

MEK100B Metsävarojen hallinnan perusteet, 3 op

Luento- ja harjoitusmoniste (versio 9.11.2017)

Ilkka Korpela

Tämä (jatkuvasti keskeneräinen) moniste ja siihen liittyvät verkkotehtävät pyrkivät edesauttamaan sitä, että HY:n metsätieteiden koulutusohjelman metsänarvioimistieteen perusteiden opiskelu sujuisi ja olisi motivoivaa. Moniste sisältää teoriaa ja esimerkkejä, ja alkaa suoraan esimerkeillä. Prujua päivitetään jatkuvasti kuten muuttuvia metsävaratietoja metsätietojärjestelmässä. Se on paikoitellen hyvinkin keskeneräinen. Oppikirja Silva Fennica 40 on suositeltavaa oheislukemistoa.

Osa tehtävistä lasketaan käsin, mutta tietokoneella tehtävät harjoitukset ja demonstraatiot pyrkivät havainnollistamaan ja aukaisemaan tilastotieteellisen ajattelun merkitystä metsänarvioimistieteessä (MARV).

Moniste on kirjoitettu s.e. sitä voi käyttää myös jatkokursseilla. Kussakin luvussa ja aliluvussa esitetään ensin perusteet ja perusteisiin liittyvät harjoitukset, esityksen jatkuessa syvemmälle jatkokurssien aiheisiin.

Teknisiä huomautuksia:

Desimaalierotin. Monisteessa käytetään pistettä desimaalierottimena, vaikka suositus on pilkku suomeksi kirjoitettaessa.

Contents

1. Johdanto.....	4
1.1 Puu – metsä – metsäalue.....	4
1.2 Mittauksia – Malleja – Otantaa	5
1.3 Metsänmittaaja kohtaa erilaisia toimeksiantoja.....	6
1.3.1 Metsän kasvu ympäristövaikutusten ilmentäjänä.....	6
1.3.2 Metsätalouden suunnitteluinventointi.....	9
1.3.3 Puiden mittaaminen ilmakuvilta ja laserkeilaushavainnoista, puu kerrallaan.....	12
1.3.4 Puuston mittaaminen laserkeilaushavainnoista pala metsää kerrallaan.....	15
1.3.5 Esimerkki - Kuinka paljon jäkälää?	17
Matematiikkaa ja Tilastotiedettä	18
Maplen lyhyt oppimäärä (Maple 2017)	18
Excelin vielä lyhyempi oppimäärä	18
Funktioista.....	19
Vektori ja matriisilaskentaa	23
Interpolointi, approksimointi.....	25
Symboleja.....	26
Muunnoksia ym.....	26
Tilastotiedettä.....	27
Havaintoaineiston kuvailu.....	27
Yhteisvaihtelu	28
Spatiaalinen tilastotiede.....	30
Otanta.....	32
Kyselytutkimusesimerkki (otanta)	32
Metsäesimerkki (otanta)	32
Tilastolliset mallit.....	34
Lineaarinen ja epälineaarinen regressioanalyysi	35
Maanmittausta ja kaukokartoitusta.....	41
Perusteita.....	41
Koordinaatit ja paikantaminen.....	41
Puun paikantaminen maastossa paikallisesti	42
Satelliittipaikannus (GNSS)	43
ETRS-TM35FIN taso(kartta)koordinaattijärjestelmä	44
Karttaprojektio	44
Korkeusmalli	44
Kaukokartoitus	48
Ilmakuvaus	50
Laserkeilaus	58
Puu ja sen tunnuksien.....	63
Puiden morfologiasta ja toiminnasta	63
Puutunnuksien.....	64
Syntypiste.....	65
Pituus, latva, latvus, latvustunnuksien.....	65
Rungon koko, muoto, laatu, arvo ja tilavuus	66
Pystypuun apteeraus, runkokäyrä	66
Tilavuusyhtälöt.....	70
Puutunnusten mittaaminen	71
Rungon läpimitta tai ympärysmitta	71
Pituus	73
Latvuksen leveys.....	75
Puun pituuskasvu	76
Rungon paksuus- ja pohjapinta-alan kasvu	76
Runkoanalyysi.....	77
Kuori.....	78
Lehtimassa ja -ala.....	78
Puun ikä	78
Biomassamittaukset	79
Puutunnusten kasvu (kasvuun liittyvät käsitteet).....	79
Puustotunnuksien.....	81

Puustotunnusten kasvu	81
Puustotunnusten mittaaminen ja johtaminen	82
Vaihtoehto a) – Puustotunnukset puutunnuksin	82
a.1. Tavoitteena kantoraha-arvo: Mitataan kaikki puut ja tarvittavat tunnuksat määräalaista koealaa käyttäen.	82
a.2. Tavoitteena kantoraha-arvo: Mitataan tarkentavia puutunnuksia vain osasta puita	85
Koealatyytit: määrälainen ja muuttuvalainen.....	86
Vaihtoehto b) - puustotunnukset puustotunnuksin ja puustotunnusmallein	88
Lisäesimerkki puustotunnusten määrittämisestä puutunnuksin eli vaihtoehto a)	89
Kasvupaikan kuvaus ja boniteetti.....	91
Metsäalueen tunnuksat.....	94
Inventointimenetelmät	94
Suomen VMI, Valtakunnan metsien inventointi	94
Aluepohjainen laserkeilausinventointi.....	94
Kuvioittainen arviointi	99
Täysluku	99
Systemaattinen koeala-arviointi	99
Metsäsuunnittelu.....	99
Metsäsuunnittelujärjestelmä pähkinäkuoressa	100

1. Johdanto

Puun, metsän ja metsäalueen ominaisuuksien mittaaminen ja kuvaaminen ovat metsäammattilaisen ydinosaamista. Tehävä pyritään aina suorittamaan tarkoituksenmukaisesti (ymmärrystä käyttäen), kustannustehokkaasti ja saadulle tiedolle pyritään aina antamaan luotettavuusarvio, tai milloin ei voida, todetaan sekin. Toiminnalle on aina jokin syy ja metsänmittaus voikin palvella varsin monenlaista päätöksentekoa ja kysymyksenasettelua. Johdannon myöhemmissä aliluvuissa kuvataan joukko esimerkitapauksia.

1.1 Puu – metsä – metsäalue

Kurssilla on lähestymistapa, jossa yksittäinen puu ja sen tunukset ovat keskeisessä asemassa metsää mitattaessa ja metsän ominaisuuksia kuvattaessa - onhan metsä äärellinen joukko puita. 'Metsänarvioimistieteen puu' ei kuitenkaan aina ole sama asia kuin puuyksilö - esimerkkinä olkoot haapakloonit ja -metsiköt, joissa puu vastaa käsitteenä yksittäistä runkoa. Sama tulee vastaan kasvitieteessä kasvustoja inventoitaessa: Usein puhutaan "kasvupaikalla tavatuista versoista" yksilöiden sijaan. Metsänmittaajakin puhuu runkoluvusta, ei yksilömäärästä.

Puu edustaa puulajiaan ja sillä on oma genominsa. Pohjois-Suomen metsäkuuset ovat rakenteeltaan ja ekologiaaltaan erilaisia verrattuna Etelä-Suomen tai Baijerin metsäkuusiin. Mm. tästä johtuen kuusikot ovat erilaisia näissä kolkissa. Tällä on heijastusvaikutuksensa metsänarviointiin - metsäkuusien ja -kuusikoiden rakennetta ja toimintaa kuvaavat mallit (esim. rungon tilavuuden johtaminen rungon läpimitasta 1.3 m korkeudella, puuston vaste lannoitukseen tai vaikka ns. relaskoopitaulukot) ovat usein paikallisia, kun vaaditaan suurta tarkkuutta. Puu kasvaa alati muuttuvassa **ympäristössä** ja sillä on **toimintaa** ja **rakenne**. Näiden kolmen välillä vallitsee jatkuva vuorovaikutus: kasvu on toimintaa, joka muuttaa rakennetta, joka muuttaa toimintaa ja ympäristöä (esim. valo- ja lämpöolosuhteet maanpinnalla muuttuvat latvuston sulkeutuessa). Suomessa puut elävät pitkään ja tukkirungon kasvataminen voi kestää 80–120 vuotta. Tämä poikkeaa peltokasvien viljelystä, jossa tuotantokasvia vaihdetaan lyhyellä varotusajalla suhdanteidenkin mukaan, hyödynnäen kasvinjalostuksen edut. Toki [metsänjalostus](#) on alkanut näkyä jo Suomen metsissä.

Puista ollaan kiinnostuneita, koska niillä on arvoa, jota luo kysyntä. Agroforest -viljelyssä puiden rooli voi olla (typensitojat) maanparannus, vesiensuojelu, polttopuun tuotanto jne. Plantaasiviljelmillä pyritään kasvuolosuhteet usein optimoimaan runkopuun tuotoksen (m3, kg) maksimoimiseksi. Tällöin käytetään klooneja, lannoitetaan muokattu maa tarkan analyysin perusteella ja optimoidaan puiden tilajärjestys sellaiseksi, että maksimaalinen määrä fotosynteesittisesti aktiivisesta auringon säteilystä (PAR) "muuttuu lopulta puuainekseksi". Puiden [jälsisolukon](#) toiminta "sitoo" puuainekseen hiiltä, ja jos rungot jalostetaan pitkäkestoisiksi tuotteiksi, on puu arvokas hiilensitoja. Palanut puu voi olla arvokas biodiversiteetin kannalta kuten maapuuna lahoava runkokin. Joku istuttaa kuusiaidan näkösuojaksi. Perinteinen "metsämies" ajattelee puutavaralajimenetelmää ja näkee puissa nykyisiä ja tulevia eri puutavaralajien pöllejä, "tai tähän ajanhetkeen diskontattuja euroja. Metsänmittauksen kannalta on

toissijaista, missä muodossa puu onkin tai mikä on toimeksiantajan motivaatio, vaikka vanha sanonta "markka on metsänmittaajan konsultti" pätee edelleen. Oleellista on kyetä hahmottamaan annettuun tehtävään järkevä ratkaisu ole-massa olevan ja uuden tiedon varassa. Tässä monisteessa pääkatsantokanta (toimeksiantajan motivaatio) on kuitenkin suomalainen metsätalous ja sen tietotarpeet, josta voi sitten laajentaa eri tarpeisiin.

Puut kasvavat metsässä. Metsänarvioijat ovat pysyneet pitkälti poissa taajamista, mutta osaamista riittää kyllä sinnekin niin halutessamme - arboristin tueksi. Korkkitammikossa tai katujen varsilla yksittäiset puut voivat olla hyvinkin arvokkaita ja kasvatus vaativaa sekä pitkäjänteistä. Niistäkin tarvitaan tietoa kasvatuksen tueksi. Metsässä kiinnostus kohdistuu puujoukkoihin, metsiköihin tai metsikkökuvioihin, joita usein tarkoituksellisesti käsitellään ja kasvatetaan. Myös metsikön tasolla vallitsee **ympäristö-toiminta-rakenne -kytkentä**. Metsänkasvatuksen tavoitteena on ensi sijassa "haluttu rakenne" - eukalyptus plantaasilla tasainen puusto, joka kasvaa maksimaalisen hyvin, keskiarvona yli 30 m3 runkopuuta hehtaaria ja vuotta kohden ja joka uudistetaan heti, kun keskimääräinen kasvu alkaa hiipua, yleensä 5-8 vuoden iällä. Rungoista tehdään sellua. Biodiversiteettiä tai monitavoitteista metsänomistajaa huomioiva metsänhoito voi pyrkiä kohti aivan toisenlaista puuston rakennetta. Ympäristöolosuhteisiin (esim. kasvupaikan laatu) voidaan vaikuttaa eri tavoin metsänkasvatuksessa, ja koska ne ovat tärkeä komponentti, pyritään ne siksi kuvaamaan tarkasti metsänmittauksessa. Plantaasiviljelmällä tavoitellaan kasvualustan tasaisuutta, kun taas suomalaisessa metsänhoidossa pyritään huomioimaan kasvupaikalle sopiva puulaji, sekä tarvittaessa ojitetaan tai lannoitetaan, jos siten saavutetaan järkeviä tuottoja. Kasvupaikan ominaisuudet määrittelevätkin pitkälle suomalaisten metsien metsikkörakenteen, koska ne huomioidaan metsänhoidossa tai muuten muokkaavat puustoa kasvupaikalle ominaiseksi. Metsänmittaajan tehtävä on monesti saada selville puuston rakenne ja vallitsevat ympäristöolosuhteet, jotta nähdään, missä mennään tavoitteiden suhteen ja osataan toisaalta ennustaa puuston kehitystä ja päätellä oikeat toimenpiteet. Olosuhdekartoitus voi kuitenkin olla muutakin kuin puiden kasvun kannalta oleellisten (kasvupaikatekijät, ilmasto) seikkojen selvittäminen - siihen voi kuulua esim. puunkorjuun kannalta merkityksellisten seikkojen kuvaus tai monimuotoisuuden arviointi. Metsänmittaus on siis hyvin monipuolista.

