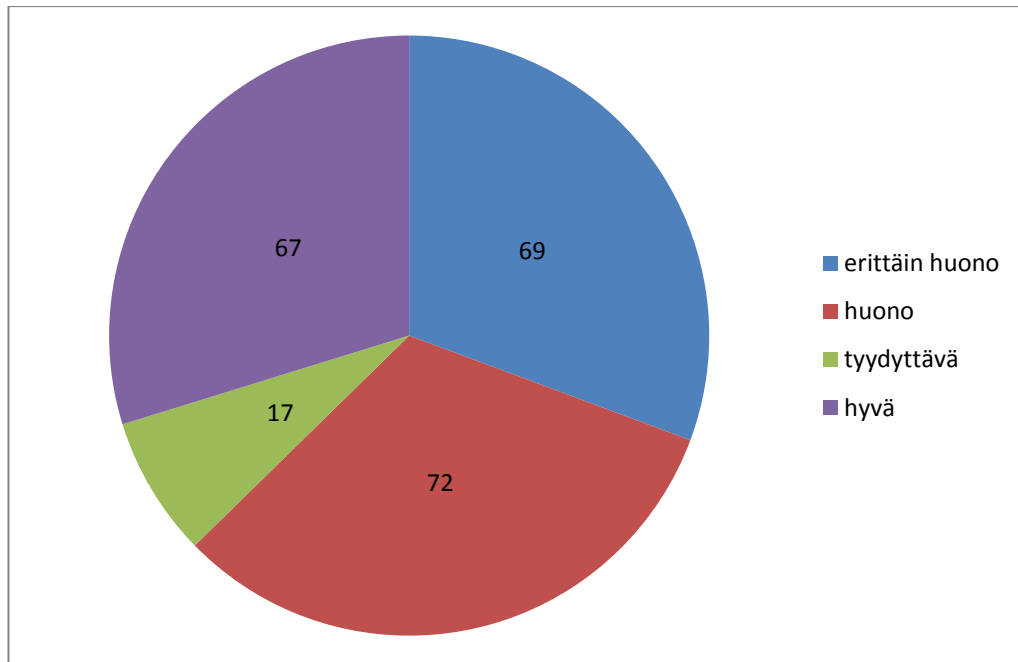
Käytetyssä aineistossa oli 225 pudotuspainomittauspistettä. Nämä jakaantuivat siten, että 167 mittauspistettä sijaitsi kangasmaalle ja 58 suomaalle tai soistumalle rakennetulla tieosuudella. (Kuvio 1.)



Kuvio 1. Maaperän jakautuminen kankaisiin, soihin ja soistumiin mittauspisteittäin.

Jos tielle mitattu kantavuus on alle 40 MPa, kantavuus on erittäin huono. Kantavuus on huono välillä 41–85 MPa, tyydyttävä välillä 86–120 MPa ja hyvä, jos mittaustulos on yli 120 MPa. Kuviossa 2 on esitetty Takalo-Leipiharjutielle tehdyistä kantavuusmittauksista saatu kantavuusluokkajakauma.





Kuvio 2. Mittaustulosten jakautuminen kantavuusluokittain

Kantavuustuloksille tehtiin korrelaatio- ja regressioanalyysit suhteessa korkeusmallista saataviin tietoihin. Näillä oli tarkoitus selvittää, kuinka hyvin tienpinnan ja ympäröivän maaston korkeuserot korreloivat kantavuusmittauksista saattujen tulosten kanssa. Tuloksia on esitetty myös kuvioina.

Korrelaatioanalyysistä saatiin pistediagrammit korkeuserotiedon ja painomittaustulosten välille luokittain. Pistejoukoille on laskettu korrelaatiokerroin  $r$ , joka kuvaa tilastollisen riippuvuuden voimakkuutta. Mitä lähempänä kertoimen arvo on 1:tä tai -1:tä, sitä voimakkaampi on tilastollinen riippuvuus.

Kuivavaran selvittämistä korkeusmallista tutkittiin niistä mittauspisteistä, joiden kohdalla oli vesi ojassa. Maastossa kuivavarat mitattiin ja niitä verrattiin näiden mittauspisteiden kohdalta saatuun korkeusmallin sivuojan korkeuserotietoon. Mitattu kuivavara ja korkeusmallista saatu ojan ja tienpinnan korkeuserotieto laitettiin samaan diagrammiin, jolloin niiden riippuvuus saatiin näkyviin.

### 4.2.1 Korrelaatioanalyysi

Kahden tekijän tilastollista riippuvuutta voidaan analysoida niin sanotun Pearsonin otoskorrelaatiokerroimen  $r$  avulla (Mellin 2010, 40). Tässä työssä korrelaatioanalyysit tehtiin Microsoft Excel -ohjelmistolla. Analyysitulokset on esitetty kappaleessa 5.

Havaintoarvoista laskettu otoskorrelaatiokerroin  $r$  mittaa havaintoarvojen lineaarisen tilastollisen riippuvuuden voimakkuutta. Kerroimen arvo on aina välillä  $-1 \leq r \leq 1$ , ja sen lähestyessä arvoa  $-1$  tai  $1$  havaintoarvojen tilastollinen negatiivinen tai positiivinen riippuvuus voimistuu. Jos  $r = 0$ , havaintoarvojen välillä ei ole tilastollista lineaarista riippuvuutta, mutta tästä huolimatta havaintoarvojen välillä voi silti olla epälineaarinen riippuvuus. (Mellin 2010, 40–45.)

### 4.2.2 Regressioanalyysi

Lineaarista regressioanalyysiä voidaan käyttää yhden tai useamman selittävän muuttujan ja selitettävän muuttujan välisen riippuvuuden mallintamiseen. Mallia voidaan käyttää ilmiötä ennustavana tai selittävänä. Mallia luodessa on otokseen oltava riittävä, yhden selittävän muuttujan kohdalla vähintään kaksikymmentä. (Taanila 2010, 1)

Lineaarinen regressiosuora lasketaan yleensä pienimmän neliösumman menetelmällä ja se saa muodon  $y = kx + B$ . Yhtälön mukaan yhden yksikön muutos selittävälle tekijälle aiheuttaa  $k$  yksikön muutoksen selitettävälle tekijälle. (Taanila 2010, 5.)

Pienimmän neliösumman menetelmällä saadun suoran kohdalla jäännösneliösumma saa pienimmän mahdollisen arvon. Mallille lasketaan yleensä myös niin sanottu selityskerroin  $R^2$ , jonka arvo voi vaihdella välillä  $0-1$  tai  $0-100$  prosenttia. Selityskerroin ilmaisee, kuinka suuren osan selitettävän ilmiön vaihte- lusta selittävän tekijän muutokset aiheuttavat. (Taanila 2010, 3–5.) Tässä työssä regressiomallit luotiin Microsoft Excel -taulukkolaskentaohjelmalla.

## 5 Tulokset

Työssä oletettiin, että tien pinnan ollessa korkeammalla kuin tietä ympäröivä maaperä, tien perusta pysyy kuivempana ja tällöin kantavuus olisi parempi. Lisäksi oletuksena oli, että korkeuseron kasvaessa tienpinnan hyväksi, maaperän veden taso laskee suhteessa tienpintaan, jolloin se voisi näkyä parempana kantavuutena. Ympäröivään maaperään luetaan tässä tien viereiset sivuojat sekä ojien takainen maasto.

Luvussa 5.1 on esitetty tulokset pientareen eli sivuojan takaisen maaston maanpinnan ja tienpinnan korkeuseroille. Tulokset on esitetty aluksi kaikkien mittauspisteiden kokonaisuutena ja sen jälkeen luokiteltuna suomaahan ja soistumaan, suomaahan omana luokkana ja lopuksi kangasmaahan. Luvussa 5.2 ovat tulokset sivuojien syvyyksien suhteen samalla periaatteella. Luvussa 5.3 on tulokset kuivavaran tutkimisesta ja luvussa 5.4 on esitetty tuloksia korkeuseromallista ja korkeusmallista saatavista tienpinnan muodoista.

Liitteessä 1 on esitetty korkeuserojen ja kantavuuksien välisten regressioanalyysien tulokset pistediagrammeihin ja taulukoin. Diagrammeihin on havainnollistettu punaisella poikkiviivalla alaraja (120 MPa) kantavuusluokalle hyvä.

Sivuojien ja pientareiden korkeuserojen selittävyys kantavuudelle tutkittiin ensin korkeuserojen keskiarvona tien molemmiin puolin. Tämän lisäksi sivuojista ja pientareista selvitettiin, kummalla puolen maan pinta oli tien pintaan nähden matalammalla. Tarkasteluun valittiin jokaisella mittauspisteellä matalamman puolen arvot.

### 5.1 Pientareiden ja tienpinnan korkeuserot

Liitteessä 1, kuvioissa 4 ja 5 on esitetty mitatut kantavuusarvot kaikilla 225 mittauspisteellä pientareen ja tienpinnan korkeuseroon nähden. Negatiivinen korkeuseroarvo tarkoittaa, että tienpinta on ylempänä kuin piennar.

Kuvioista 4 ja 5 sekä taulukoista 1–4 voidaan huomata, että kantavuuksien sekä tien ja piennarten korkeuserolla ei ole tilastollisesti merkitsevää keskinäistä selittävyttä, kun tarkastellaan kaikkia mittauspisteitä luokittelemattomina. Piennarten ja tienpinnan korkeuserojen keskiarvojen tapauksessa korrelaatiokerroin on 0,41 ja selitysaste vain 17 prosenttia. 95 prosentin luottamusväli on myös hyvin suuri. Verrattaessa matalamman pientareen ja tienpinnan korkeuseroa, tilastollinen merkitsevyys on vielä heikompi.

Kuvioissa 6 ja 7 on esitetty tulokset luokalle suomaa ja soistuma. Saatujen analyysitulosten (Taulukot 5–8) mukaan pientareen laskiessa tienpintaan nähden kantavuus heikkenee. Kun tarkastellaan suomataa omana luokkana (kuviot 8 ja 9 sekä taulukot 9–12), niin regressiomallin perusteella pientareen madaltuessa kantavuus paranee hieman. Korrelaatio on hieman suurempi, kun tarkastellaan tuloksia matalamman pientareen suhteen.

Kuvioista voidaan havaita, että pientareen korkeuden ollessa alempana tienpinnan korkeutta, kantavuuslukemat hajaantuvat hieman selvemmin suuremmalle kantavuusalueelle. Pientareen korkeuden lähentyessä tienpinnan korkeutta kantavuuslukemat keskittyvät vähän selvemmin matalampiin kantavuuksiin.