Kahden-kolmen hehtaarin metsikössä voi kasvaa tuhansia puita. Metsiköiden sisällä on usein vaihtelua. Painanteissa voi maaperä olla soistunutta, puut pienempiä tai puulajit märekyttä sietäviä. Maaperän kasvuolosuhteet vaihtelevat metsiköiden sisällä, ellei kyseessä ole esimerkiksi hiekkakangas. Puita voi paikoitellen kasvaa tiheämmässä esimerkiksi aiempien tuhojen takia. Tämänkin vaihtelun vallitessa, pyrkii metsänmittaaja tuottamaan metsikölle tiedot, joille hän osaa antaa luotettavuusarvion, samalla tavoin kuin Gallup-tutkimusten tuloksissa. Nämä tiedot menevät metsätietojärjestelmään päätöksenteon tueksi. Tietojärjestelmä voi olla tietokoneella, papeilla tai metsänomistajan päässä. Tiedonkeruu ei kuitenkaan ole ilmaista. Samalla on hyvä tiedostaa, että Suomen olosuhteissa metsikön puustolla ei ole myyntiarvoa, kuin vasta 25-40 vuoden iällä. Siihen asti metsänhoito ja metsätiedon

keruu tuottavat yksinomaan kustannuksia. Tiedetään, että metsien kasvun keskiarvo on noin [5 m³/ha/a Suomessa](#). Se vastaa noin 150 € vuotuista hehtaarikohtaista tuottoa huomioimatta verotusta. Tunti ammattilaisen maastotyötä maksaa 20–40€. On selvää, ettei mittaamiseen voida turhan usein ryhtyä, eikä kaikkea voida mitata, kuten ei Gallup-tutkimukseenkaan voida kaikkia haastatella. Mm. tästä seuraa (otanta) epävarmuutta, jonka hallitseminen on keskeinen asia metsänmittauksessa. Mittausten tulee maksaa itsensä hyötyinä. Muuten hommassa ei ole järkeä. *”We don’t know what we measure but we do it with great pleasure”*.

Metsiköt muodostavat metsäalueita, metsäsaarekkeitä, metsä- ja maatilojen, kuntien, kaupunkien ja muiden hallinnollisten ja maantieteellisten alueiden metsäkokonaisuuksia. Laajimmillaan puhutaan maailman metsistä. Suomessa (ja esim. Ranskassa) on harvinainen metsänomistajarakenne, kun meillä on paljon yksityismetsänomistajia ja heidän osaa misensa, aktiivisuutensa ja tavoitteet vaihtelevat enemmän kuin tilanteessa, jossa valtio tai suuryritykset omistavat ja hallinnoivat laajoja metsäalueita, ja työstä vastaavat ammatillaiset. Pienmetsänomistaja ei ehkä ole taloudellisesti riippuvainen metsän tuotosta, kun taas metsäteollisuusyrityksen metsäomaisuus on tärkeä puskuri puumarkkinoiden kysyntä- ja tarjontatilanteen vaihteluihin. Puuta ostava taho hyötyy, jos tarkkaa metsävaratietoa on saatavilla, jolloin hankintaa voidaan kohdentaa tiettyihin alueisiin ja omistajiin, joiden puuston ominaisuudet ovat optimaaliset. Puuta myyvä taho hyötyy tarkasta tiedosta esim. siten, että myyntiin voidaan laittaa huonosti tuottavia kohteita, ’laiskaa pääomaa’. Pitkään kerättyjen tietojen avulla voi metsänomistaja päätellä, millainen metsänhoito tilan metsissä onnistuu, kuinka investoinnit kannattivat jne. Koko valtakunnan ja suuralueiden metsävarojen seuranta ja ennustaminen ovat tärkeitä kansantalouden näkökulmasta. Metsä- ja ympäristöpolitiikkaa voidaan ohjata tiedon avulla. Suomessa yhteiskunta on satsannut (tulonsiirrot) metsätalouden infrastruktuuriin – ja metsävaratiedon sekä metsätalouden toiminnan tilastoinnin avulla voidaan tehdä päätelmiä toimien vaikuttavuudesta – myös suojelutoimien. Ilman tarkkaa suuraluetason tietoa ei voida tehdä kestäviä investointipäätöksiä, jollei voida varmuudella sanoa, toimiiko puuhuolto rakenteilla olevaan tuotantolaitokseen. Edellä huomio oli markkinapuussa, mutta inventoinneilla voidaan samaan aikaan selvittää esim. hyönteistuhojen laajuutta, [pintakasvillisuuden lajiston muutoksia](#), metsänomistajien aktiivisuutta, metsien hoidollista tilaa, tiestön tai ojitusalueiden kuntoa, jne. Tämä tekee metsänmittauksesta kiehtovaa ja liittyy oppiaineen ekologiaan, teknologiaan sekä talous- ja yhteiskuntatieteisiin.

Maailman metsien tilan nopea arviointi edellyttää tuhansien satelliittikuvien tulkintaa. Kaukokartoitus onkin tärkeä havaintoväline metsänmittauksessa, myös pienemmillä alueilla. Sen avulla säästetään maastotöitä, ja saadaan arvioita puustosta myös niiltä alueilta, joissa ei maastossa pystytty käymään. Kaukokartoitus liittyy oppiaineen teknisiin ja matemaattisiin tieteisiin, siinä missä estimaattien luotettavuuden arvioinnissa saa soveltaa tilastotiedettä.

1.2 Mittauksia – Malleja – Otantaa

Metsänmittauksessa on **aina** identifioitavissa otsikon kolme komponenttia: **mittaukset**, **mallit** ja **otanta**.

Niiden kombinaatioita on määritettävissä miltei rajaton määrä, mutta tärkeintä on osata tunnistaa ne ja niiden merkitys tulosten tarkkuuteen ja kustannuksiin.

Mittauksia voidaan tehdä maastossa ja/tai kaukokartoitusinstrumentein, tai niiden yhdistelmänä. Maastotyö on kallista, samoin matalalta lentäminen ja kuvaaminen. ”Tyhmä mittaa paljon, viisas pääsee vähemmällä”.

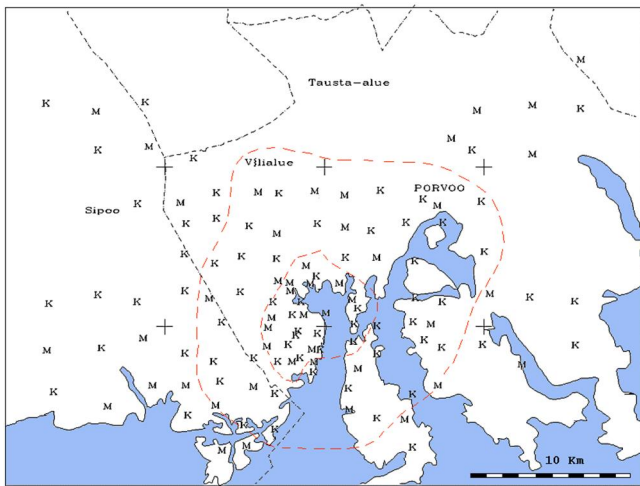
Malleja on erilaisia. Malleilla tarkoitetaan jonkun metsää koskevan tunnuksen johtamista epäsuorasti matemaattisesti, mittaamatta itse tunnusta suoraan. Esimerkkeinä olkoon puuston lehtialaindeksin mittaaminen kalansilmäkameralla otetusta pystykuvasta tai puun rungon tilavuuden (m³) johtaminen yhtälöllä, jolla tilavuuden saa arvioitua rungon läpimitan (cm) ja pituuden (m) avulla. Vielä epäsuorempi on mallin kuvaama matemaattinen yhteys puuston runkotilavuuden ja satelliittikuvan pikselin sävyarvon välillä. Mallin käyttäminen sitoo usein myös mittauksia – on mitattava niitä tunnuksia, joita mallit vaativat – tai laadittava uudet mallit. Malleilla laskettaessa otetaan aina riski siitä, ettei mallin antama tulos ole sopusoinnussa todellisuuden kanssa. **Otanta** on sitä, ettei kaikkia puita tai metsäalueen osia voida sisällyttää havaintoaineistoon, kuten ei kaikkia kansalaisia voida haastatella kuin vaaleissa, jotka sitten maksavatkin paljon. Otantaa käytettäessä otetaan riski siitä, että tutkittavana olevasta metsästä ei saatu oikeaa kuvaa, koska näyte (otos) painottui väärin.

1.3 Metsänmittaaja kohtaa erilaisia toimeksiantoja

Tässä luvussa esitellään esimerkkien avulla metsänmittausta.

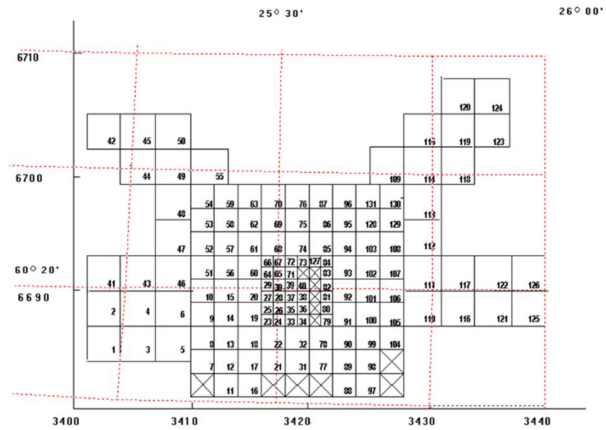
1.3.1 Metsän kasvu ympäristövaikutusten ilmentäjänä

Monisteen kirjoittajan selkein omakohtainen kokemus inventointityöstä sijoittuu vuosiin 1991-92, kun Itä-Uudellamaalla oli noussut huoli silloisen Neste Oy:n Sköldvikin öljynjalostamon aiheuttamista vaikutuksista ympäristön metsiin, ja erityisesti metsien kasvuun. Jalostamon toiminta ja erityisesti rikkidioksidipäästöt olivat olleet suuria koko 1970- ja 80-lukujen, ja alueella tehtyt bioindikaattori-inventoinnit osoittivat vaikutuksia. Selkeä tavoite inventoinnille kuului: ”selvitäkää, onko jalostamolla vaikutusta puiden kasvuun – maanomistajat ovat huolissaan – aikeissa nostaa kanteen”.



Kuva 1. Kartta alueesta vuodelta 1991. Rantaviiva ja kunnanrajat on piirretty ison digitointipöydän avulla paperikartalta. ”M” ja ”K” merkitsevät näytealoja, joiden pääpuulaji on mänty tai kuusi. Niiden koordinaatit mitattiin paperikartalta, ja lisättiin käsin HP-GL kieliseen ASCII tiedostoon (<https://en.wikipedia.org/wiki/HP-GL>), jolla pystyi ohjaamaan kynäplotteria, jolla kartan viivoineen sai aikaiseksi – paperille. Vesi värjättiin käsin paperikartalle, joka teipattiin karttaa varten varattuun kohtaan A4-tulostetta ennen kopiokoneella kopioimista.

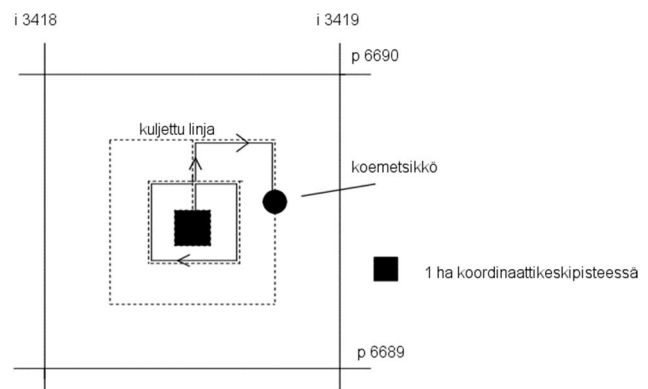
Metsän kasvun inventointi oli tehtävä objektiivisesti, jotta tuloksiin ja tekijöihin saattoivat luottaa niin metsänomistajat, kunnat kuin jalostamoyhtiö puhumattakaan tutkijoista itsestään. Aikaa 90-luvun alussa kuvaa mm. se, että ympäristöministeriö oli ollut toiminnassa vasta kahdeksan vuotta, ja yritysten toiminnan, viranomaisten lupamenettelyn ja teollisen toiminnan vaikutusten arviointi oli kohtalaisen uutta kansalaisille. Toimeksiantajia olivat sekä kunnat että yhtiö, minkä senkin katsottiin olevan yleistä luottamusta herättävää, niissä rajoissa, kun viranomaistoimintaan ylipäänsä luotettiin ympäristöasioissa.



Kuva 2. Alueen maantieteellinen jako (ositus) 1, 4 ja 9 km² ruutuihin.

Kuten yleistä on, suunnittelu alkoi kiinteällä budjetilla. Toimeksiantajilta saatiin tietty summa (250.000 mk) rahaa, jonka varaan mittaukset ja tulosten laskenta tuli rakentaa. Toinen ja toteutuksellisesti paljon haastavampi vaihtoehto olisi saada toimeksianto, jossa ensisijaisesti määritellään tuloksille vaadittu luotettavuus, jonka jälkeen suunnitellaan käytännön toimet minimibudjetilla, joka esitetään rahoittajalle.

Metsänmittaustehtävän (inventointi-) suunnittelussa keskeinen alkuvaiheen osa on olemassa olevan tiedon keruu ja analyysi. Tätä olivat Porvoossa vanhat kirjastoista löytyneet bioindikaattoriselvitykset, metsä- ja päästökartat, paperiset ilma- ja satelliittikuvat, maanomistajatiedot, samankaltaiset toisaalla tehtyt inventoinnit ja niistä saadut kokemukset jne. Näiden avulla pääsi karkeasti selvälle, minkälaisia alueen metsät ovat, missä on mäntykankaita, missä taas savikoita ja talvikkityypin kuusikoita. Aiempi kokemus auttaa selvittämään, kauanko kestää siirtyä paikasta toiseen mittaamaan metsää, ja kuinka kauan yhden näytealan perustaminen ja puiden mittaaminen kestävät. Aluehan oli melko laaja (Kuva 1). Lännessä vastaan tuli Helsinki ilmanpäästövaikutuksineen. Päästöjen tiedettiin toisaalta vaikuttavan pääosin itään ja koilliseen. Siksi koelaverkkoa ulotettiin näissä suunnissa pidemmälle (Kuva 2).



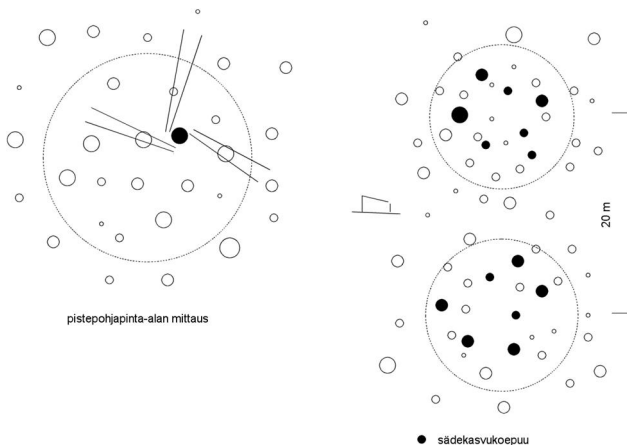
Kuva 3. Menettely koelan löytämiseksi systemaattisella linja-arvioinnilla.

Otantaan kuuluu se, ettei mittaaja vaikuta siihen, mikä alkio populaatiosta tulee valituksi mittaukseen (tai kyselytutkimukseen). Tällöin voidaan luottaa siihen, että tuloksissa ei ole

ainakaan "valintaharhaa", jota valitettavan usein esiintyy erilaisissa tutkimuksissa. ([Selection bias](#)).

Metsänmittauksessa valintaharhaa voisi kertyä esim. siitä, että mittaajat välttelevät hankalia puustoisia kohteita. Porvoon tutkimuksessa näytealat, josta puita valittiin mitattavaksi, valittiin systemaattisesti 1, 4 ja 9 km² ruutujen (Kuva 2) keskipisteestä lähtien. Mikäli ruudun keskipisteen ympärillä 1 ha alueella oli sopivaa metsää (puhdasta männikköä tai kuusikkoa tietyllä kasvupaikkatyypillä, hakkaamatta edelliset 10 vuotta), se tuli valituksi, muuten kuljettiin linjaa, kunnes ensimmäinen kriteerit täyttävä puusto vastaan (Kuva 3).

Rajaamalla kasvupaikkatyyppiä, sallien vain osan, saatettiin rajata puiden kasvun luontaista vaihtelua, jolloin pienemmät ilmansaastevaikutukset näkyisivät kasvumuutoksina, kun aineistossa ei olisi kasvupaikasta johtuvaa vaihtelua. Toisaalta näin menetellen voi ottaa riskin (kts. Edellä, Selection bias), jos ilmansaasteiden vaikutukset näkyvät esimerkiksi vain kalliometsissä. Hakkuista myös aiheutuu kasvunvaihtelua, kun harvennus parantaa yksittäisen jäävän puun olosuhteita. Siksi tehtiin rajaaminen hakkuidenkin suhteen. Lehtipuita taas ei haluttu mukaan, koska niiden kasvun mittaaminen vuosilustonäytteestä on työlästä, koska vuosilustot näkyvät huonosti. Havupuiden myös ajateltiin olevan saasteiden vaikutuksille alttiimpia.



Kuva 4. Ympyräkoelan luku- ja kasvukoepuut. Sädekasvukoepuista otettiin ikäkairalla vuosilustonäyte. Puuston tiheys vaikuttaa yhden puun kasvuun, ja tätä vaikutusta eliminoimaan mitattiin kunkin puun ympäriltä "pistepohjapinta-ala" leveähahloisella relaskoopilla.

Kun sopiva metsikkö oli löydetty, se mitattiin myöhemmin lähestymällä arvotusta suunnasta arvottu matka. Metsikköön mitattiin kahden ympyrän (koeala, näyteala) ryväs (koealapari), joiden keskipisteet paikannettiin suuntimalla ja etäisyydellä useampaan maastomerkkiin (yleensä kiviä), jotta ne ja puut löytyisivät uudelleen, mikäli tuloksiin kohdistuisi epäilyjä tai joku haluaisi mitata ne myöhemmin uudelleen seurantamielessä. Mitattaessa puut myös kartoitettiin napakoordinaatistossa mittaamalla suunta ja etäisyys koealan keskipisteestä puuhun. Metsänmittaustermein koealat perustettiin "pysyvinä".

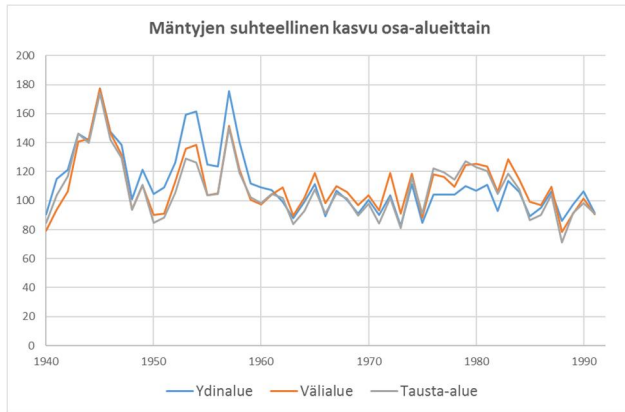
Metsätieto on paikkatietoa. Vuonna 1991 se oli pääosin epätarkkaa nykymahdollisuuksiin verrattuna, tarkimmillaankin

vain 10-20 m, koska näytealan (yleisemmin mittajaan) paikannus perustui paperikarttoihin. Puukartan sentään sai desimetritarkkuudella, kun mittasi huolellisesti kompassilla-/suuntakehällä suunnan ja etäisyyden mittanauhalla. Puukartan tarkkaa paikkaa kartalla ei kuitenkaan saanut selville kuin em. 10-20 m tarkkuudella. Siksi tehtiin peitepiirroksia maaston muodoista, kivistä ja kallioista tai lyötiin maahan paalu keskipisteen tai lähestymispisteen merkiksi. Muutamien metrien tarkkuuden GPS-laitteet yleistyivät vasta 1990-luvun lopulla.

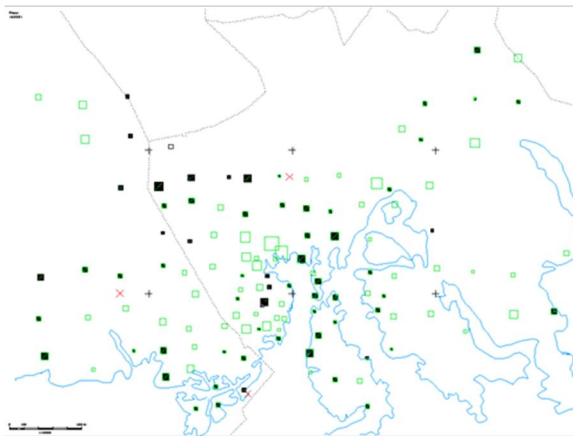
Tutkimuksessa haluttiin selvittää puiden kasvua Sköldvikin öljynjalostamon ympäristössä. Puurunkojen kasvu on jälsolukon tuottamia vuosirenkaita. Toki oksa- ja juuristomassakin kasvavat, mutta näistä ei saa havaintoja kuin kaatamalla puun. Vuosirenkaista pystyy kairamaan näytteen, josta voi laskea puun iän ja kunkin vuoden luston leveyden. Puun rungon paksuuskasvussa on länmukainen trendi ([nousee - saavuttaa taitepisteen - laskee](#)), johon sääolot, siementuotanto, lannoitukset, hakkuut, hyönteistuhot ym. aiheuttavat vaihtelua. Kasvun tasoon puolestaan vaikuttaa puuston tiheys – kun puita on paljon, yksittäiset puut kasvavat vähemmän. Tasoon vaikuttaa myös kasvupaikan laatu, mutta tätä vaihtelua oli siis tutkimuksessa pyritty eliminoimaan rajaamalla kohdemetsät tiettyihin kasvupaikkoihin. Tutkimuksessa kairattiin näyte yli 1500 puusta. Kunkin puun vuosilustoja verrattiin toisiinsa huomioimalla puun iän ja/tai puuston tiheyden vaikutus kyseisen puun lähiympäristössä (malli, joka huomioi nämä seikat). Tämä jälkeen tarkasteltiin ovatko eri ajanjaksoina 1950–1991 puut kasvaneet, suhteellisesti, eri tavalla eri osissa tutkimusaluetta. Puista havaittiin myös jäkälää, latvusten harsuuntumista, runkojen vikoja, näkyviä hyönteistuhon jne. ja näistä saatuja tuloksia voitiin verrata eri etäisyydellä jalostamolta. Tulosten perusteella ei löydetty puiden kasvussa merkittäviä eroja jalostamon lähellä ja kauempana kasvaneiden puiden välillä. Keskustelu kasvutappioista loppui ja metsät Porvoon seudulla ovat kasvaneet normaalisti senkin jälkeen. Pahimmat yksittäiset kasvuvaihtelut havaittiin lähellä kalkkikaivosta Sipoon Kalkkirannassa, missä kalkkipölyn takia kuusikoiden kasvu oli tyrehtynyt ja puut olivat huonokuntoisia, mahdollisesti ravinne-epätasapainon takia. Sittenkin Kalkkirannan puut ovat kasvaneet paremmin kalkkipölyn leviämisen loputtua, mutta [lähialueen kasvillisuus](#) on edelleen mielenkiintoista vuosikymmenten kalkkilannoituksen ansioista. Kaiken kaikkiaan tutkimusalueen kuusista 20% oli [tyvilahon](#) vikuuttamia, mikä on rannikkoalueelle tyypillistä.

Tässä puiden kasvun inventointitutkimuksessa **tehtiin mitauksia, käytettiin malleja ja sovellettiin otantaa** eli asetelmasta löytyvät nuo kolme komponenttia. Koealoilla **mitattiin** puista puulaji, rungon läpimitta, puun pituus, kairattiin vuosilustonäyte, joka mitattiin myöhemmin mikroskoopilla, arvioitiin runkojäkälää ja latvuksen kuntoa. Kasvunvaihtelua tasoitettiin iän ja metsikön puuston määrän suhteen **tilastollisilla malleilla**, ja poikkeamat mallin ennusteista olivat mielenkiinnon kohteena – missä ovat hyvin ja missä huonosti kasvaneet puut suhteessa jalostamon sijaintiin. **(otanta):** Kaikista koealoille osuneista puista ei mitattu pituutta tai kairattu kasvua, jotka ovat hitaita mitata, vaan otannalla valittiin osa metsikön puista koepuiksi, tarkempiin analyyseihin. Koealojen paikat valittiin systemaattisella,

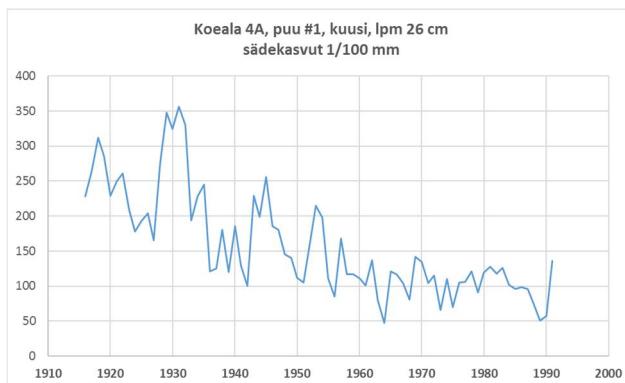
ositetulla otannalla, käyttäen karttaruutuja, linjoja ja tiukkoja sääntöjä metsäositteille, joista oltiin kiinnostuneita.



Kuva 5. Mäntyjen kasvussa havaittiin taantumaa lähellä jalostamoa noin vuosina 1975–1982.



Kuva 6. 1987-1991 kasvuntason poikkeamat eri koealoilla. Tummat ruudut vastaan alhaista kasvua.



Kuva 7. Rungon sädekasvun vuositasen vaihtelua. Läpimitan kasvu saadaan kertomalla sädekasvu kahdella.