Kivennäismaan pistediagrammeista (kuviot 10 ja 11) voidaan nähdä, että kantavuustulokset jakaantuvat hyvin laajasti kaikilla korkeuseroluokilla. Kantavuudet keskittyvät hieman selvemmin matalalle, kun piennar laskee keskimäärin alemmas kuin 30 senttimetriä tien pinnasta tai matalampaa piennarta tarkastellessa alemmas kuin 50 senttimetriä tien pinnasta. Näitä pienemmillä korkeuseroilla kantavuusluvut jakaantuvat tasaisemmin.

Regressioanalyysissä keskivirhe on molemmissa yli 80 megapascalia. Jos verrataan tuota lukemaa kantavuusluokan ”hyvä” alarajaan, mikä on 121 megapascalia, voidaan todeta, että vaihtelu on erittäin suurta.

kantavuuksien sekä pientareiden ja tienpinnan korkeuserojen välillä ei ole selkeää korrelaatiota. Analyysien perusteella jokaisessa luokassa on käytännössä nollakorrelaatio, ja selitysaste on jokaisessa tapauksessa erittäin alhainen. Tarkasteltaessa pientareiden korkeuserojen keskiarvoja kivennäismaaluokassa

selitysaste on korkein, noin 18 prosenttia. Muutenkin käytettäessä korkeuserojen keskiarvoja selitysasteet ovat hieman paremmat. Regressioanalyysien perusteella saaduissa malleissa on paljon epävarmuutta, mikä näkyy suurina luottamusväleinä.

## 5.2 Ojien syvyydet ja kantavuus

Kuvioissa 12–17 on esitetty pudotuspinomittauksella saadut tien kantavuusmittaustulokset suhteessa maanpinnan korkeusmallista saatavaan sivuojien syvyystiетoon. Kuvioissa 12 ja 13 on esitetty tulokset suolla ja soistumalla, kuvioissa 14 ja 15 suolla ja kuvioissa 16 ja 17 kivennäismaalla. Pienempi syvyyssluokka tarkoittaa syvempää ojaa.

Tulokset ovat hyvin samanlaiset kuin tarkasteltaessa piennarten korkeuseroja tienpintaan nähden. Suomalta ja soistumalta saaduista tuloksista voi nähdä, että kantavuusmittaustulokset hajaantuvat suuremmalle alueelle, kun ojasyvyydet kasvavat suuremmaksi kuin 60 senttimetriä. Hieman suurempi osa mittauspisteistä painottuu kohtiin, joissa ojasyvyydet ovat enemmän kuin 50 senttimetriä.

Kangasmaiden tuloksista voidaan havaita, että kantavuustulokset keskittyvät alempiin kantavuusluokkiin, kun sivuojien syvyys kasvaa yli 60 senttimetrin, muutamaa yksittäistä pistettä lukuun ottamatta. Näitä pienemmillä ojasyvyyksillä kantavuustulokset jakaantuvat tasaisemmin eri suuruusluokkiin.

Jokaisessa luokassa regressiomallin mukaan sivuojien syvyyden pienentyessä, keskimääräinen kantavuus paranee. Suolla ja soistumalla sekä pelkästään suolla kantavuuteen näyttää vaikuttavan enemmän syvemmän sivuojan syvyys kuin sivuojien keskiarvo. Suota ja soistumaa yhdessä tarkasteltaessa kymmenen senttimetrin lisäys syvemmän ojan syvyydessä pienentää kantavuutta noin 1,7 megapascalialla. Kivennäismaalla sivuojien keskisyvyys korreloi paremmin kantavuuden kanssa. Kymmenen senttimetrin syvyyden lisäys pienentää kantavuutta 15 megapascalialla.

Samoin kuin piennarten korkeuseroja tarkasteltaessa, sivuojien ja kantavuuden korrelaatiot ja selitysasteet jäävät jokaisessa luokassa hyvin alhaisiksi. Suurin korrelaatio sivuojien syvyydellä näyttää regressioanalyysin mukaan olevan kivennäismaalla, jossa ojien syvyys selittää noin 25 prosenttia kantavuustuloksista. Kivennäismaalla mallin keskivirhe on hyvin suuri, noin 80 megapascalina. Myös mallien luottamusvälit ovat suuret.

### 5.3 Kuivavara

Tien kuivavaraa tutkittiin vertaamalla maastomittauksia ja maan pintamallista saatavaa sivuojien syvyystietoa kuivavaramittauspisteissä. Kuivavara mitattiin niissä pudotuspainomittauspisteissä, joiden kohdalla sivuojissa oli vettä. Kuivavaraksi mitattiin tienpinnan ja vedenpinnan välinen korkeus.

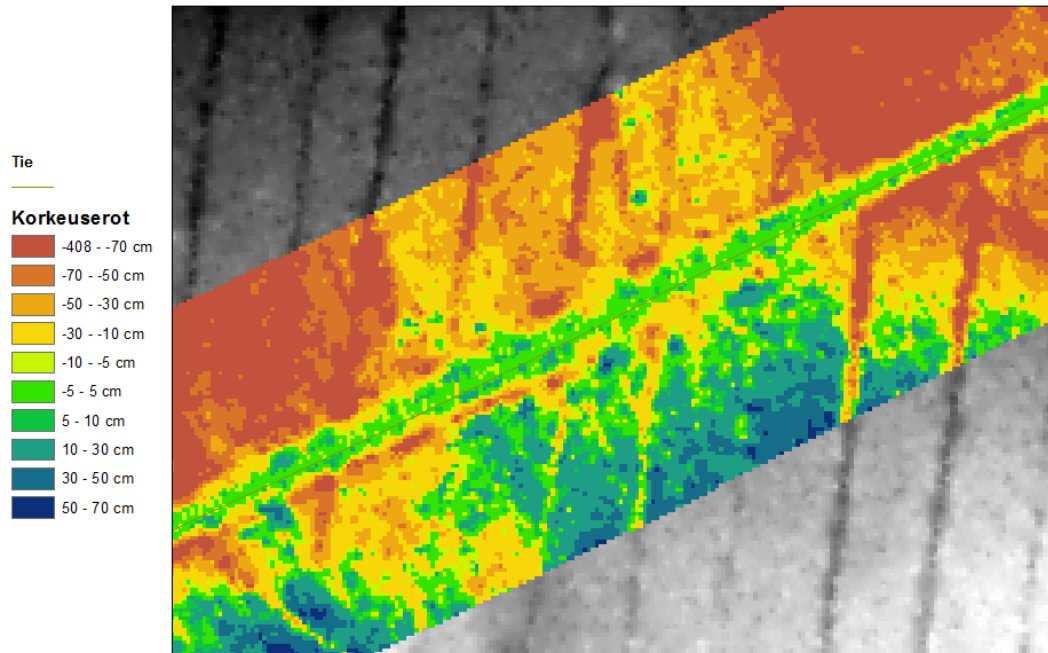
Kuviossa 18 on esitetty pistediagrammi, joka on saatu yhdistämällä maastossa mitattu kuivavaratieto ja korkeusmallista saatu sivuojan ja tienpinnan korkeuserotieto. Pistejoukko kuvaa sitä, kuinka hyvin pintamallista saatava ojasyvyys vastaa maastossa mitattua kuivavaran mittaus tietoa. Korkeusmallista saadut tiedot ovat keskiarvoja tiensuuntaisista 5 x 1 metrin alueista.

Pistejoukolle on laskettu lineaarinen regressiosuora, joka on muotoa:  $y = kx + B$ . Kuvio on laskeva johtuen mitatun ja mallista tulkitun korkeuseron etumerkkeen asettelusta. Yhtälön kulmakerroin on lähellä -1:tä, mikä kertoo että kuivavaran kasvaessa yhden senttimetrin, korkeusmallista saatava korkeusero kasvaa noin yhden senttimetrin. Vakio B:n arvo kuitenkin kertoo, että malli aliarvioi kuivavaraa keskimäärin noin puoli metriä. Regressiomallin hyvyttä kuvaava selitysaste  $R^2$  saa arvon 59,5 prosenttia.

### 5.4 Korkeuseromalli

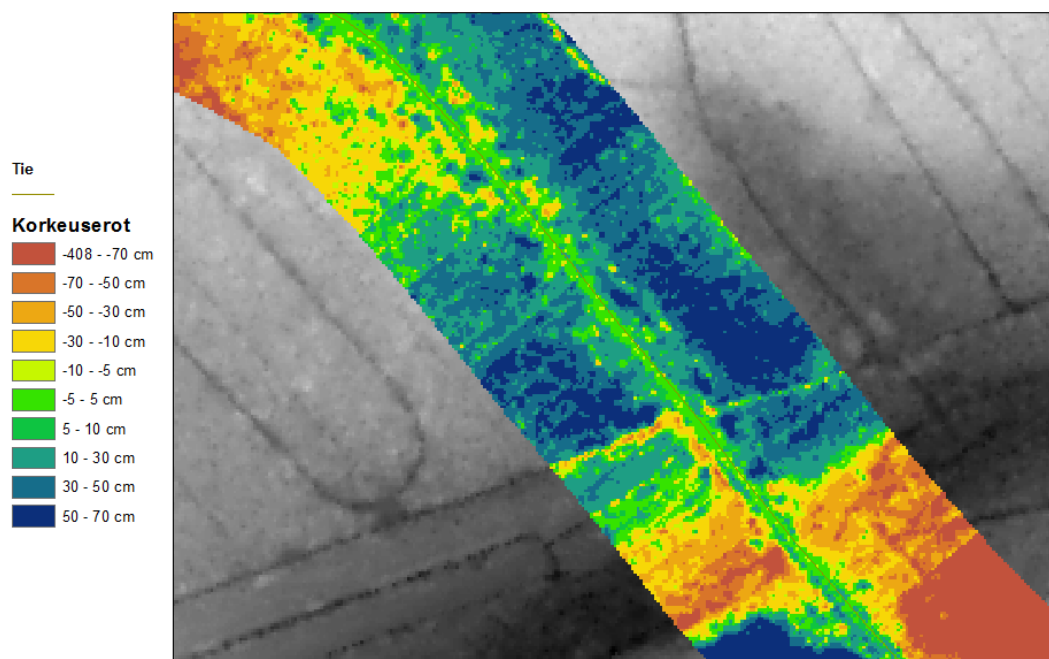
Kuvissa 6–8 on esitetty työssä muodostettua korkeuseromallia. Malli esittää maaston korkeuseron senttimetreissä tien keskiviivaan nähden. Taustalla näkyy harmaasävyisenä maanpinnan korkeusmalli. Korkeuserot on luokiteltu 20 sent-

timetrin luokkiin. Nollataso ( $0 \pm 10$  cm) on kuvassa vihreä ja mitä sinisemmäksi väri muuttuu, sitä ylemmäs nouseaan ja vastaavasti punaista kohti maanpinta laskee. Jokaisen maastopisteen korkeusero on esitetty lähimmän tien keskiviivan pisteen suhteen.