Tästä tuli gradu. Metsäylioppilailta oli vuonna 1991 käytössään muutamia mikrotietokoneita, joilla saattoi kirjoittaa gradunsa puhtaaksi Viikissä ja Metsätalolla (koneille oli jonotuslistat, aikaa oli muutama tunti korkeintaan per päivä, ohjelma oli WordPerfect 4.1) ja tulostaa laserkirjoittimelle. Kuvat tulostettiin erikseen, niitä ei tavallisesti nähnyt päätteeltä, vaan paperitulosteen perusteella kuvaa yritettiin korjata ohjaustiedostoa muuttamalla. Tulostettu kuva liitettiin käsin tekstitulosteeseen. Analyysit tehtiin VAX keskustietokoneella. Metsänarvioimistieteen laitoksella sekä Viikin

B-talon kellarissa olivat päätesalit, joissa oli rivikirjoitin sekä ”tyhmiä” [päätteitä](#), jotka näyttivät noin 25 x 80 teksterin rivejä. Salissa oli myös puhelin, jolla saattoi soittaa Vallilaan ja pyytää oman nauhan asentamista nauha-asemaan, jotta pystyi lukemaan ja kirjoittamaan tiedostoja, kun henkilökohtainen kovalevylevykiintiö täyttyi niin helpolla. Tiedoston siirto VAX:lta PC:lle oli kiemuraista. Tarvittiin [kermit](#). VAXilla toimivat SAS ja BMDP tilasto-ohjelmat sekä C- ja Fortran-kieliset ohjelmointympäristöt. Eiku-näppäintä ei ollut. Oli tavallista, että metsäylioppilaat suorittivat Vallilassa tietojenkäsittelyn kurssija, moni aina cumu-tasolle asti. Alla esimerkki Sköldvikin tutkimukseen tarvittusta Fortran-ohjelmasta. Samojen temppujen tekeminen nykyisillä Excel-ohjelmaversioilla olisi ollut ”unelma”.

```
c ohjelma muuntaa for010.dat lustodatan for011.dat tiedostoksi, jossa
c ikä, vuosi, lustonleveys, koeala, puunnumero, puulaji ja aluekoodi
character*10 x(500)
character*50 apu
character*4 koea,puuno
dimension aluey(26) aluev(50) aluet(46)
dimension plajim(49) plajik(73)
data aluey/23,26,28,30,32,33,36,37,38,64,71,73,80,81,82,24,27,
*29,35,39,40,65,67,72,83,127/
data aluev/13,14,15,17,19,21,22,57,60,61,62,68,70,75,78,85,89,
*91,92,95,96,99,100,101,102,103,105,107,112,128,129,131,12,18,
*25,34,56,63,66,69,74,76,77,79,86,87,94,104,106,130/
data aluet/1,4,7,9,41,42,43,44,46,48,50,51,52,53,55,58,59,97,
*110,113,114,117,120,121,122,123,2,3,5,6,8,11,16,45,49,54,98,
*109,111,115,116,118,119,124,125,126/
data plajim/2,3,5,6,8,11,12,16,18,24,25,27,29,34,35,39,40,45,49,
*54,56,63,65,66,67,69,72,74,76,77,79,83,86,87,94,98,104,106,109,
*111,115,116,118,119,124,125,126,127,130/
data plajik/1,4,7,9,13,14,15,17,19,21,22,23,26,28,30,32,33,36,
*37,38,41,42,43,44,46,48,50,51,52,53,55,57,58,59,60,61,62,64,68,
*70,71,73,75,78,80,81,82,85,89,91,92,95,96,97,99,100,101,102,
*103,105,107,110,112,113,114,117,120,121,122,123,128,129,131/
read(10,'(q,a)')ix,apu(1:ix)
1 read(10,'(q,a)',end=2)ix,apu(1:ix)
if(apu(1:3).eq.'# 3')then
koea=apu(5:min0(ix,8))
read(apu(5:ix-1),*)mets
do 12 i=1,26
12 if(mets.eq.aluey(i))iarea=1
do 13 i=1,50
13 if(mets.eq.aluev(i))iarea=2
do 14 i=1,46
14 if(mets.eq.aluet(i))iarea=3
do 15 i=1,49
15 if(mets.eq.plajim(i))ispec=1
do 16 i=1,73
16 if(mets.eq.plajik(i))ispec=2
end if
if(apu(1:3).eq.'# 4')puuno=apu(5:min0(ix,7))
if(apu(1:1).eq.'#') go to 1
if(apu(4:6).eq.'OCT') go to 1
if(apu(4:6).eq.'NOV') go to 1
if(apu(4:6).eq.'DEC') go to 1
if(apu(1:1).eq.'#')then
c tulostetaan edellinen puu
ika=n
iv=1992
do 10 i=1,n
iv=iv-1
ika=ika-1
write(11,'(2i5,a,1h,a,1h,a,1h,i2,i2)')ika,iv,x(i)(1:4),
*koea(1:4),puuno(1:4),ispec,iarea
10 continue
n=0
do 11 i=1,500
x(i)=' '
go to 1
end if
n=n+1
x(n)(1:ix)=apu(1:ix)
2 end
```


täen, s.e. kuviot olivat puustoltaan mahdollisimman homogeenisia, mutta myös kasvupaikka huomioitiin ja suot ja kan-
kaat erotettiin toisistaan. Suot näkyivät peruskartalla. Ilma-
kuvia tulkittiin niin tietokoneen ruudulta (digikuvat) kuin
stereoskoopin alla (paperivedokset), jolloin pinnanmuodot ja
puusto näkyi kolmiulotteisena (Kuva 12). Stereonäytöt olivat
vielä tuolloin erittäin harvinaisia ja kalliita, ja ovat sitä
edelleen (2017). Kuviointia tehtäessä saatiin myös selville,
onko kyseessä taimikko, kasvatusmetsä vai vanha metsä.
Myös puuston tiheydestä sai arvion. Mittauksille varattuun
(maastotyösuunnitelma) aikaan vaikutti puusto.



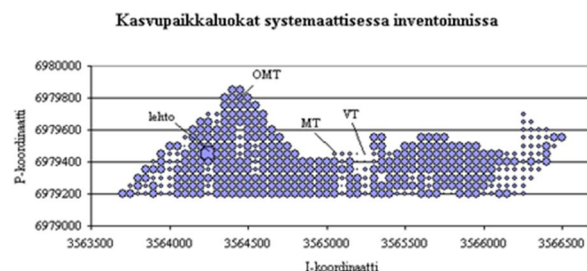
Kuva 12. Suurennoa ilmakuva. Kuvalla näkyy tuoreita hakkuualoja (turkoosi, jättöpuiden varjoja), ojitusalue (pohjoisessa), taimikoita (punaisia, puut eivät erotu), vanhaa metsää (vasen alaneljännes).

Näiden tietojen (ennakkokuvionnin) avulla opiskelijat pystyi-
vät suunnittelemaan maastoreitin kuvioita toiselle. Maastos-
sa tehtiin mittauksia, joilla kuvattiin kasvupaikkaa (metsän-
hoitoa varten, puuston kasvuvyvyn arviointi) sekä puustoa
(toimenpidetarpeen arviointi, hakkuupoistuman ja -tulojen
arviointi). Kuviolla pääteltiin myös metsänhoidollista toi-
menpidetarvetta (taimikonhoito, harvennus, pystykarsinta,
lannoitus, ojitus jne.) sekä tehtiin havaintoja muista kuin
puuntuotannollisista arvoista eli etsittiin lähteitä, merkkejä
metsäkanalinnuista, kulttuuriarvoista jne. Tässä
metsänmittausmenetelmässä (kuvioittainen arviointi) saa
mittaaja itse valita, mistä mittaa eli mihin sijoittaa näytealoja,
jotka kuvaavat metsikköä. Koska paikan valinta on subjek-
tiivinen, ei menetelmässä voida sanoa käytettävän otantaa,
johon satunnaistus kuuluu keskeisenä. Niinpä tuloksiin voi
jäää systemaattisia virheitä, jos mittaja suosi tai vältte-
levät, tai eivät osaa hahmottaa kuvion kokonaisuutta ja pai-
nottaa eri kohdista metsikköä otettuja näytealoja keskiarvoja
ja summia laskettaessa. Tästä syystä alueelle tehtiin myös ns.
systemaattinen koeala-arviointi, jossa näytealojen paikat
olivat 50 metrin välein, eli hehtaarilla (100 x 100 m) oli 4
näytealaa, ja koko tilalla yli 400 (Kuva 13).

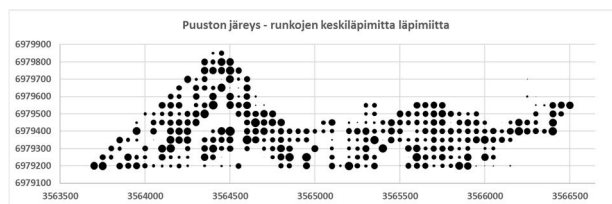
Koko valtakuntaa koskeva Valtakunnan metsien inventointi
(VMI) muistuttaa tilalle tehtyä systemaattista koeala-

arviointia, sillä poikkeuksella, että alue on suurempi ja
koealoja harvemmassa.

Kts. <http://www.metla.fi/ohjelma/vmi/info.htm>



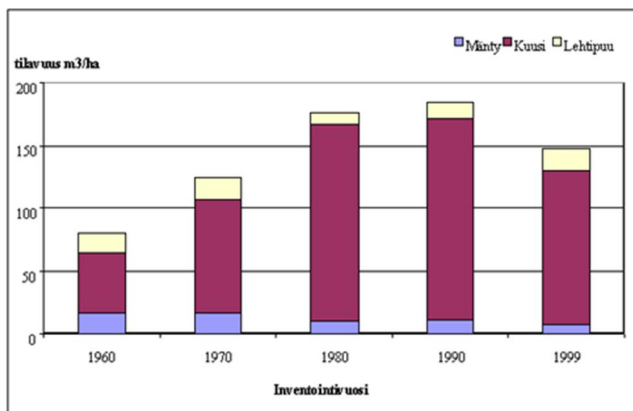
Kuva 13. Pohjois-Savolle tyypilliseen tapaan tilan metsät havaittiin
reheviksi systemaattisessa koeala-arvioinnissa, sillä käenkaali-mustik-
katyyppi (OMT) oli vallitseva ravinteisuustaso. Metsiä oli laidunnettu
vielä 1950-luvulla, ja vuoden 1989 mittajaat saivatkin nautiskella me-
simarjoista, jotka viihtyivät puustoltaan harvoissa rehevissä ja laidun-
netuissa metsissä. Vuonna 1999 mesimarjaa oli enää niukalti.



Kuva 14. Kun koealoja on tiheässä ja kuviot ovat riittävän suuria, näkee
myös koealakartasta "kuviorakenteen". Järein puuston keskiläpimitta
(1.3 m korkeudelta mitattu) oli 37.7 cm.

Tilalle osui 404 koealaa, ja kun jokaiselle määriteltiin mit-
tauksiin ja malleihin perustuen runkopuun tilavuus, hehtaari-
kohtaisena, saatiin kaikkien koealojen keskiarvoksi 147 m3
per hehtaari. Yksi koeala edusti pinta-alaa 50x50 m eli 0.25
hehtaaria. Tällöin tilan pinta-ala on noin 404 x 0.25 ha eli 101
hehtaaria ja puustoa kaikkiaan 101 ha x 147 m3/ha eli 14847
m3. Jos keskimääräisen puun kantohinta on noin 30 €/m3,
voi tästä johtaa puuston kokonaisarvon arvion, noin 440000
€. Koealojen tilavuusarvojen keskihajonta oli 120 m3/ha, ja
koska koealoja oli 404, saadaan keskitilavuudelle 67% luot-
tamusväliä kaavalla $120/\sqrt{404}$ eli 147 ± 6 m3/ha, mikä on
suhteellisen $\pm 4\%$. 95% todennäköisyydellä inventoinnilla
saatu keskitilavuus (147 m3/ha), on $\pm 8\%$ oikeasta (kaksi
keskihajontaa, tarkasti ottaen 1.96). Suomen metsien keski-
tilavuus on luokkaa 100 m3/ha, eli tila oli keskimääräistä
puustoisempi.

Yllä esitetty (systemaattisen) otannan tarkkuusarvio
(satunnaisotannan kaavalla) päti tietysti vain, jos mittajaat
eivät ole tehneet systemaattisia virheitä laitteita käyt-
täessään tai kirjatessaan arvoja, tai laskutoimituksissa ja las-
kelmissa tarvituissa malleissa ei ole järjestelmällisiä virheitä,
jotka johtavat tuloksia yli- tai aliarvioiksi. Näin voisi olla, jos
tilan puut ja metsät olisivat poikkeavia. Metsänmittauksessa
pyritään aina arvioimaan asiakkaalle annettujen estimaattien
luotettavuus.



Kuva 15. Metsäylioppilaiden laatimien metsäsuunnitelmien tuloksista voitiin johtaa puuston kokonaismäärän kehitys puulajeittain osaksi laadittua metsäsuunnitelmaa. Ne olivat saatavilla, koska vanhat suunnitelmat olivat paperimuodossa.

ikäluokka	mänty	kuusi	koivut	muut lehtipuut	yhteensä	tl osuus, %
0-10		1,46	14,09	2,68	18,23	0,12
10-20	9,38	82,01	58,92	32,19	182,50	1,22
20-30		305,37	56,60	26,46	388,43	2,60
30-40	71,10	601,76	298,50	77,13	1048,49	7,02
40-50	61,48	1658,02	421,72	32,94	2174,16	14,56
50-60	83,61	1836,52	233,24	0,00	2153,37	14,42
60-70	115,10	1635,15	245,15	4,06	1999,46	13,39
70-80	26,67	1643,05	159,35	3,60	1832,67	12,27
80-90	24,71	1491,70	23,74		1540,15	10,31
90-100	120,26	1690,77	54,98		1866,01	12,50
100-110	226,45	733,61	56,34		1016,40	6,81
110-120	46,99	292,09			339,08	2,27
120-130	5,78	235,01			240,79	1,61
130-140	9,31	53,41			62,72	0,42
140-150		70,56			70,56	0,47
yhteensä	800,84	12330,49	1622,63	179,06	14933,02	100,00

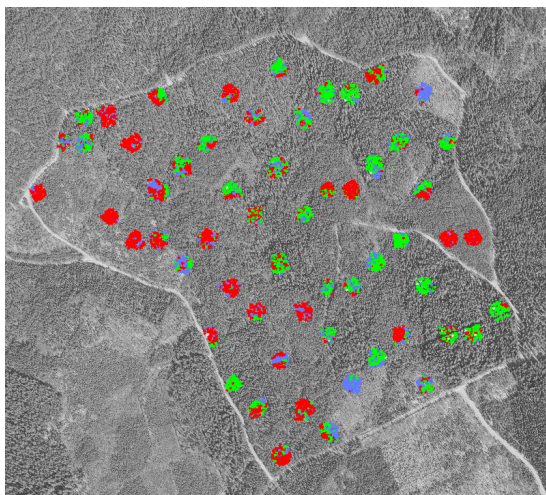
Kuva 16. Kuvioittaisen arvioinnin tuloksena saatiin kokonaistilavuuden arvioksi 14933 m³, mikä poikkeaa systemaattisen arvioinnin tuloksesta varsin vähän. Kun kuvion puustolle määritetään ikä ja muut tiedot puulajeittain, voidaan laatia kuvan mukainen taulukko, josta näkee, kuinka paljon minkäkin ikäistä puustoa tilalla on, runkojen tilavuutena (m³).