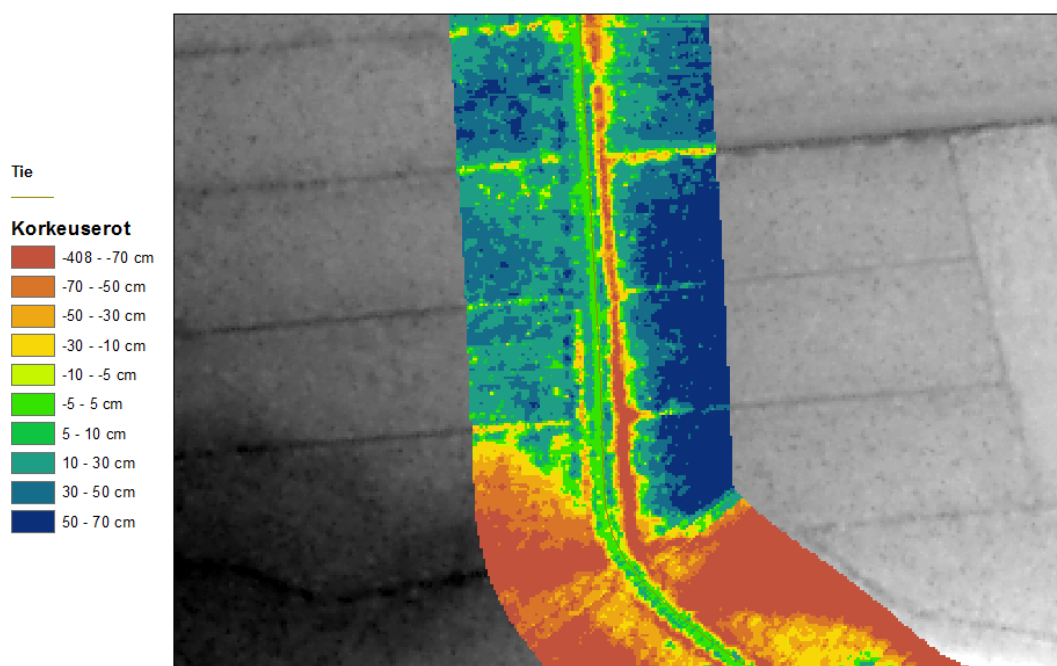


Kuva 6. Maaston korkeuseromalli

Kuvasta 6 voidaan havaita, että paikoitellen tien keskiviivan molemmin puolin on tummia läikkiä. Nämä voivat tarkoittaa, että tien laidassa on palletta. Vastava näkymä voi johtua myös siitä, että tien keskiosa on painunut kuopalle, jolloin alkuperäiselle tasolle jäänyt reuna näkyy korkeamana tien keskustaan nähden. Yksi vaihtoehto on, että tien reunalla on sopivan matalaa kasvustoa, joka ei ole suodattunut pois korkeusmallia tehtäessä. Kuvasta nähdään myös, että tien reuna on paikoin painunut.



Kuva 7. Maaston korkeuseromalli ja korkeusmalli (taustalla)



Kuva 8. Maaston korkeuseromalli ja korkeusmalli (taustalla)





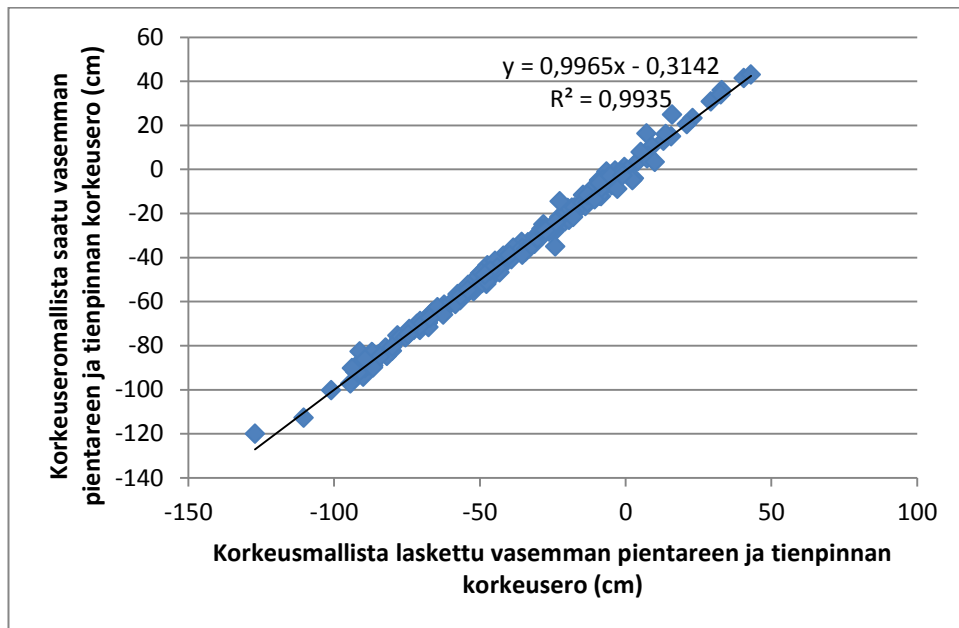
Kuva 9. Suohon vajonnut metsätie. (Kuva: Atso Tarkkinen.)

Kuvissa 7–9 tie kulkee suokaistaleen yli. Kuvista voidaan selvästi nähdä, että tien kohdalla maaperä on painunut huomattavan paljon ja tien pinta on ympäröivän maaston alapuolella. Kuvista voidaan nähdä myös, että sivuojat ovat paikoin erittäin heikosti erotettavissa. Korkeusero on luokiteltu siten, että tienpinnan tasalta -10–10 senttimetriä on luokiteltu viiden senttimetrin luokkiin ja niiden ala- ja yläpuolella 20 senttimetrin luokkiin.

Kuvat 8 ja 9 ovat samasta tien kohdasta. Valokuvasta voidaan nähdä, että sivuojiin viettäviä luiskia ei ole, vaan tien viereinen maanpinta on lähes vaakatasossa, korkeammalla tienpintaan nähden. Kantavuusmittausten mukaan kuvan 7 kohdassa tien kantavuus on noin 44 megapascalialia ja kuvan 8 kohdassa 43 megapascalialia. Suon päälle rakennettujen tieosuuksien kantavuudet ovat olleet keskimäärin 48 megapascalialia.

Kuviossa 3 on esitetty muodostetun korkeuseromallin ja korkeusmallista laskeamalla saatavan korkeuserotiedon vastaavuutta. Siihen on valittu tien vasemman puolen pientareen mittauspisteet ja tuloksena on pistediagrammi ja sitä vastaava lineaarinen regressiomalli, jonka kulmakerroin  $k \approx 1$  ja selitysaste  $R^2 \approx 1$ . Yh-

tälön vakio B saa arvon  $-0,3142$ , mikä tarkoittaa, että mallissa on alle yhden senttimetrin harha.



Kuvio 3. Korkeuseromallin vertaus korkeusmallista saatavaan tietoon.

## 6 Yhteenveto

Tämän opinnäytetyön taustalla oli Metsähallituksen tavoite parantaa metsäteiden tienpidon suunnittelun kustannustehokkuutta. Erityinen tarve on tienpidon toimenpiteiden kohdentamiselle siten, että jokaiselle tieosuudelle tehtäisiin vain tarvittavat hoito- ja kunnostustyöt. Tämä vaatii kuitenkin tarkkaa toimenpidetarpeen selvittämistä.

Työn tavoitteena oli selvittää laserkeilausaineistosta tuotetun maanpinnan korkeusmallin käyttömahdollisuuksia metsäteiden kantavuuden määrittämiseen sekä tien pinnan muotojen selvittämiseen. Aineistona käytettiin Metsähallituksen teettämästä laserkeilauksesta tuotetusta pistepilvestä muodostettua yhden metrin korkeusmallia. Käytössä oli myös kesän 2013 aikana tuotetut kantavuusmittaustulokset sekä kesällä 2014 kerätty maastomittausaineisto.

Työssä päätettiin keskittyä metsätietä ympäröivän maaston ja tienpinnan korkeuserojen tutkimiseen mahdollisena selittäjänä tekijänä. Taustalla oli tieto siitä,

että Suomessa pohjavesi noudattaa maanpinnan muotoja. Oletus oli, että jos tienpinnan korkeus on lähellä ympäröivän maanpinnan korkeutta, tien perusta voi olla kosteampi ja täten heikommin kantava, kuin jos tienpinta on ylempänä.

Korkeusmallista kerättiin korkeuserotietoa painomittauspisteiden kohdalta molemmilta puolen tietä. Tieto otettiin kartoitusaineistosta määritetyn sivuojan kohdalta ja kolme metriä sivuojan takaa maastosta. Tällöin oli mahdollisuus saada tietoa sivuojan syvyydestä ja sen vaikutuksesta kantavuuteen sekä ojan takaisen maaston korkeuden vaikutuksesta kantavuuteen.

Saatu aineisto luokiteltiin maalajeittain kivennäismaihin, suohon ja soistumaan sekä erikseen pelkkään suohon. Erityisen mielenkiinnon kohteena olivat kantavuustulokset suomaan päälle rakennettujen tieosuuksien kohdalla. Turvemaat aiheuttavat perinteisesti suurimmat haasteet tiestön kantavuudelle. Aineistolle tehtiin tilastolliset korrelaatio- ja regressioanalyysit.

Tien pinnanmuodon tutkimista varten korkeusmallista tehtiin suhteellinen korkeusmalli, joka kuvaa ympäröivän maanpinnan korkeuseroja tien keskiviivaan nähden. Oletuksena oli, että tällaisesta mallista voi nähdä tienpinnan sivuttaisia muotoja, ja lisäksi esimerkiksi sivuojien kunnan ja syvyyden.

Tien pinnan ja ympäröivän maaston korkeuserojen ja kantavuusmittaustulosten välille ei löydetty selkeää korrelaatiota. Regressiomallien selitysasteet olivat heikot ja tilastolliset luotettavuudet huonoja. Työssä käytetyt lineaariset mallit antoivat päinvastaisia tuloksia kuin alun perin odotettiin, eli korkeuserojen pienentyessä kantavuudet olivat parempia.

Kivennäismaalla tien kantavuuteen vaikuttaa maalaji, mikä todennäköisesti näkyy tuloksissa siten, että suuremmat ojan syvyydet antavat huonoja kantavuustuloksia, koska huonomman kantavuusluokan mailla penkka tehdään tienrakennusohjeiden mukaan korkeammaksi. Kovilla mailla tien penkan korkeus ei ole ratkaiseva. Sama voi vaikuttaa myös suomaalla, jossa turpeen maatumisaste vaikuttaa pohjamaan kantavuuteen.

Kuivavaraa tutkittiin maastosta mitatun kuivavaran ja korkeusmallista saatavan sivuojien ja tienpinnan korkeuserotietojen avulla. Regressioanalyysin mukaan korkeusmallista saatava korkeuserotieto mukaili maastomittauspisteiden mittauksia, mutta malli antoi useiden kymmenien senttimetrien harhan.