Opiskelijat tekivät tilalle kestäviä hakkuusuunnitelmia, ja saivat jakson 1999-2009 vuotuiseksi hakkuumääräksi noin 580 m³ ja vuosien 2009-2019 hakkuupoistumaksi 700 m³/a. Kuva 16 paljastaa syyn: vasta toisella jaksolla on runsaammin tarjolla yli 80-vuotiasta hakkuukypsää puustoa. Luvuista voi laskea vuotuiset kestävät hakkuutulot. Tilan pinta-ala huomioiden hakkuut ovat noin 5,8–7 m³ hehtaarille vuotta kohden. Käenkaalimustikkatyypillä keskimääräinen tuotos Pohjois-Savon ilmasto-oloissa on luokkaa 6 m³/ha/a eli siinä mielessä ehdotetut hakkuut ovat kestäviä, vaikka kunnollinen kestävyystarkastelu ei ole aivan näin yksinkertaista. Taulukoiden lisäksi omistajalle laadittu suunnitelma sisälsi kuviokarttoja, joilla havainnollistettiin tilan ominaisuuksia ja tehtyjä tie- ja ojitusinvestointi-, hoito- ja hakkuuehdotuksia (toimenpideehdotuksia). Suunnitelmassa kerrottiin sinisuohaukasta ja metsäkanalintuhavainnoista, käärmeekuusesta ja lähteiköistä. Vielä vuonna 1999 metsänomistaja ei saanut suunnitelmatietoja digitaalisessa muodossa, ellei omistanut Xforest-ohjelmaa, jonka käyttäjän tuli olla metsäammattilainen ja atk-asiantuntija. Vuonna 2017 suunnitelmat ovat netissä ja niitä muokataan ja päivitetään tarpeen mukaan.

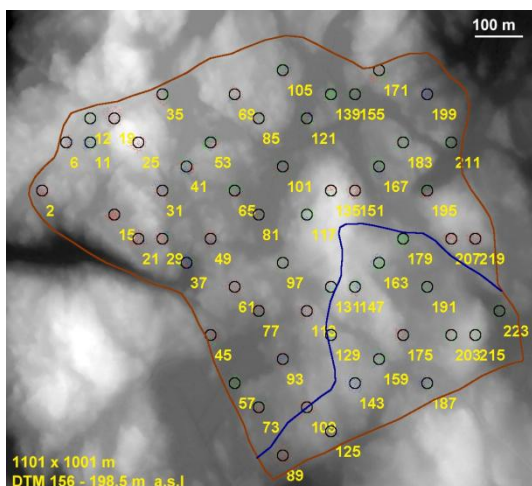
1.3.3 Puiden mittaaminen ilmakuvilta ja laserkeilaushavainnoista, puu kerrallaan

Seuraava metsänmittausesimerkki tuo lukijan vuoteen 2007. Tällä kertaa oltiin kiinnostuneita 57 hehtaarin metsäalueen puustosta, mutta mittaukset tehtiinkin ”ilmasta käsin”, ilmakuvilta ja laserkeilausdatasta. Asialla olivat vuosina 2005-2006 opintonsa aloittaneet metsäylioppilaat¹. Asetelma:

- Metsähallituksen metsää, rajoina metsäautotiet.
- Vanhoilta ilmakuvilta (1946-2007) päätellen, aluetta oli uudistettu n. vuosina 1950-1985, eli puusto oli toisaalta 30-60-vuotiasta ja toisaalta reilusti yli 100-vuotiasta.
- Käytössä oli tarkkoja ilmakuvia ja ilmalaserkeilausaineisto vuodelta 2006



Kuva 17. MARV4 kurssin inventoima alue keväältä 2007. Mustavalkokuvalla on projisoitu ilmakuvilta mitatut puut. Punainen == mänty, vihreä == kuusi ja sininen == lehtipuu.



Kuva 18. Maaston korkeusmalli, alueen rajat, alueen halkova talvitie, 4 aarin (400 m²) koealat numeroineen.



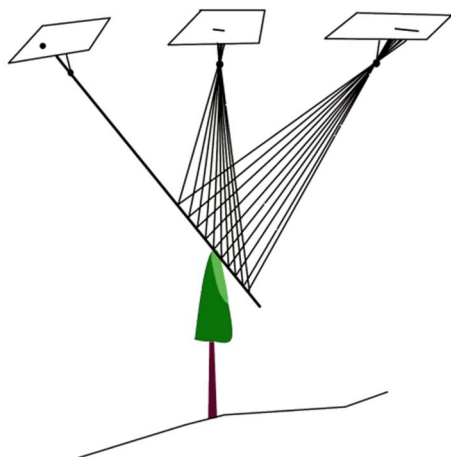
Kuva 19. Kansalaisen karttapaikan peruskartta. Suot näkyvät korkeuskartalla (Kuva 18) painanteina.

Edellisen esimerkin suunnitteluinventointi Riistavedellä (1.3.2 Metsätalouden suunnitteluinventointi) tehtiin 1999. Metsänmittaajalle hyödylliset ilmakuvat kuvattiin filmille vielä tuolloin, mutta vuoteen 2007 mennessä kamerat olivat muuttuneet digitaalisiksi, laserkeilaustekniikka oli kehittynyt käytännön tarpeisiin kuten myös tarkat satelliittipaikannusjärjestelmät, joilla pystyi paikantamaan lentokoneeseen asennetun kuvauslaitteen. Maastosatelliittipaikannus oli sekin tarkentunut s.e. taimikoissa (avotaivasta) pystyi paikantamaan itsensä 3 cm tarkkuudella (VRS-GNSS järjestelmä²), ja puuston alla jopa puolen metrin tarkkuudella, tosin vasta jälkilaskennan jälkeen. Metsänmittauksen kehitys onkin aina ollut uusien mittaus-, laskenta- ja tilastollisten menetelmien soveltamista.

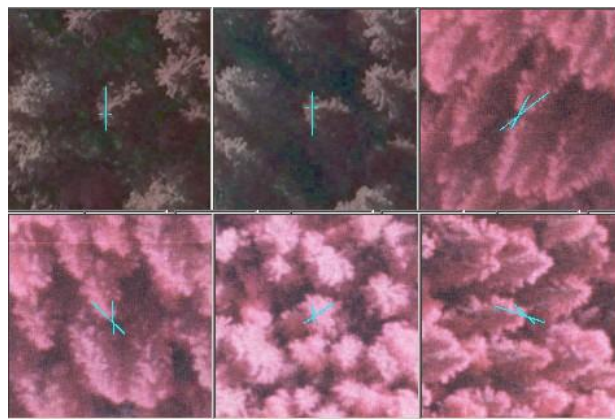
Ajatus siitä, että puita voi mitata ilmakuvilta ei ollut uusi. Jo [1950-luvulla](#) tehtiin kokeiluja ja laadittiin matemaattisia yhtälöitä, joiden avulla ilmakuvilta mitattu latvuksen leveys voitiin muuntaa rungon läpimitaksi. Mittaukset olivat vain hankalia toteuttaa, eikä yhden puun kohdalla tarkkuus ollut kovin hyvä.

Esimerkiksi puun läpimitan voi ennustaa yhtälöllä (mallilla), jossa rungon läpimita = $a_1 \times d_{cr} + a_2 \times h$, missä h on puun pituus ja d_{cr} on latvuksen suurin leveys. Kertoimet a_1 ja a_2 vaihtelevat puulajeittain, ja kertoimia on julkaistu [tutkimusjulkaisuissa](#). Rungon läpimita on tärkeä puuta kuvaava tunnus. Jos puun pituuden ja latvuksen maksimileveyden pystyy mittaamaan virheettä, on rungon läpimitan ennustetarkkuus noin $\pm 10\%$, eli läpimitaltaan 30 cm paksulle rungolle saadut arviot ovat välillä 27...33 cm, 68% tapauk-

sista ($\pm$ yksi keskihajonta). Kovin täsmällisiä epäsuoria mitauksia rungon järeydestä ei siis voi tehdä mittaamalla latvuksen leveys ja puun pituus. Mutta, jos mittaukset voidaan automatisoida, saadaan kerralla paljon puita mitatuiksi, ja satunnaiset virheet kumoavat toisensa.

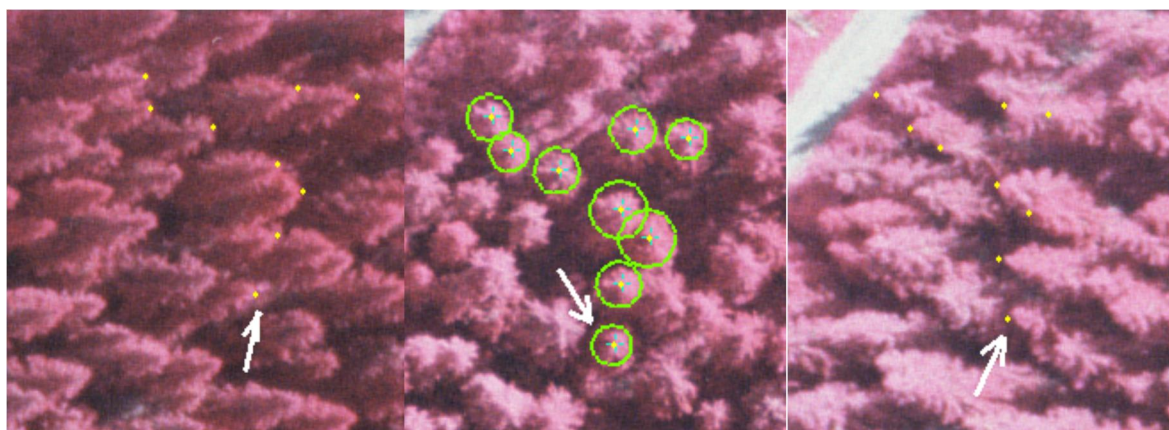


Kuva 20. 3D kuvamittauksen periaate. Jos vasemmanpuoleiselta (miltä tahansa) kuvalta pystytään osoittamaan puun latva, voi se sijaita muilla kuvilla ainoastaan epipolaarisuorilla, jotka osoittavat, missä vasemmanpuoleisen kuvan kuvasäde kulkee. Jos tiedetään millä korkeusvälillä latva todennäköisesti sijaitsee, rajautuvat epipolaarisuorat janoiksi. Kun latva löydetään niiltäkin kuvilta, voidaan sen XYZ-sijainti laskea kuvasuorien "leikkauspisteinä" (eteenpäinleikkaus). Jotta kaikki eo. onnistuu, on kuvista kuitenkin tiedettävä tarkalleen, mistä XYZ-pisteestä ne on otettu, ja miten kamera oli kallistunut kuvaa otettaessa.



Kuva 21. Mittaajan näkymä latvoja mitattaessa ilmakuvalla. Latvapisteitä on osoitettu kuvilla 1 ja 2. Niillä näkyy vain yksi epipolaarisuora, kun taas muilla kuvilla kaksi suoraa leikkaa kohdissa, joissa kuvalla on latva.

Ilmakuvien etu on se, että liikkuminen ilmakuvalla on paljon helpompaa kuin liikkuminen maastossa. Yksi ilmakuvamittauksen ongelmista on, ettei maanpinta latvusten alla näy, jolloin puiden pituuden mittaaminen vaikeutuu, kun maanpinnan korkeutta (Z) ei voida luotettavasti mitata. Peruskarttojen korkeusmallit (-käyrät) yleistivät maan pinnanmuotoja, ja korkeusvirheet saattoivat olla useita metrejä. Tämä johtuu siitä, että käyrät on juurikin piirretty ilmakuvia stereoskooppisesti ihmisilmin tarkastelemalla.