Metsien laserkeilauksessa käytettävät lähi-infrapuna-alueen lasersäteet absorboituvat tehokkaasti veteen. Tällöin korkeuspisteitä ei saada ojien vedenpinnalta, vaan korkeusmallia luotaessa näiden kohtien korkeustieto voidaan esimerkiksi interpoloida vesirajan viereisen kuivan maan korkeustiedosta. Tässä tapauksessa pintamallista saatava sivuojien syvyystieto voi kuvata kuivavaraa, mutta se aliarvioi sitä mallin karkeuden vuoksi. Asiaa kannattaa ehdottomasti tutkia tarkemmin, kun saadaan yksityiskohtaisempia korkeusmalleja.

Paikannuslaitteiden epätarkkuudesta johtuen, korkeuserotieto korkeusmallista on otettu keskiarvona noin viiden neliömetrin aloilta. Kuivavaramittaukset on tehty maastossa pistemittauksina. Tämä lienee yhtenä selittävänä tekijänä vakion B arvolla kuivavaran regressioanalyysissä. Tässä tulee lisäksi huomioida selityksasteen alhaisuus ja aineiston määrän pienuus sekä se, että korkeusmalli on laadittu vuoden 2011 laserkeilausaineistosta ja maastomittaukset on tehty kesällä 2014.

Metsähallitukselle tuotetusta laserkeilausaineistosta tehdyn maanpinnan korkeusmallin tarkkuus oli yksi neliometri. Laserkeilauksen keilaustarkkuus on ollut 0,5–1 pulssia neliometrillä. Tämän perusteella voidaan päätellä, että korkeusmallia luotaessa mukaan on tullut jonkin verran niin sanottuja nollapikseileitä, joiden korkeustieto on jouduttu interpoloimaan. Tämä alentaa hieman mallin todellista tarkkuutta.

Paikoitellen tien pientareilla ja ojissa kasvoi kesällä 2014 runsaasti vesakkoa ja vähän isompiakin puita. Koska laserkeilaus on tehty keskikesällä 2011 lehden ollessa jo puissa, tämä on voinut aiheuttaa sen, että mittaustietoa ei ole saatu joko ollenkaan tai sitä on saatu harvempana tiheimmin peitteisistä kohdista. Tämä on voinut vaikuttaa korkeusmallista sivuojien ja pientareiden kohdilta kerättyyn korkeustietoon.

Korkeuseroaineiston keräämisen apuna käytettiin korkeusmallia, peruskarttoja sekä ilmakuvia. Paikoitellen tien ja sivuojien muotoja oli vaikea erottaa. Tämä toi epävarmuutta tien keskiviivan ja erityisesti sivuojien digitoimiseen ja sataprosenttisen tarkkaa työtä on vaikea tehdä. Tämä voi näkyä virheenä korkeusmallista kerätystä datasta, esimerkiksi positiivisia ojien syvyyksiä mittauspisteissä.

Yksi suuri kantavuuteen vaikuttava tekijä on tien rakenteellinen kunto. Aineistosta voitiin havaita, että pahimmin painuneiden, suolle rakennettujen tieosuuksien kantavuudet olivat hieman keskiarvoa alempia. Korkeusmallin tarkkuus on sen verran karkea, että tienpinnasta ei ole mahdollista erottaa kovin pieniä muotoja, kuten raiteita, pienempiä kuoppia tai kapeita palteita, vaan nämä suodattuvat aineistosta pois. Tämän vuoksi tien rakenteellista kuntoa on vaikea arvioida pelkästään korkeusmalliaineistosta.

Korkeuseromallista voi nähdä jonkin verran tien sivuttaisia muotoja (kuva 6). Tässä työssä havaintoja ei ole vahvistettu maastosta. Jatkotutkimukset ovat tarpeen, jos asialle halutaan selvyyttä.

Metsähallituksella on metsäautoteitä yli 30 000 kilometriä ja Puolanka–Utajärvi-alueella pudotuspainomitattuja teitäkin on lähes sata kilometriä. Tämän työn tutkimus kattaa vain noin 10 kilometrin matkalta näitä teitä. Käytetty aineisto on siis aika suppea ja tarkempien tulosten saamiseksi jatkotutkimuksia tarvitaan.

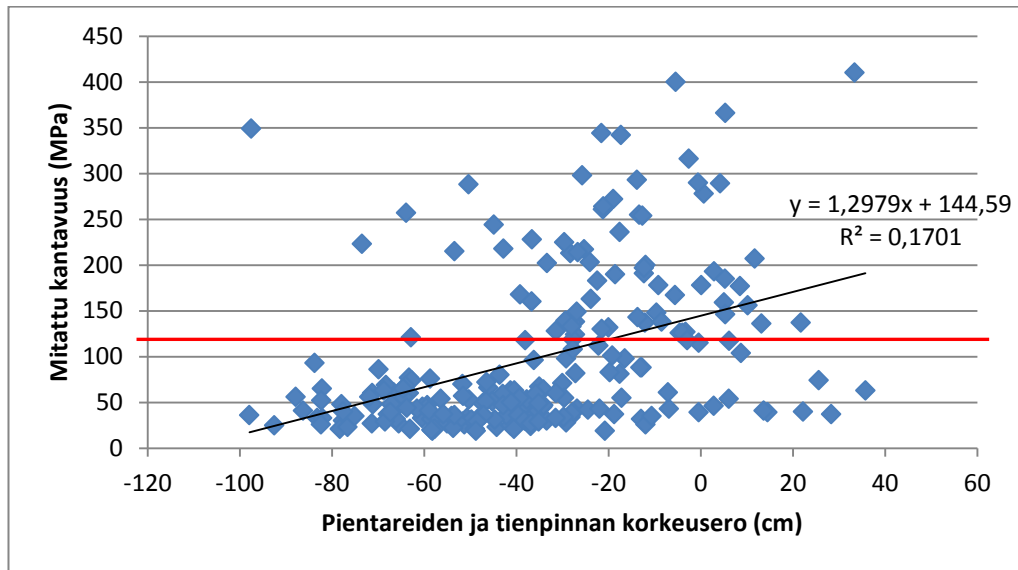
Laserkeilaustekniikka kehittyy jatkuvasti. Tarkkuus paranee ja keilauskustannukset tippuvat. Tekniikka tulee todennäköisesti helpottamaan tiepidon suunnittelua, kun tarkkuus alkaa olla sitä luokkaa, että pienetkin maanpinnan muodot näkyvät malleista.

## Lähteet

- Alho, P., Hyyppä, H., Hyyppä, J., Flener, C., Kasvi, E., Vaaja, M., Kukko, A., Lotsari, E., Hohenthal, J., Kurkela, M., Kaartinen, H. & Haggren, H. 2011. Uudet mittausmenetelmät jokiympäristön kartoituksessa. Turun yliopisto. Maantieteen ja Geologian laitos. Aalto-yliopisto. Maanmittaustieteiden laitos & Geodeettinen laitos. Helsingin yliopisto. Geotieteiden ja maantieteen laitos. The Photogrammetric Journal of Finland. 22 (3), 115–127.
- Esri. 2015. ArcGIS Resources. ArcGIS Help 10.2, 10.2.1 and 10.2.2. What is TIN surface? <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.2/index.html>. 13.2.2015.
- Etelätalo, E. 2014. Maalajit ja niiden ominaisuudet tienrakennuksen kannalta. Opintomateriaali opintojaksolla: Metsätien rakennus. Karelia-ammattikorkeakoulu.
- Holopainen, M., Hyyppä, J., Vastaranta, M. & Hyyppä, H. 2011. Laserkeilaus metsävarojen hallinnassa. Helsingin yliopisto. Metsätieteiden laitos. Aalto yliopisto. Geodeettinen laitos. The Photogrammetric Journal of Finland 22 (3), 128–149.
- Holopainen, M., Hyyppä, J. & Vastaranta, M. 2013. Laserkeilaus metsävarojen hallinnassa. Helsingin yliopiston metsätieteiden laitoksen julkaisu 5: 1–75.
- Juntunen, A. 2014. Tiimiesimies. Metsähallitus. Länsi-Kainuun metsätiimi. Keskustelut 7/2014.
- Kokkila, M. 2001. Paikkatietopohjainen kulkukelpoisuusarviointi puunkorjuun suunnittelun ja toteutuksen apuvälineenä. Metsätieteen aikakauskirja 4/2001. 640–643.
- Kokkila, M. 2011. Maastoa ja tiestöä kuvaavan monilähdeinformaation hyödyntämismahdollisuudet puunhankinnassa. Metsätehon raportti 217. Helsinki. Metsäteho Oy.
- Korpilahti, A. (Toim.) 2008. Metsäteiden kuntoinventoinnin ja kuntotiedon hyödyntämisen toimintamalli. Metsätehon raportti 202. Helsinki. Metsäteho Oy
- Lappi, J. 2015. Toimitusjohtaja. Oulun Geolaboratorio. Puhelinkeskustelu 30.3.2015.
- Lihong, S. & Gibeaut, J. 2009. Extracting surface features of the Nueces using Lidar points. Harte Research Institute for Gulf of Mexico Studies. Texas A&M University - Corpus Christi
- Liikennevirasto. 2014. Sorateiden kunnossapito. Liikenneviraston ohjeita 1/2014. Helsinki. Liikennevirasto.
- Maltamo, M. & Pitkänen, J. 2003. Laserkeilauksen metsätaloudelliset sovellusmahdollisuudet. Joensuun yliopisto. Metsätieteellinen tiedekunta. Maanmittaustieteiden Seuran julkaisu 40.
- Mellin, I. 2010. Tilastollinen riippuvuus ja korrelaatio. Luentomateriaali opintojaksolta: Ennustaminen ja aikasarja-analyysi. Aalto-yliopisto. Matematiikan ja systeemianalyysin laitos.
- Metsähallitus 2007. Metsähallitus investoi kymmenen vuoden aikana 10 miljoonaa euroa metsätieverkoston ylläpitoon Oulun läänissä. <http://www.metsa.fi/sivustot/metsa/fi/ajankohtaista/Tiedotearkisto/Tie>

- dotteet2007/Sivut/Metsahallitusinvestoikymmenenvuodenaikana10mi  
ljoonaaeuroametsatieverkostonyllapitoonOulunlaanissa.aspx.  
22.12.2014.
- Metsähallitus. 2009. Metsähallitus peruskorjaa metsäteitä ja tehostaa tieinves-  
tointien kohdentamista.  
<http://www.metsa.fi/sivustot/metsa/fi/ajankohtaista/Tiedotteet2009/Sivut/Metsahallitusperuskorjaametsateitajatehostaatieinvestointienkohdentamista.aspx>. 22.12.2014.
- Metsähallitus. 2014a. Metsäteiden peruskorjaus ja hoito.  
<http://www.metsa.fi/sivustot/metsa/fi/metsatalous/metsahallituksenmonikayttometsat/metsatiet/metsateidenperuskorjausjahoito/Sivut/default.aspx>. 22.12.2014.
- Metsähallitus 2014b. Virkistyskäyttäjät kulkevat metsäteitä.  
<http://www.metsa.fi/sivustot/metsa/fi/ajankohtaista/Tiedotteet%202014/Sivut/Virkistyskayttajatkulkevatmetsateita.aspx>. 22.12.2014.
- Metsähallitus. 2014c. Mutkat suoriksi alueurakoinnilla.  
[http://www.metsa.fi/sivustot/metsa/fi/Metsatalous/Uutisia/PohjanmaaKainuu/Sivut/Mutkatsuoriksualueurakoinnilla\\_.aspx](http://www.metsa.fi/sivustot/metsa/fi/Metsatalous/Uutisia/PohjanmaaKainuu/Sivut/Mutkatsuoriksualueurakoinnilla_.aspx). 22.12.2014.
- Metsäteho. 2001a. Metsätieohjeisto–Tekstiosa. Helsinki. Metsäteho Oy.
- Metsäteho. 2001b. Metsätieohjeisto–Liiteosa. Helsinki. Metsäteho Oy.
- MML Paikkatietokeskus FGI. 2015. Korkeusmallit.  
<http://www.fgi.fi/fgi/fi/teemat/korkeusmallit> 13.2.2015.
- Määttä, J. 2015. Paikkatietoasiantuntija. Metsähallitus. Puhelinkeskustelu  
30.3.2015.
- Petäjä, S. & Spoof, H. 2000. TPPT menetelmäkuvaus. Pudotuspainolaitemittaus. Espoo. VTT Yhdyskuntatekniikka.
- Taanila, A. 2010. Lineaariset regressiomallit.  
<http://myy.haagahelia.fi/~taaak/m/regressio.pdf>. 29.4.2015.
- Törmä, M. 1998. Sähkömagneettisen säteilyn vuorovaikutus kohteen kanssa: Optinen ja lähi-infrapuna-alue.  
<http://foto.hut.fi/~markus/Mrs/Svk/Vnir/intervir.html>. 22.2.2015.

## Regressioanalyysien tulokset



Kuvio 4. Mitattu kantavuus suhteessa pientareiden ja tienpinnan korkeuserojen keskiarvoon kaikilla mittauspisteillä.

Taulukko 1. Regressiotunnusluvut (pientareiden ja tienpinnan korkeuserojen keskiarvot kaikilla mittauspisteillä)

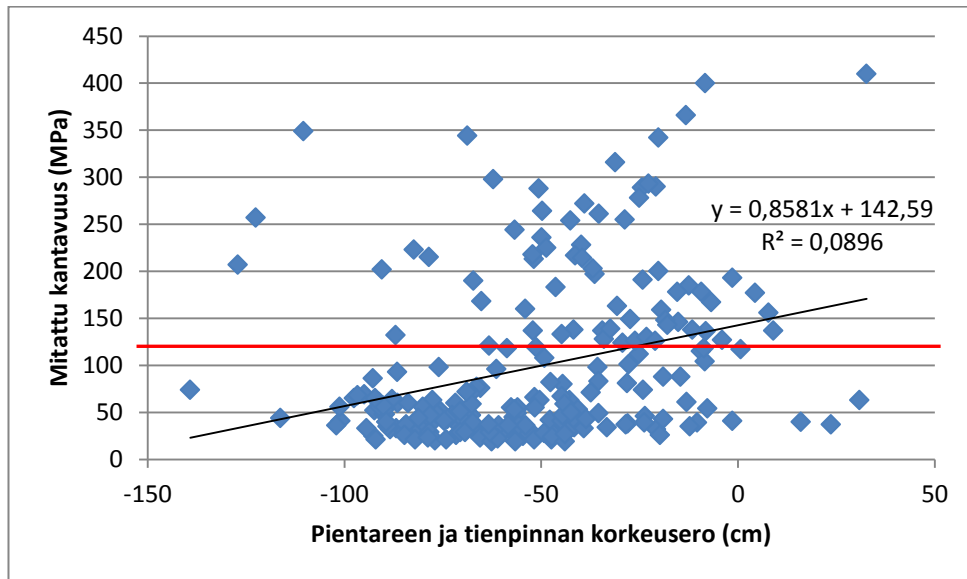
<i>Regressiotunnusluvut</i>	
Korrelaatiokerroin r	0,412
selitysaste $R^2$	0,170
Keskivirhe (MPa)	78,332
Havainnot	225

Taulukko 2. Regressiomallin kertoimet (pientareiden ja tienpinnan korkeuserojen keskiarvot kaikilla mittauspisteillä)

	<i>Kertoimet</i>	<i>Keskivirhe</i>	<i>Alin 95,0%</i>	<i>Ylin 95,0%</i>
vakio B	144,587	8,660	127,521	161,652
kulmakerroin k	1,298	0,192	0,920	1,676



## Regressioanalyysien tulokset



Kuvio 5. Mitattu kantavuus suhteessa matalimman pientareen ja tienpinnan korkeuseroon kaikilla mittauspisteillä.

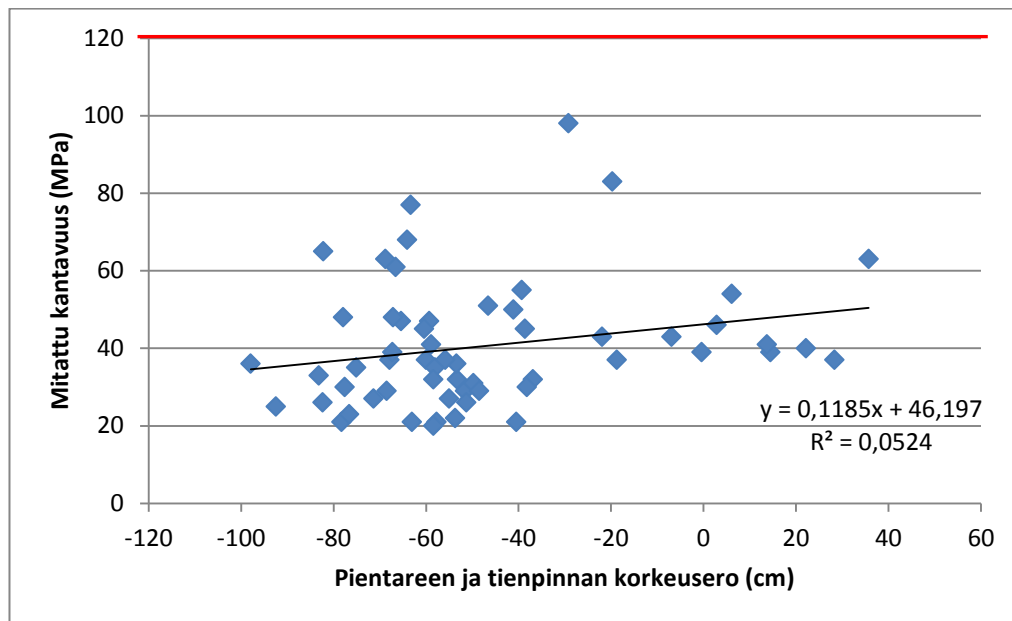
Taulukko 3. Regressiotunnusluvut (matalamman pientareen ja tienpinnan korkeusero kaikilla mittauspisteillä)

<i>Regressiotunnusluvut</i>	
Korrelaatiokerroin r	0,299
Selitysaste R <sup>2</sup>	0,090
Keskivirhe (MPa)	82,040
Havainnot	225

Taulukko 4. Regressiomallin kertoimet (matalamman pientareen ja tienpinnan korkeusero kaikilla mittauspisteillä)

	<i>Kertoimet</i>	<i>Keskivirhe</i>	<i>Alin 95,0%</i>	<i>Ylin 95,0%</i>
Vakio B	142,590	10,996	120,921	164,259
Kulmakerroin k	0,858	0,183	0,497	1,219

## Regressioanalyysien tulokset



Kuvio 6. Mitattu kantavuus suhteessa pientareiden ja tienpinnan korkeuserojen keskiarvoon suolla ja soistumalla.

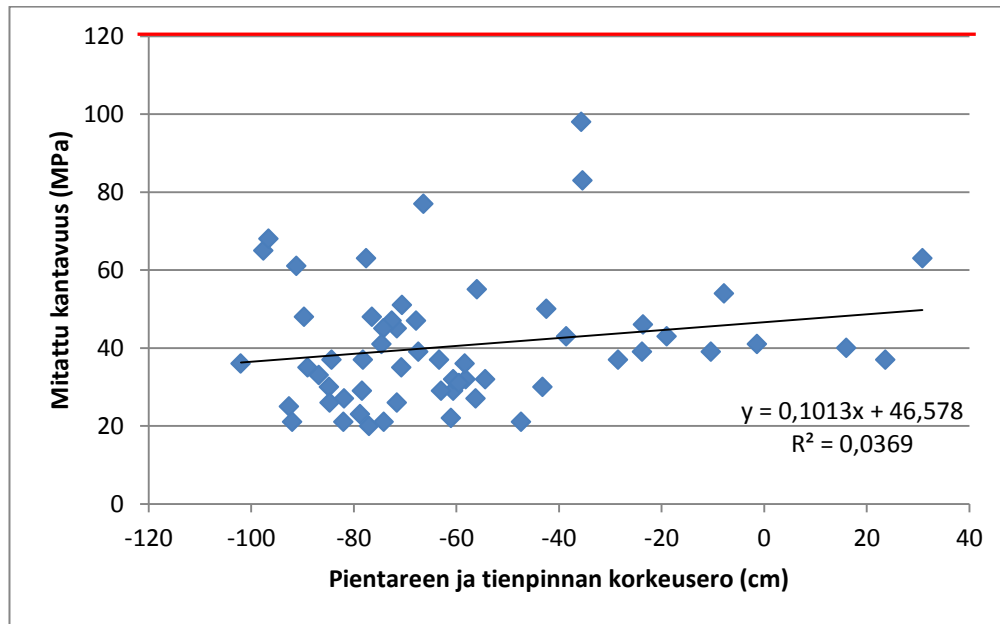
Taulukko 5. Regressiotunnusluvut (pientareiden ja tienpinnan korkeuserojen keskiarvot suolla ja soistumalla)

<i>Regressiotunnusluvut</i>	
Korrelaatiokerroin r	0,229
Selitysaste $R^2$	0,052
Keskivirhe (MPa)	15,864
Havainnot	58

Taulukko 6. Regressiomallin kertoimet (pientareiden ja tienpinnan korkeuserojen keskiarvot suolla ja soistumalla)

	<i>Kertoimet</i>	<i>Keskivirhe</i>	<i>Alin 95,0%</i>	<i>Ylin 95,0%</i>
Vakio B	46,197	3,817	38,549	53,844
Kulmakerroin k	0,118	0,067	-0,016	0,253

## Regressioanalyysien tulokset



Kuvio 7. Mitattu kantavuus suhteessa matalimman pientareen ja tienpinnan korkeuseroon suolla ja soistumalla.