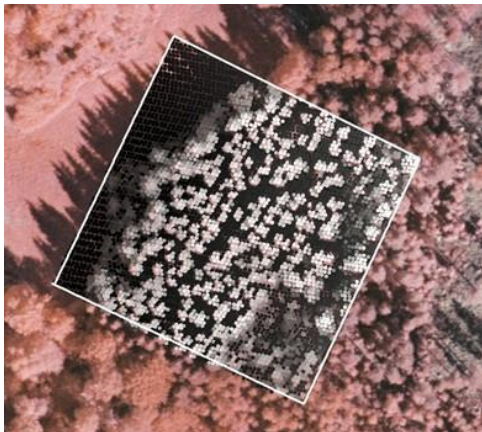


Kuva 22. Kuvakolmikko (isoilta kuvilta leikattuja kuvakaappauksia), johon on merkitty 9 puun latvapisteet. Puut näkyvät myötävalossa, suoraan kameran alla ja vastavalossa (vrt. Kuva 20). Ympyrät kuvaavat kuvalta mitattuja latvuksen leveyksiä olettaen, että latvukset ovat ympyräsymmetrisiä, mikä ei tietenkään aina pidä paikkaansa, erityisesti tiheissä kilpailulle alttiina olevissa metsissä.

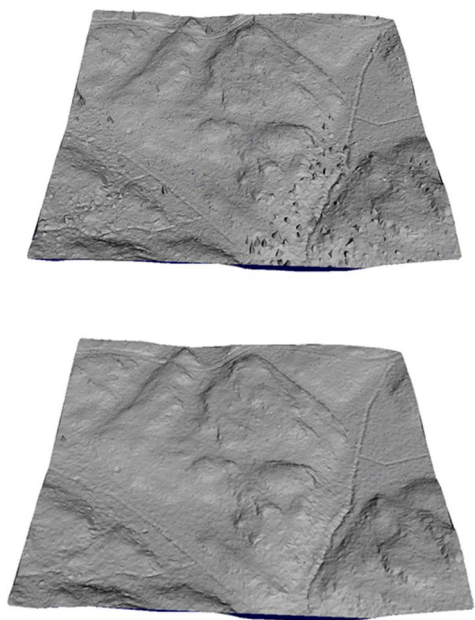
Maanpinnan korkeusaseman problematiikka ratkesi ilmalaserkeilauksen myötä³. Tekniikka on periaatteessa yksinkertainen. Mittalaitteessa (laserkeilain) on kaksi osaa, joista toinen lähettää hyvin lyhyitä ja kapeita (pituudeltaan muutamia metrejä, maassa alle metrin levyisiä) valopulsseja ja toinen, joka vastaanottaa takaisin sironneita fotoneja. Laite mittaa

valon kulkuajan kohteeseen ja takaisin. Kulkuajan sekä valon nopeuden avulla pystytään laskemaan kohteen ja laserkeilaimen välinen etäisyys (kyseessä on etäisyysmittari). Jos lisäksi tiedetään, missä laserkeilain tarkalleen sijaitsi (XYZ) ja mihin suuntaan laserpulssi ammuttiin (suuntavektori (i, j, k)), saa-

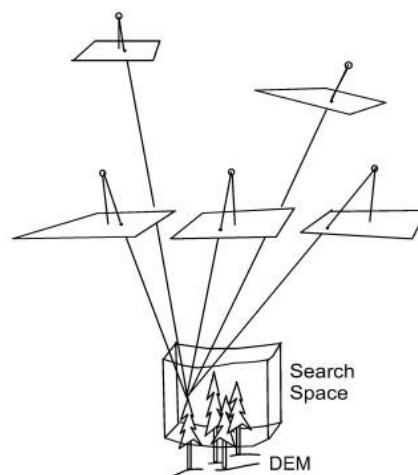
daan laskettua kohteen XYZ-sijainti. Keilain sijoitetaan lentokoneen tai helikopterin runkoon s.e. ”katselusuunta” on alas. Kun pulsseja ammutaan satoja tuhansia sekunnissa, ja niitä poikkeutetaan systemaattisesti eri suuntiin ilma-aluksen alapuolella, saadaan aikaiseksi 3D näytteenotto alla olevasta maisemasta (Kuva 23). Vastaanottimet on rakennettu s.e. ne pystyvät mittaamaan useita kaikuja samasta pulssista, tilanteessa, jossa osa pulssia (osuttuaan kasvillisuuteen) jatkaa matkaa kohti maanpintaa tai esim. osuu useampaan oksaan.



Kuva 23. Ilmalaserkeilausipisteitä 1 hehtaarin alueella. Pisteiden harmaasävy vastaa korkeutta merenpinnan yläpuolella (H). Hyytiälän Muistokuusikko. Vuosi 2004.



Kuva 24. Algoritmilla voidaan etsiä laserpisteiden (kaikujen) joukosta ne tapaukset, joissa pulssi on todennäköisesti osunut maahan asti. Yllä esitetään kolmiomalli (TIN) ennen piikkien (epäuskottavia maapisteitä) suodatusta ja alla on suodatettu maaston korkeusmalli.



Ilkka Korpela 2004

Kuva 25. Puun latvan ja maanpinnan korkeusero == pituusarvio. DEM tulee sanoista digital elevation model, maaston korkeusmalli. Latvapiste voidaan mitata kahta tai useampaa kuvaa käyttäen. Yksi kuva ei riitä kolmeen koordinaattiin.

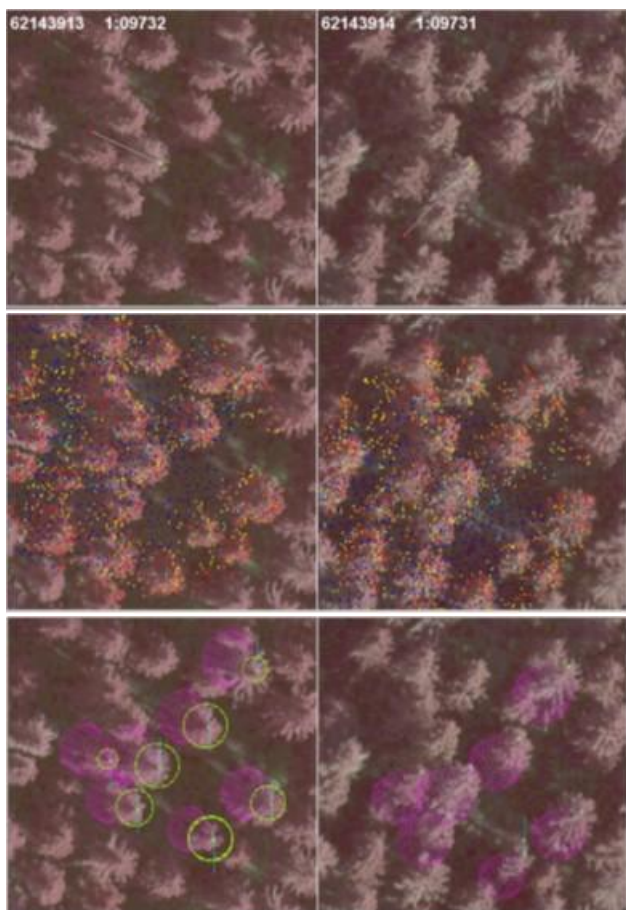
Inventoitava alue oli 56.8 hehtaaria kooltaan (Kuva 17). Sille perustettiin systemaattinen koealaverkko. Koealapisteitä oli 59 kpl (2 ylimääräistä tutkimustarkoituksiin) ja kuhunkin mitattiin ympyrän muotoinen näyte(koe)ala, jolta pyrittiin mittaamaan kaikki puut, jotka kuvatulkitseja kykeni erottamaan ilmakuvilta. Samalla hän arvioi puulajin ja mittasi automaattisesti latvuksen läpimitan sekä kuvainformaatioon että laserpistepilveen perustuen (Kuva 26).

Kaiken kaikkiaan koealoilta mitattiin maastossa 2113 puuta. Kun tulokset laskettiin koko 56.8 hehtaarin alueelle saatiin (Taulukko 1) taulukon mukaisia arvoja. Maastossa mitattiin kaikki puut, joiden runko oli paksumpi kuin 7 cm. Näistä puista vain 64.8 % pystyttiin mittaamaan ilmasta käsin. Tulokset ”ilmasta käsin” olivat kauttaaltaan aliarvioita. Esim. puiden runkotilavuuden arvio (9783 m³) oli 80.8% oikeasta arvosta. Syitä olivat: pienet puut eivät näy ilmakuvalla / laserpisteissä, tiheässä kasvavat eivät erotu ja se, että pituudet aliarvioituivat systemaattisesti noin 0.5 m ja puiden läpimitat tämän takia vastaavasti 1 cm. Puulaji tulkittiin lähes 95% tarkkuudella oikein (

Taulukko 2). Kuusen tilavuuden aliarvio oli suurin, 27%. Kuuset ovat usein alikasvoksessa tai vallittuja, eivätkä näy ilmakuvassa.

Maastomittauksin (kaikista koealojen puista mitattiin puulaji, rungon läpimitta ja mitattiin tai laskettiin pituus) saatiin alueen puuston kokonaistilavuudeksi 12110 m³. Kun huomioidaan alueen pinta-ala (56.8 ha), saadaan tästä keskiarvoksi 213 m³/ha. Alue oli selvästi runsaspuustoisempi kuin edellisen esimerkin metsälö Riistavedellä, missä vastaavasti puuston keskitilavuus oli 147 m³/ha, mikä sekin on valtakunnallista keskiarvoa suurempi⁴.

Tukkipuuta alueella on 5200 m³, eli noin 250,000€ arvosta.



Kuva 26. Ilmakuvapari kuusikosta. Yllä: Operaattori on mitannut latvapisteiden ja on saatu puulle paikka ja pituus ("runko" projisoitu kuville). Keskellä: ilmalaserkeilauksen tuottamat pisteet värityksellä "korkeus maasta". Alla: latvapisteiden käsien mittaamisen jälkeen latvuksen koko arvioitiin kuvilta automaattisesti "template matching" tekniikalla (ympyrät), ja toisaalta sovittamalla laserpisteisiin 3D latvusmalli.

Taulukko 1. Koko alueen tunnuksien kaukokartoituksella ja maastossa mitaten.

Muuttuja	Menetelmä		
	Ilmasta		Maasto
Puita, n	53137	64.8 %	82042
Runkotilavuus, m ³	9783	80.8 %	12110
Tukkipuuta, m ³	3522	67.6 %	5212
Kuitupuuta, m ³	5926	94.6 %	6264
Mäntyä, m ³	4511	86.8 %	5198
Kuusta, m ³	3919	73.0 %	5372
Lehtipuita, m ³	1262	80.9 %	1560

Taulukko 2. Puulajitulkinnan virhematriisi.

Sp_foto	Field measured value				
	Pine	Spruce	Broadl.	Dead	All
Pine	896	37	8	6	947
Spruce	25	726	13	2	766
Broadl.	16	22	354	0	392
Dead	0	3	1	4	8
All	937	788	376	12	2113

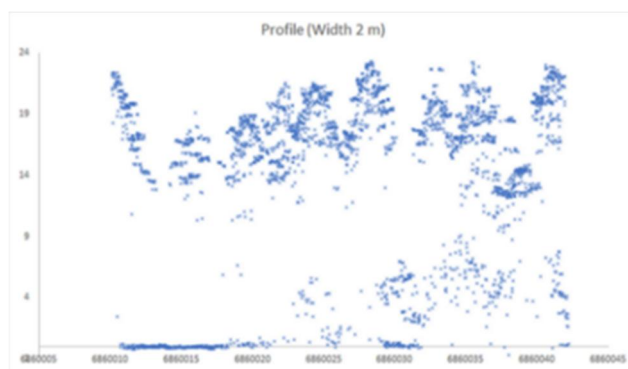
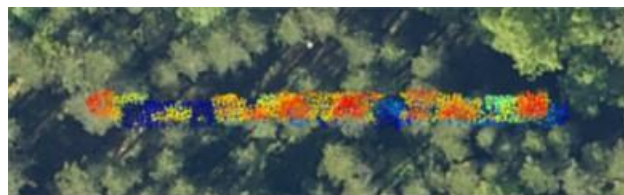
1.3.4 Puuston mittaus laserkeilaushavainnoista pala met-sää kerrallaan

Tämä aluepohjainen laserkeilausmetsäninventointi tehtiin samalle 56.8 hehtaarin alueelle kuin edellisessä esimerkissä, käyttäen samaa v. 2007 mitattua 59 koealan maastoaineistoa, joskin vasta keväällä 2017, silloisen MARV-104 kurssin opiskelijoiden toimesta.

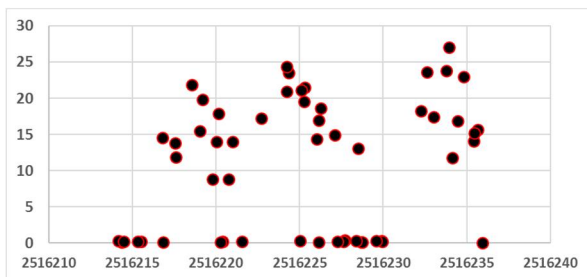
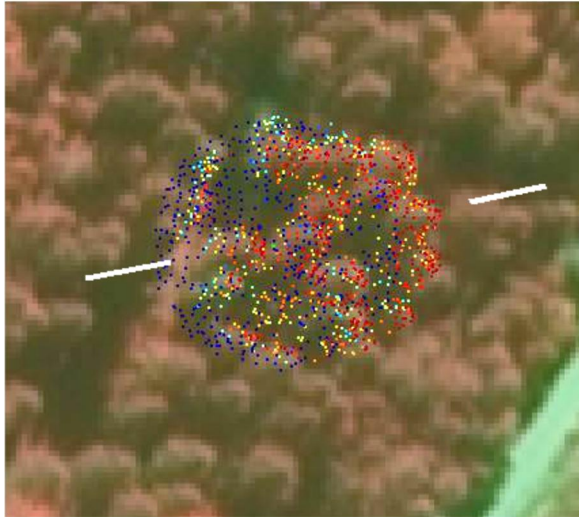
Edellisen esimerkin tapauksessa koko alueen tulokset laskettiin 59 koealan avulla, joista kukin oli 0.04 ha kooltaan, eli yhteensä 2.36 hehtaarin näyte edusti koko 56.8 ha aluetta. Otantasuhte oli 4.1%. Koealojen puut mitattiin, toisaalta ilmasta käsin (ne jotka nähtiin) ja vertailuksi maasta käsin (kaikki puut) ja saatiin kahdet tulokset. Ilmasta käsin tehtiin siis aliarvioita koskien puuston määrää.