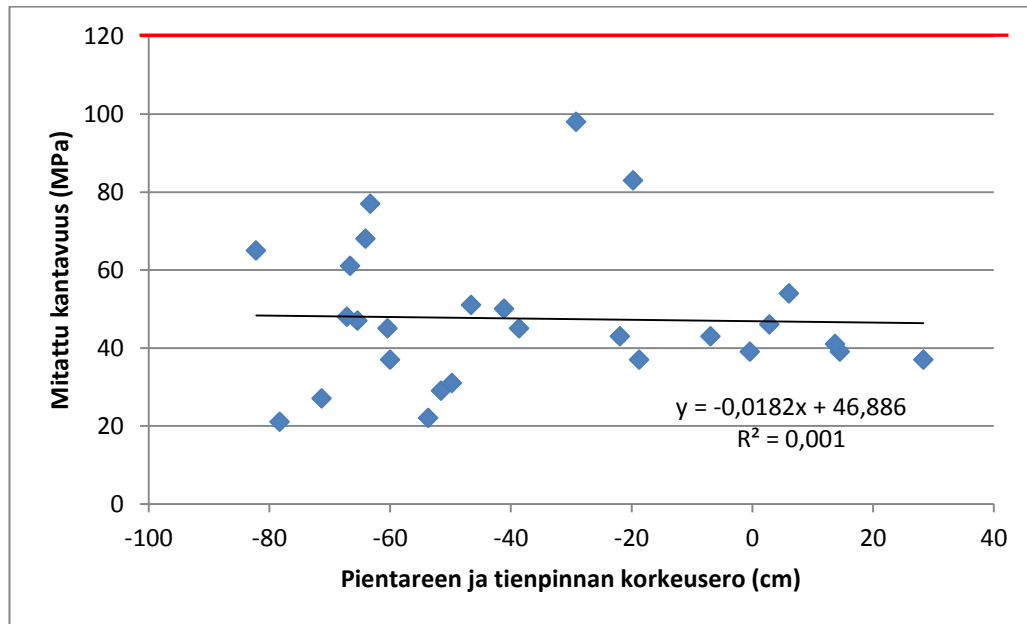
Taulukko 7. Regressiotunnusluvut (matalamman pientareen ja tienpinnan korkeusero suolla ja soistumalla)

<i>Regressiotunnusluvut</i>	
Korrelaatiokerroin r	0,192
Selitysaste R <sup>2</sup>	0,037
Keskivirhe (MPa)	15,993
Havainnot	58

Taulukko 8. Regressiomallin kertoimet (matalamman pientareen ja tienpinnan korkeusero suolla ja soistumalla)

	<i>Kertoimet</i>	<i>Keskivirhe</i>	<i>Alin 95,0%</i>	<i>Ylin 95,0%</i>
Vakio B	46,578	4,607	37,349	55,807
Kulmakerroin k	0,101	0,069	-0,037	0,240

## Regressioanalyysien tulokset



Kuvio 8. Mitattu kantavuus suhteessa pientareiden ja tienpinnan korkeuserojen keskiarvoon suolla.

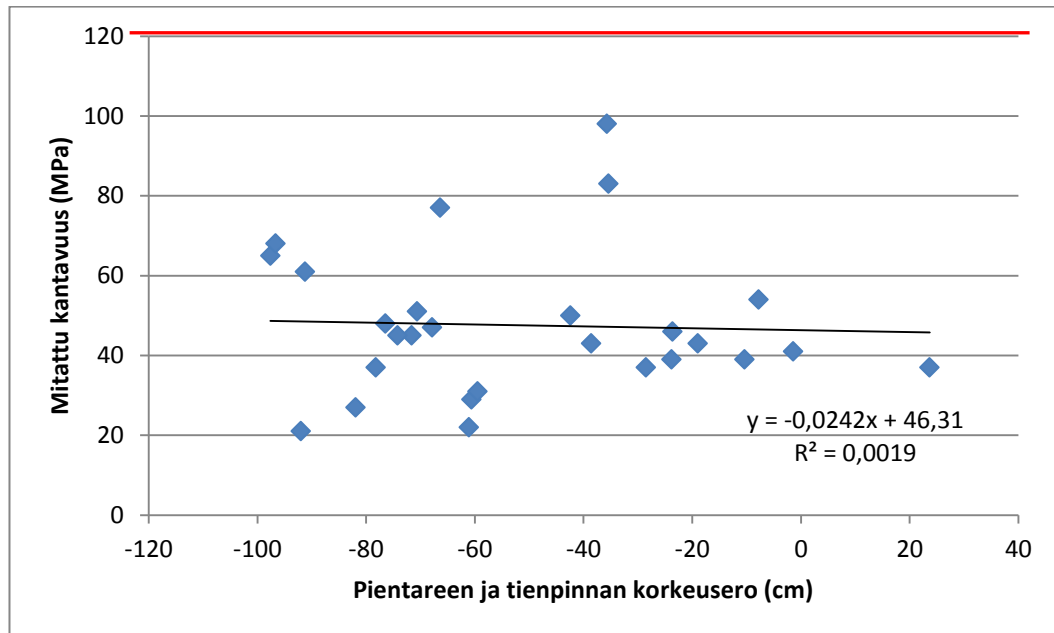
Taulukko 9. Regressiotunnusluvut (pientareiden ja tienpinnan korkeuserojen keskiarvot suolla)

<i>Regressiotunnusluvut</i>	
Korrelaatiokerroin r	0,032
Selitysaste $R^2$	0,001
Keskivirhe (MPa)	18,549
Havainnot	27

Taulukko 10. Regressiomallin kertoimet (pientareiden ja tienpinnan korkeuserojen keskiarvot suolla)

	<i>Kertoimet</i>	<i>Keskivirhe</i>	<i>Alin 95,0%</i>	<i>Ylin 95,0%</i>
Vakio B	46,886	5,477	35,605	58,166
Kulmakerroin k	-0,018	0,113	-0,251	0,215

## Regressioanalyysien tulokset



Kuvio 9. Mitattu kantavuus suhteessa matalimman pientareen ja tienpinnan korkeuseroon suolla.

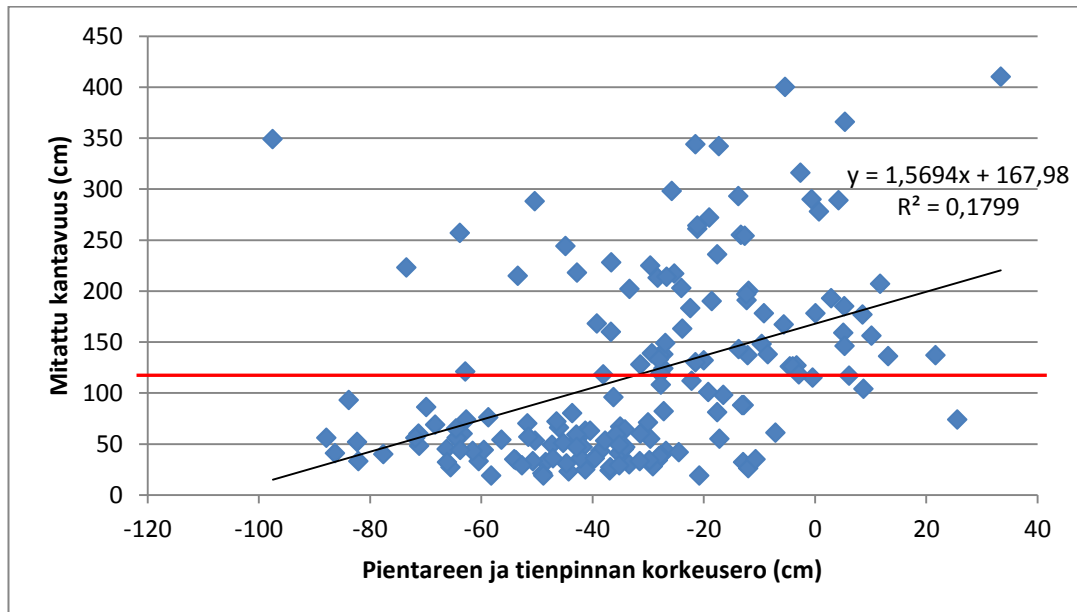
Taulukko 11. Regressiotunnusluvut (matalamman pientareen ja tienpinnan korkeusero suolla)

<i>Regressiotunnusluvut</i>	
Korrelaatiokerroin r	0,043
Selitysaste R <sup>2</sup>	0,002
Keskivirhe (MPa)	18,541
Havainnot	27

Taulukko 12. Regressiomallin kertoimet (matalamman pientareen ja tienpinnan korkeusero suolla)

	<i>Kertoimet</i>	<i>Keskivirhe</i>	<i>Alin 95,0%</i>	<i>Ylin 95,0%</i>
Vakio B	46,310	6,786	32,334	60,287
Kulmakerroin k	-0,024	0,112	-0,255	0,207

## Regressioanalyysien tulokset



Kuvio 10. Mitattu kantavuus suhteessa pientareen ja tienpinnan korkeuseron keskiarvoon kangasmaalla.

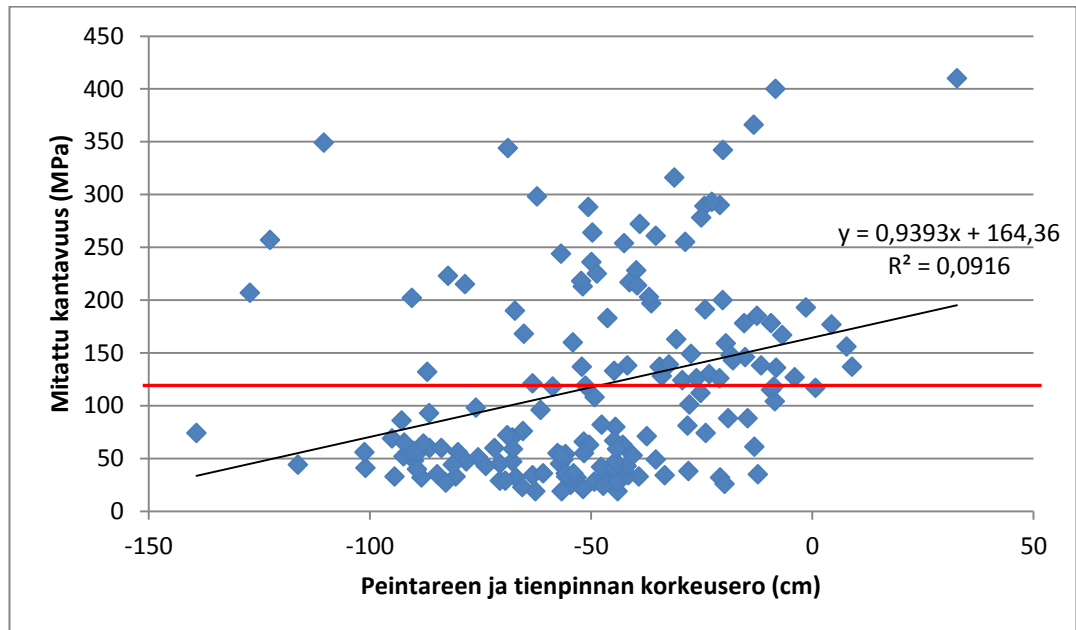
Taulukko 13. Regressiotunnusluvut (pientareiden ja tienpinnan korkeuserojen keskiarvot kankaalla)

<i>Regressiotunnusluvut</i>	
Korrelaatiokerroin r	0,424
Selitysaste R <sup>2</sup>	0,180
Keskivirhe (MPa)	82,733
Havainnot	167

Taulukko 14. Regressiomallin kertoimet (pientareiden ja tienpinnan korkeuserojen keskiarvot kankaalla)

	<i>Kertoimet</i>	<i>Keskivirhe</i>	<i>Alin 95,0%</i>	<i>Ylin 95,0%</i>
Vakio B	167,980	10,516	147,217	188,742
Kulmakerroin k	1,569	0,261	1,054	2,084

## Regressioanalyysien tulokset



Kuvio 11. Mitattu kantavuus suhteessa matalimman pientareen ja tienpinnan korkeuseroon kangasmaalla.

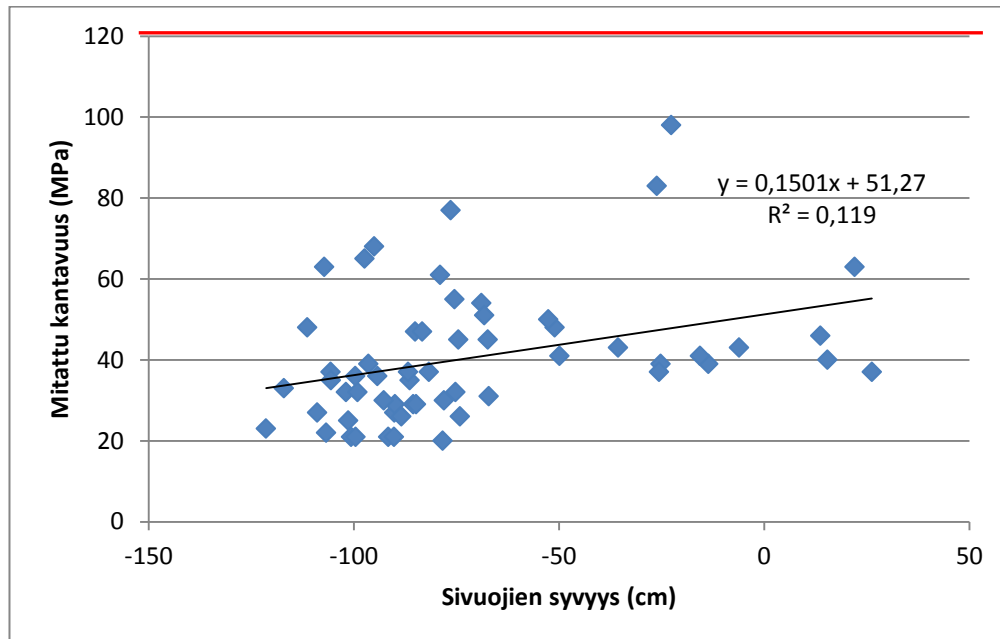
Taulukko 15. Regressiotunnusluvut (matalamman pientareen ja tienpinnan korkeusero kankaalla)

<i>Regressiotunnusluvut</i>	
Korrelaatiokerroin r	0,303
Selitysaste $R^2$	0,092
Keskivirhe (MPa)	87,070
Havainnot	167

Taulukko 16. Regressiomallin kertoimet (matalamman pientareen ja tienpinnan korkeusero kankaalla)

	<i>Kertoimet</i>	<i>Keskivirhe</i>	<i>Alin 95,0%</i>	<i>Ylin 95,0%</i>
Vakio B	164,360	13,253	138,192	190,528
Kulmakerroin k	0,939	0,230	0,485	1,394

## Regressioanalyysien tulokset



Kuvio 12. Mitattu kantavuus suhteessa sivuojen keskisyvyyksiin suolla ja soistumalla.

Taulukko 17. Regressiotunnusluvut (sivuojen ja tienpinnan korkeuserojen keskiarvot suolla ja soistumalla)

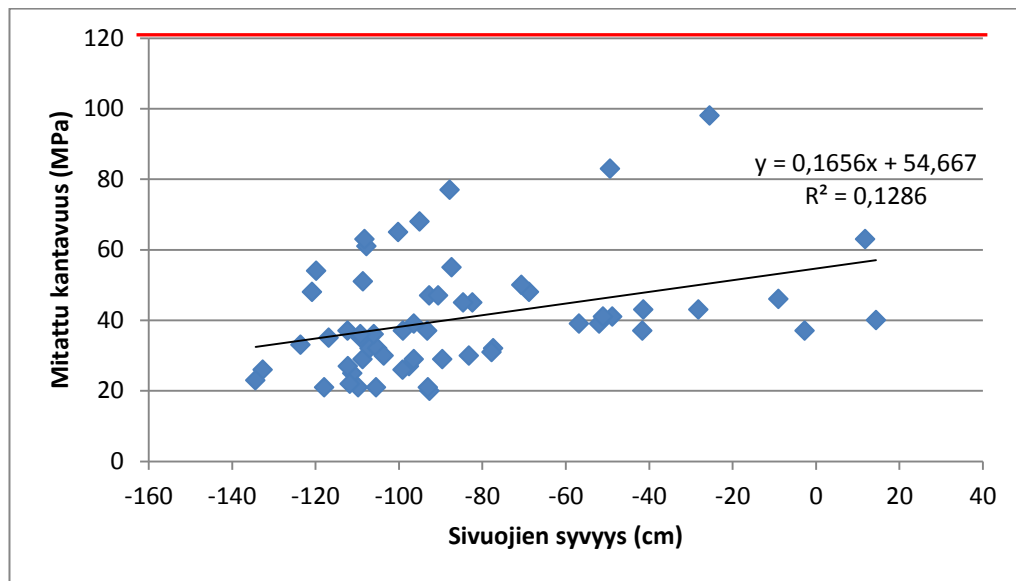
<i>Regressiotunnusluvut</i>	
Korrelaatiokerroin r	0,345
Selitysaste R <sup>2</sup>	0,119
Keskivirhe (MPa)	15,296
Havainnot	58

Taulukko 18. Regressiomallin kertoimet (sivuojen ja tienpinnan korkeuserojen keskiarvot suolla ja soistumalla)

	<i>Kertoimet</i>	<i>Keskivirhe</i>	<i>Alin 95,0%</i>	<i>Ylin 95,0%</i>
Vakio B	51,270	4,378	42,500	60,040
Kulmakerroin k	0,150	0,055	0,041	0,259



## Regressioanalyysien tulokset



Kuvio 13. Mitattu kantavuus suhteessa syvempään sivuojaan suolla ja soistumalla.

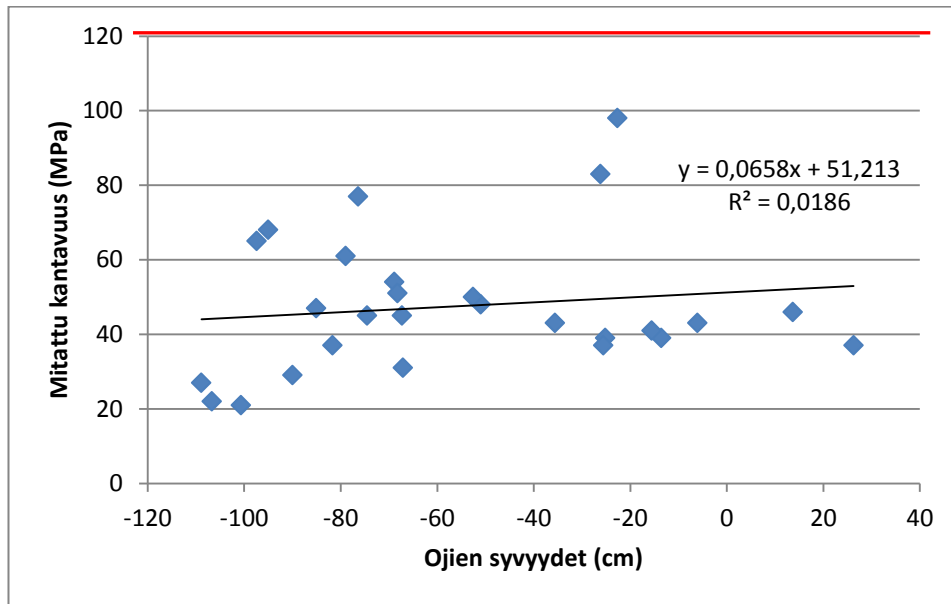
Taulukko 19. Regressiotunnusluvut (syvemmän ojan ja tienpinnan korkeusero suolla ja soistumalla)

<i>Regressiotunnusluvut</i>	
Korrelaatiokerroin r	0,359
Selitysaste R <sup>2</sup>	0,129
Keskivirhe (MPa)	15,213
Havainnot	58

Taulukko 20. Regressiomallin kertoimet (syvemmän ojan ja tienpinnan korkeusero suolla ja soistumalla)

	<i>Kertoimet</i>	<i>Keskivirhe</i>	<i>Alin 95,0%</i>	<i>Ylin 95,0%</i>
Vakio B	54,667	5,296	44,058	65,276
Kulmakerroin k	0,166	0,058	0,050	0,281