Ilmakuvat ja laserkeilaus kattoivat koko alueen. Niiden avulla on mahdollista ennustaa puuston ominaisuuksia myös sinne, missä maastossa ei käyty – koealojen ulkopuolelle. Tätä aluetta oli siis 95.9% kokonaispinta-alasta (100-4.1).

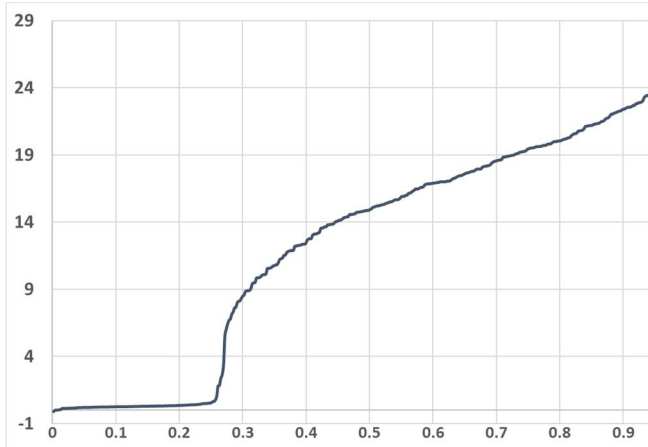
Menetelmä (aluepohjainen laserkeilausinventointi) perustuu siihen, että alue jaetaan ruutuihin tai sinne perustetaan tiheä hilapisteistö ja ympyräkoeala jokaiseen pisteeseen, esim. 20 m x 20 m hilassa. Koealaan osuneet laserpisteet analysoidaan s.e. jokaiselle pisteelle lasketaan korkeus maasta (Kuva 28). Laserkeilaimen pulsseja osuu tavallisesti 1–3 kpl neliömetrille, eli maastossa mitatulle 400 m² koealalla pulsseja voi olla jopa 1000. Korkeimmat osumat kertovat puuston maksimipituudesta. Maahan asti tulneiden pulssien osuus kertoo latvuston peittävytydestä ja mitä harvemmasta puustosta on kyse, sitä suurempi osuus pulsseista osuu maahan (Kuva 29).



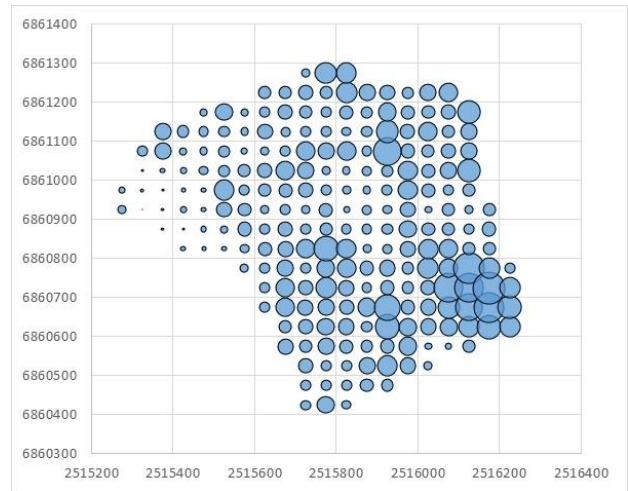
Kuva 27. Erittäin tiheä (40 pulssia / m²) Laserpistepilvi metsässä. Hyytiälän SMEAR-männiköstä on irrotettu 2 m leveä kaista pisteitä, joiden korkeus maasta esitetään alemmassa kuvassa.



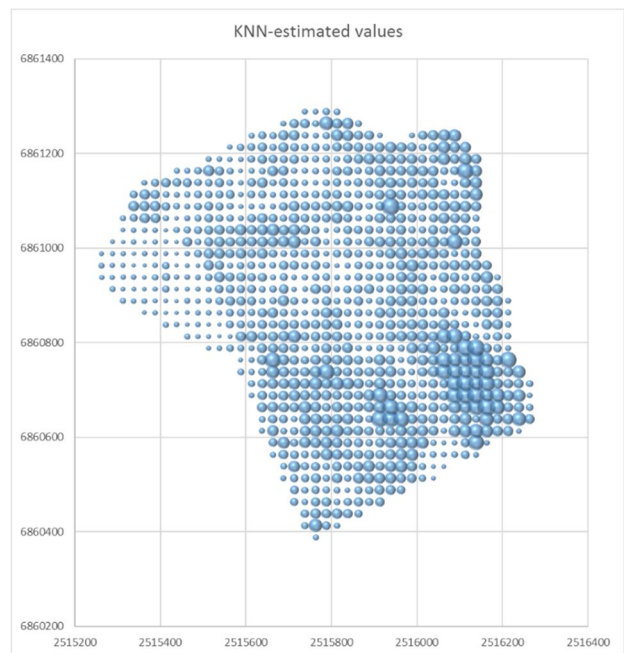
Kuva 28. Yläkuvassa esitetään vanhan kuusi-mäntymetsän ympäräkoela (#223), ja siihen osuneet laserpisteet ilmakuvalla. Alakuvassa on 2 m levyinen itä-länsisuuntainen kaista ja siihen osuneet pisteet itäkoordinaattiakselin suunnassa.



Kuva 29. Koealan #223 laserpisteiden korkeusjakauma – x-akselilla suhteellinen kertymä (0-1), y-akselilla korkeus (m). Maksimikorkeus on 27.1 m, puolet pisteistä on 15 m yläpuolella ja noin 25 % on saavuttanut maanpinnan. Koska maaston korkeusmalli ei ole absoluuttisen tarkka, ovat matalimmat korkeudet negatiivisia, minimi on -0.11 m.



Kuva 30. Korkeusjakauman ominaisuuksista (piirteistä) voitiin laskea matemaattisilla regressiomalleilla⁵ puuston tilavuuden – tässä 50 x 50 m hilassa. Puuston keskitilavuus näin (malleilla) laskien oli 194 m³/ha. Maksihavainto alueen kaakkoiskulmassa oli 436 m³/ha.



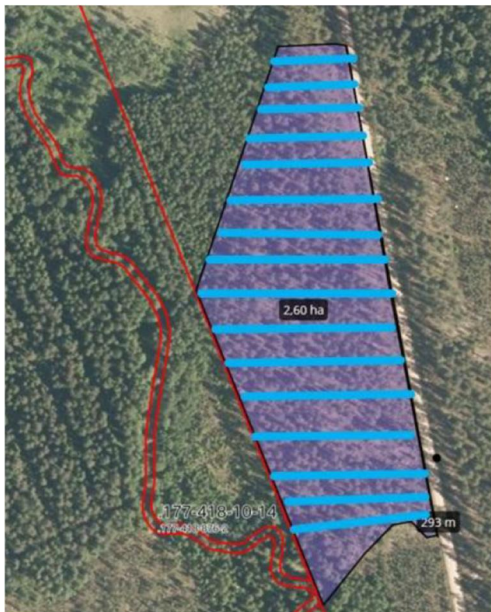
Kuva 31. Tässä on laskettu 25 x 25 m hilassa puuston kokonaistilavuus käyttäen ns. lähimmän naapurin tekniikkaa ja ennusteet perustuvat laserpiirteisiin. Keskitilavuudeksi saatiin 221 m³/ha. https://en.wikipedia.org/wiki/Nearest_neighbor_search. Kussakin 25 m hilapisteessä on tutkittu samankaltaisuutta, lasermittausten suhteen, maastossa mitattujen 59 koealan muodostamassa (opetus)joukossa. Kolme lähintä (k-nearest neighbor) koealaa ja niiden painotettu keskiarvo on pisteelle saatu estimaatti. Maksimitilavuus on 444 m³/ha. Vrt. Kuva 17.

Tässä luvussa kuvattu esimerkki kuvastaa kaukokartoitus-tiedon tyypillistä käyttötapaa metsänarvioimistieteessä. Kaukokartoituksen avulla maastossa mitattuja tietoja **yleistetään** metsäalueen eri osiin tulkintamallin (regressiomalli, Kuva 30) tai –menetelmän (lähin naapuri, Kuva 31) avulla.

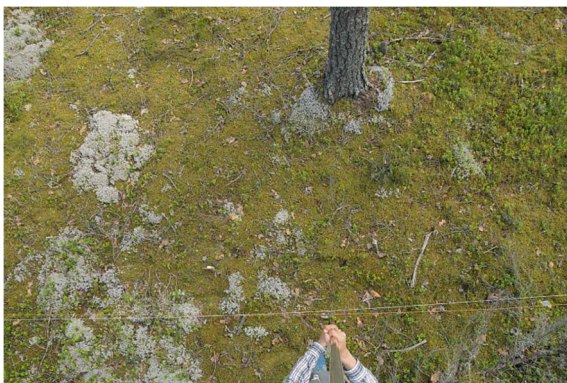
1.3.5 Esimerkki - Kuinka paljon jäkälää?

Joukko metsänmittaajia sai selvittettäväkseen erään 2.5 hehtaarin suuruisen hiekkakankaalla kasvavan männikön maajäkälän peittävyys. Alueella oli pitkään opetettu CT-metsätyyppiä, jota luonnehtii, mm., (varttuneen puuston kehitysvaiheessa) yli 25% maajäkälän peittävyys. Ryhmä mittasi mittanauhalla linjoja ja laski kultakin jäkälän peittämän matkan sekä linjan kokonaispituuden. Linjojen väli oli 15 m. Lisäksi he pysähtyivät 5 m välein ja tutkivat näissä pisteissä jäkälän esiintyvyyden (kyllä/ei).

He saivat linjoittaisiksi peittävyyksiksi 9.7, 3.6, 24.9, 4.6, 2.7, 5.7, 26.8, 7.6, 23.8, 9.8, 11.5, 14.9, 21.2, 10.5, 6.2, ja 19.1 %. Nämä luvut saatiin jakamalla jäkälän "esiintymismatka" koko linjan pituudella. Koko alueen estimaatti jäkälän peittävyydelle oli 12.7% ja se saatiin linjoittaisten lukujen keskiarvona. Osaatko sanoa, mikä meni pieleen?



Kuva 32. Männikkö ilmakuvalla. 16 mittauslinjaa, joille jokaiselle laskettiin jäkälän osuus jäkälän peittämän matkan ja kokonaismatkan suhteena.



Kuva 33. Näkymä metsänpohjalle 4 m korkeudesta.

Matematiikkaa ja Tilastotiedettä

Tässä luvussa käydään luettelonmaisesti läpi perusasioita ja annetaan esimerkkejä eri ohjelmistojen käytöstä. Opettajan Maple-esimerkit on laadittu Maple 7 ja Maple 2017 -ohjelmilla. Maple on symbolisen matematiikan ohjelmisto, johon HY on lisenssi.

Maplen lyhyt oppimäärä (Maple 2017)

Maple on erittäin monipuolinen symbolisen laskennan matematiikkaohjelmisto. Symbolinen laskenta tarkoittaa, että Maplilla voi "laskea ilman numeroita" eli esim. hakea jonkin yhtälön ratkaisua suljetussa muodossa tai approssimaatiota sille. Sen avulla voi visualisoida ongelmia.

Käytämme Maplea funktioiden havainnollistamiseen, derivointiin ja integrointiin.

Komennot kirjoitetaan työkirjalle. Avaa Maple, anna CTRL-N komento uuden worksheet -olion luomiseksi.

`:=` notaatio sijoittaa oikealla puolella olevan olion vasemmalla puolella annettuun muuttujaan (olioon). Puolipiste päättää komennon.