## Regressioanalyysien tulokset



Kuvio 14. Mitattu kantavuus suhteessa sivuojien keskisyvyyksiin suolla

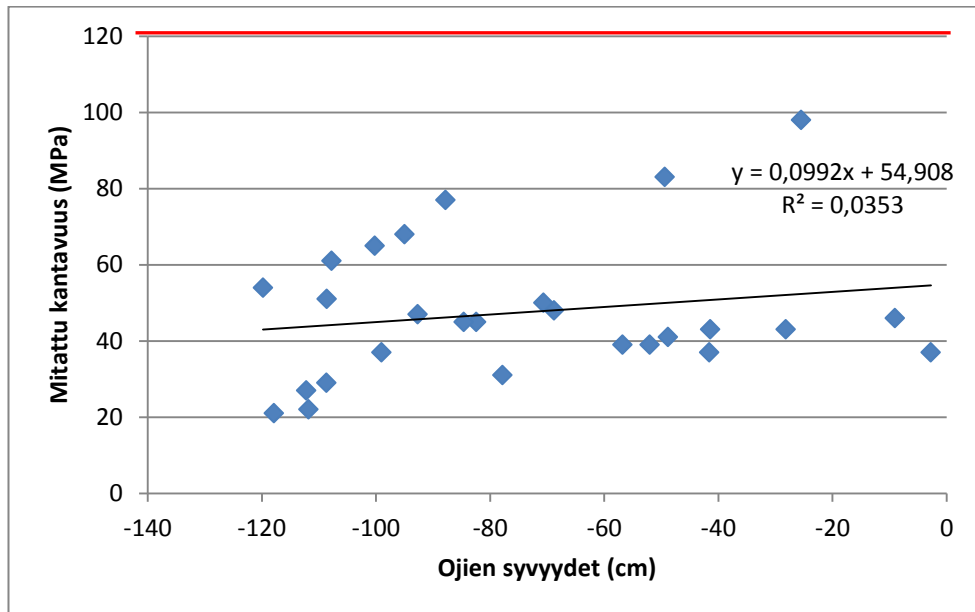
Taulukko 21. Regressiotunnusluvut (sivuojien ja tienpinnan korkeuserojen keskiarvot suolla)

<i>Regressiotunnusluvut</i>	
Korrelaatiokerroin r	0,136
Selitysaste $R^2$	0,019
Keskivirhe (MPa)	18,385
Havainnot	27

Taulukko 22. Regressiomallin kertoimet (sivuojien ja tienpinnan korkeuserojen keskiarvot suolla)

	<i>Kertoimet</i>	<i>Keskivirhe</i>	<i>Alin 95,0%</i>	<i>Ylin 95,0%</i>
Vakio B	51,213	6,385	38,062	64,363
Kulmakerroin k	0,066	0,096	-0,131	0,263

## Regressioanalyysien tulokset



Kuvio 15. Mitattu kantavuus syvemmän sivuojan syvyyteen suolla

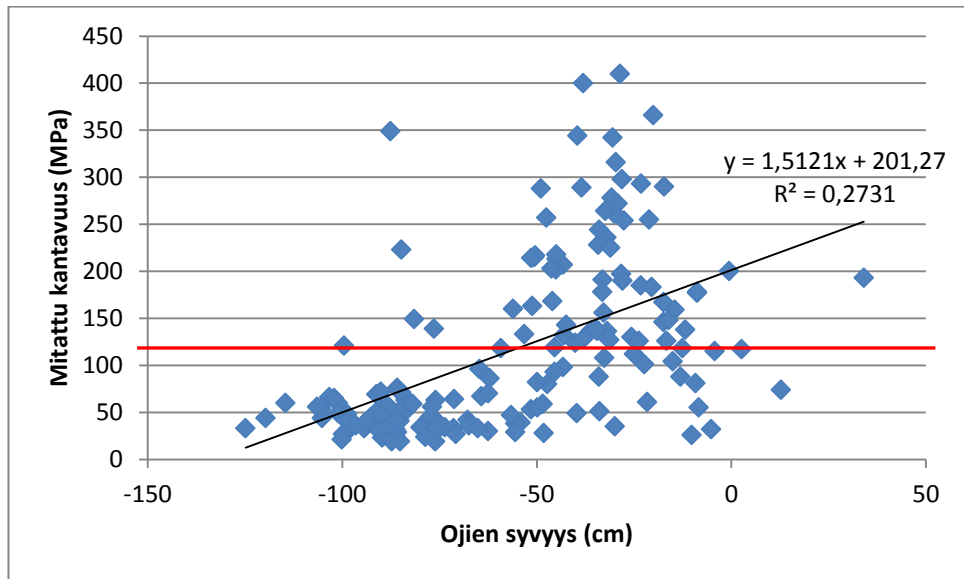
Taulukko 23. Regressiotunnusluvut (syvemmän ojan ja tienpinnan korkeusero suolla)

<i>Regressiotunnusluvut</i>	
Korrelaatiokerroin r	0,188
Selitysaste $R^2$	0,035
Keskivirhe (MPa)	18,229
Havainnot	27

Taulukko 24. Regressiomallin kertoimet (syvemmän ojan ja tienpinnan korkeusero suolla)

	<i>Kertoimet</i>	<i>Keskivirhe</i>	<i>Alin 95,0%</i>	<i>Ylin 95,0%</i>
Vakio B	54,908	8,453	37,499	72,317
Kulmakerroin k	0,099	0,104	-0,115	0,313

## Regressioanalyysien tulokset



Kuvio 16. Mitattu kantavuus suhteessa sivuojien keskisyvyyksiin kangasmaalla

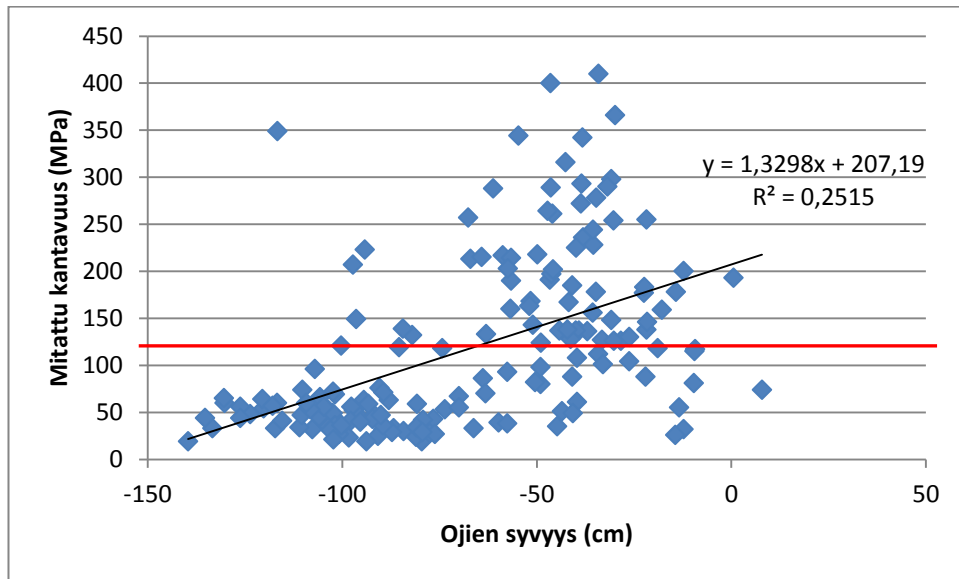
Taulukko 25. Regressiotunnusluvut (sivuojien ja tienpinnan korkeuserojen keskiarvot kangasmaalla)

<i>Regressiotunnusluvut</i>	
Korrelaatiokerroin r	0,523
Selitysaste R <sup>2</sup>	0,273
Keskivirhe (MPa)	77,888
Havainnot	167

Taulukko 26. Regressiomallin kertoimet (sivuojien ja tienpinnan korkeuserojen keskiarvot kangasmaalla)

	<i>Kertoimet</i>	<i>Keskivirhe</i>	<i>Alin 95,0%</i>	<i>Ylin 95,0%</i>
Vakio B	201,267	12,195	177,190	225,345
Kulmakerroin k	1,512	0,192	1,133	1,891

## Regressioanalyysien tulokset



Kuvio 17. Mitattu kantavuus suhteessa syvemmän sivuojan syvyyteen kangasmaalla

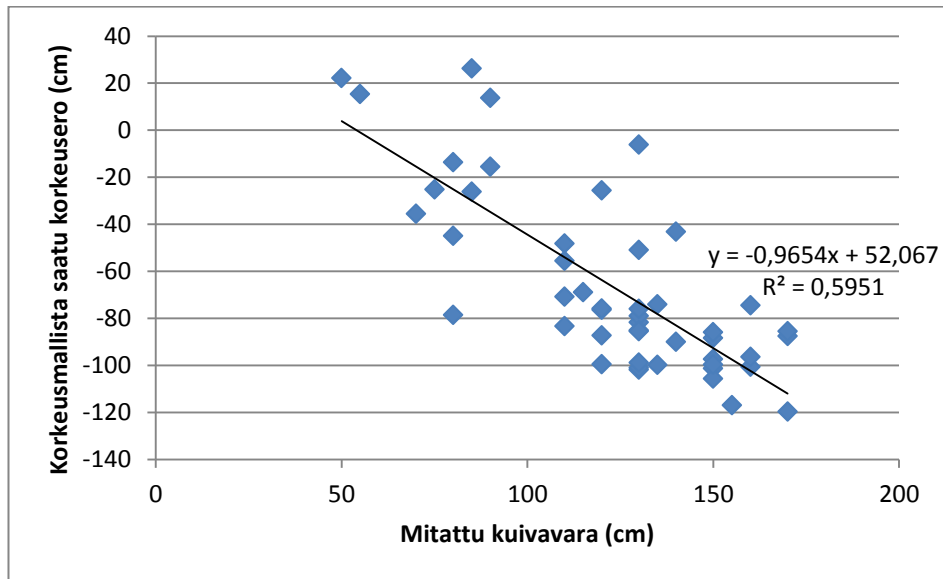
Taulukko 27. Regressiotunnusluvut (syvemmän ojan ja tienpinnan korkeusero kangasmaalla)

<i>Regressiotunnusluvut</i>	
Korrelaatiokerroin r	0,501
Selitysaste R <sup>2</sup>	0,251
Keskivirhe (MPa)	79,038
Havainnot	167

Taulukko 28. Regressiomallin kertoimet (syvemmän ojan ja tienpinnan korkeusero kangasmaalla)

	<i>Kertoimet</i>	<i>Keskivirhe</i>	<i>Alin 95,0%</i>	<i>Ylin 95,0%</i>
Vakio B	207,193	13,474	180,589	233,798
Keskiarvo k	1,330	0,179	0,977	1,682

## Regressioanalyysien tulokset



Kuvio 18. Mitatun ja korkeusmallista tutkitun kuivavaran riippuvuus.

Taulukko 29. Regressiotunnusluvut (Mitattu ja korkeusmallista saatu kuivavara)

<i>Regressiotunnusluvut</i>	
Korrelaatiokerroin	0,771
Selitysaste $R^2$	0,595
Keskivirhe (cm)	24,613
Havainnot	48

Taulukko 30. Regressiomallin kertoimet (Mitattu ja korkeusmallista saatu kuivavara)

	<i>Kertoimet</i>	<i>Keskivirhe</i>	<i>Alin 95,0%</i>	<i>Ylin 95,0%</i>
Vakio B	52,067	14,838	22,199	81,934
Kulmakerroin k	-0,965	0,117	-1,202	-0,729