Alla muuttujaan `a` sijoitetaan numeerinen arvo ja muuttujaan `b` sijoitetaan symboli, lasketaan summa ja muuttujaan `d` sijoitetaan lista (kokeile):

```
a:=1;
b:=c;
a+b;
d:=[1,2,3];
```

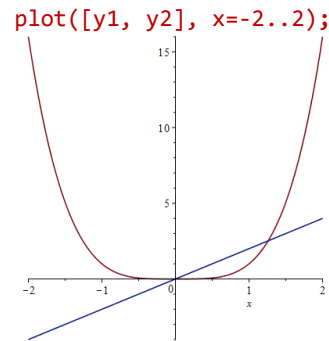
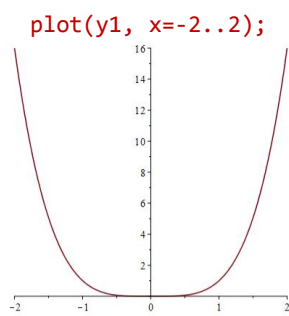
Alla lasketaan luvusta 1 `sin()` funktion arvo. Numeerinen arvo saadaan esille `evalf()` funktion avulla, jolle annetaan merkitsevien numeroiden lkm.

```
sin(a);
evalf(sin(a), 3)
```

Funktion/vakion esittely: (restart tyhjentää kaikki oliiot)

```
restart;
y1:= x^4;
y2:= 2*x;
a:= 1;
b:= 2;
```

Funktion piirtäminen, yksi tai useampia kerrallaan:



Funktion ratkaiseminen ja saadun tuloksen (lista) sijoittaminen:

```
Ratkaisu:=solve(y1=y2, x);
```

```
ratkaisu := 0, 2^(1/3), -(1/2)*2^(1/3)+I*sqrt(3)
*2^(1/3)*(1/2), -(1/2)*2^(1/3)-I*sqrt(3)*2^(1/3)*(1/2)
```

```
evalf(ratkaisu)
0, 1.259921050, -.6299605250+1.091123636*I, -
.6299605250-1.091123636*I
```

"I" on imaginääriosan merkki (kompleksiluvut)

Aritmeettiset operaatiot:

```
a+b; a-b; a*b; a^b;
```

Derivointi ja integrointi

```
diff(x^4, x);
4*x^3
```

```
int(x, x = 0 .. 1);
1/2
```

Excelin vielä lyhyempi oppimäärä

Taulukkolaskentaohjelmassa on soluja, joilla on rivi- ja sarakkeosoite, joilla niihin voi viitata. Soluihin voi sijoittaa numeerisia arvoja, tekstiä tai kaavoja ja funktioita. Solulla on myös muotoilu, joka vaikuttaa siihen, miten luku tulkitaan: numero voi näyttäytyä numerona, päivämääränä, kellonaikana jne.

Numeron voi sijoittaa suoraan. Tekstin myös, paitsi jos se annetaan ""-merkeissä, tarvitaan -sijoitusoperaattori. Esim. **"Muuttuja"**

Kaava voi olla esim. muotoa

```
= B1
= 2
= 2*sin(A1)
```

Ensimmäisessä kaavassa soluun sijoitetaan solun B1 (sarake B, rivi 1) arvo. Toisessa syötetään numero 2 ja kolmannessa solun A1 arvosta otettu `sin()` kerrottuna kahdella.

Soluun syötettyä kaava on helppo kopioida toisille riveille ja sarakkeilla, jos esim. halutaan laskea jokin uusi muuttuja havainnoista, jotka esiintyvät omilla riveillään, tai jos halutaan laskea sarakesummaa jne. Kaava kirjoitetaan kerran ja kopioidaan muihin soluihin ohjelman huolehtiessa viittausten oikeellisuudesta.

Excelissä on paljon tekstimuotoisen ja numeerisen aineiston käsittelyyn tarkoitettuja valmiita funktioita. Tilastolliset funktiot `average()`, `percentile()`, `median()`, `stdevp()`, `var()`, `min()`, `max()`, `rand()`, `correl()`, `linest()`, `frequency()` tulevat laskutehtävissä tutuiksi. Tietokantafunktioilla voi hakea avaimen perustuen tietojen eri taulujen (havainto- ja laskentatietojen) välillä: `vlookup()`, `index()`. Excelillä on kätevää tehdä kuvia: xy-pistekuvio, piirakkakuviot, pylväsdiagrammit jne. Kurssin ME-017 materiaali on hyödyksi Excelin opiskelussa – kts. HY-Moodle.

Funktioista

$F: A \rightarrow B$, A on lähtöjoukko, B on maalijoukko. F on kuvaus.

A voi olla esim. viisihenkisen perheen jäsenet, ja B suomalaisten etunimien joukko. Funktiota sovellettiin nimenannossa.

A voi olla metsän 1000 puuta ja B kaikki mahdolliset puiden runkotilavuuksien saamat arvot (positiivisia lukuja). Kuvaus F voisi olla matemaattinen funktio, joka antaa puulle tilavuuden. Tilavuus on skalaari, yksi luku, ja tilavuuden antava funktio on skalaariarvoinen. Tilavuus (yksi arvo) voidaan laskea useamman puuta kuvaavan muuttujan avulla (läpimitta, pinta-ala), ja tällöin funktio on skalaariarvoinen, kahden muuttujan funktio. Tilavuudella on suuruus, ei suuntaa. Siksi se on skalaari (luku).

Funktio, joka kertoo, kuinka 3D piste (x, y, z) kuvautuu kameran kuvalle (sarake, rivi), on vektorimuuttujan vektoriarvoinen funktio. Pisteellä (vektorilla) on suunta ja suuruus (pisteellä on etäisyys origosta). Vektoriarvoisia vektorimuuttujan funktiota esiintyy metsänarvioinnissa, kun lasketaan koordinaatteja tai halutaan esim. optimoida yhtä aikaa montaa asiaa – esimerkiksi laskettaessa optimaalista metsäsuunnitelmaa, kun metsänomistajalla on monta tavoitetta ja hän arvostaa niitä tietyillä painoilla.

Funktioiden ominaisuuksia, joita saattaa tulla esille ovat mm.

- **bijektivisyys** – jokaiselle lähtöjoukon alkioille on yksi maalijoukon kuva. Tällöin voi ratkaista käänteisfunktiosta lähtöjoukon alkion kuvan, jos tuntee maalijoukon alkion. Esim. jos kaukokartoituksessa pystyisi mallintamaan bijektiivisesti funktion, joka antaa satelliittikuvan pikseliarvot, vaikka viidellä kanavalla metsän ominaisuuksien (monta metsää kuvaavaa muuttujaa) funktiona, saisi käänteisfunktiolla aina viiden kanavan pikseliarvoilla yksikäsitteisen kuvan metsästä. $y = x$ on bijektio, kun taas $y = x^2$ ei ole.

- **jatkuvuus** – joskus metsää kuvaava malli muuttuu pykälittäin, kun metsän ominaisuudet muuttuvat riittävästi, malli on erilainen (hyppää, vakio-osa mallista muuttuu) esim. eri metsätyypeillä. Useimmat mallit ovat kuitenkin jatkuvia.

- **derivoituvuus** – derivaatta kertoo, miten yhden muuttujan (skalaari) arvoisen funktion arvo muuttuu, kun yksi sen riippumattomista muuttujista muuttuu. Se kertoo, kuinka herkkä funktio on. Vektoriarvoisten funktioiden kohdalla puhutaan differentiaalista. Funktion $y = x$ derivaatta on 1. Se on funktion jyrkkyyden. $y = x^2$ derivaatta on $2x$. Jyrkkyyden muuttuu x :n funktiona ja on nolla x :n arvolla nolla, jossa on funktion minimi. Derivaatasta on hyötyä herkkyydestarkasteluissa ja kun etsitään minimejä ja maksimeja (optimointi), tai kun pyritään ratkaisemaan monimutkaisesta käänteisfunktiosta x :n arvoja numeerisesti silloin kun yhtälöä ei suoraan pysty ratkaisemaan. Jos funktio on useamman muuttujan funktio, esim. puun tilavuus on noin $v = 0.5 \cdot \pi/4 \cdot d^2 \cdot h$, niin puhutaan osittaisderivaatoista. Eo. yhtälön osittaisderivaatta d :n suhteen on

$$\frac{1}{4} \cdot d \cdot h$$

ja osittaisderivaatta h :n suhteen

$$\pi/8 \cdot d^2.$$

Osittaisderivaatta kertoo, miten tilavuus muuttuu jommankumman (eri) muuttujien suhteen. Sitä tarvitaan mm. metsäekonomiassa, kun ilmiötä selittää monta asiaa ja halutaan tehdä herkkyysoanalyysiä. Osittaisderivaattoja tarvitaan myös ratkaistaessa jonkun metsää kuvaavan ilmiön parhaiten selittäviä yhtälöitä tilastollisin menetelmin, tällöin puhutaan regressioanalyysistä.

Maple-ohjelmalla derivaatta ja osittaisderivaatta lasketaan yllä oleviin esimerkkeihin:

```
> diff(x^2,x);  
> diff(0.5*Pi/4*d^2*h, h);
```

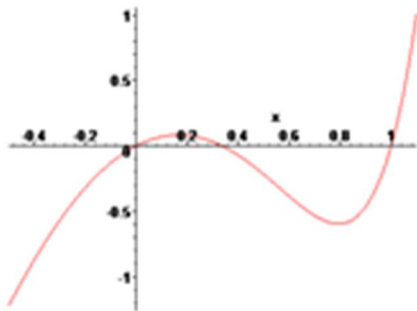
- **Lineaarisuus**. Jos funktio f on $y = x^2$, ja ensin $x = 2$, sitten siihen lisätään 2, niin voidaan tutkia, onko $f(2+2)$ yhtäsuuri kuin $f(2) + f(2)$. Samoin, jos x on ensin 2, ja se kerrotaan luvulla 3, voidaan tutkia päteeekö $f(2 \cdot 3) = 3 \cdot f(2)$. Ensimmäisessä tapauksessa $f(4) = 16$ ja $f(2) + f(2) = 8$, eli yhtäsuuruus ei päde. Samoin $f(6) = 36$, mikä on erisuuri kuin $3 \cdot f(2) = 12$. Funktio ei ole lineaarinen. Lineaarisuus ei ole sama asia kuin suoraviivaisuus. Regressioanalyysissä puhutaan lineaarisista malleista. Tällöin ei tarkoiteta suoraviivaisuutta.

- **Käänteisfunktio**. Funktion $y = x$ käänteisfunktio on $x = y$. Funktion $y = x^2$ käänteisfunktio on $x = \sqrt{y}$, mutta vain positiivisten lukujen joukossa, missä funktio on aidosti kasvava/vähenevä. Eksponenttifunktion käänteisf. on logaritmi, ja trigonometrisilla funktioilla on arkusfunktiot, jotka pätevät rajoitetuilla väleillä, koska $\sin$, $\cos$, $\tan$, $\cot$ jne. ovat jaksollisia. Maple-ohjelmalla voi ratkaista käänteisfunktion ao. esimerkin mukaisesti.

```
> solve(ln(x)=y,x);  
> solve(x^3+x^2+x=y,x);  
> solve(x^5+x^2+x=y,x);
```

Ratkaisu onnistuu vielä suljetussa muodossa kolmannen asteen polynomille, vaikka ratkaisuja on useita, eri väleille, joissa funktio on kasvava/vähenevä. Sen sijaan x^5 tapauksessa suljettua muotoa (funktiota) ei enää löydy, vaan ratkaisu pitää tehdä kokeilemalla, numeerisesti. Esimerkki alla:


```
> evalf(solve(2*x^6-3*x^2+x=0,x));
0., 1., .3361966932
> plot(2*x^6-3*x^2+x,x=-0.5..1.1);
```

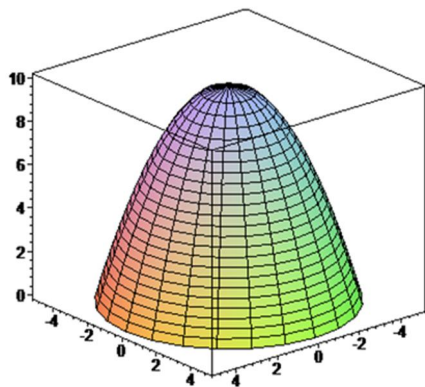


Joskus metsää kuvaava malli saattaa olla annettu esim. muodossa $\ln(y) = a \cdot x^3 + b \cdot x^2$, ja jotta mallilla voi laskea y:n arvoja (olkoon y vaikka puun kasvu vuodessa), tulee malli kirjoittaa esim. Excel-ohjelmaan muodossa (kun a ja b ovat jotain lukuja):

```
= EXP(a*x^3+b*x^2)
```

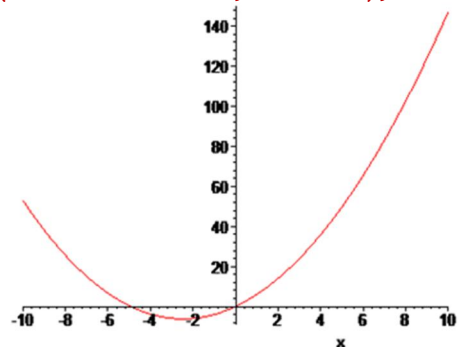
- **Polynomit.** Saadaan yhdestä tai useammasta muuttujasta ja vakioista yhteen-, vähennys- ja kertolaskulla, sekä positiiviseen kokonaislukueksponentin osoittamaan potenssiin korottamisella. Polynomeilla voi approksimoida muita funktioita (esim. puun rungon paksuuden muoto tyvestä latvaan), usean muuttujan polynomeilla voidaan mallintaa esim. pintoja tai pinnanpaloja. Alla piirretään Maplella polynomi (dxp), jonka annetaan pyörähtää z-akselin ympäri. Pyörähdyspinta on 10 yksikön korkuinen (h) ja säde on tyvellä 10 (rbase). Muoto on $\text{plot3D}([x:n \text{ lauseke}, y:n \text{ lauseke}, z:n \text{ lauseke}], \text{parametri } t, \text{parametri } z, \text{koordinaatistomäärittely})$. Polynomi kapeenee ylöspäin neliöjuuren määräämällä vauhdilla ($P=0.5$).

```
> rbase:=10;
h:=10;
P:=0.5;
dxp:=rbase*(1-z)^P;
> plot3d([dxp/2*cos(t),dxp/2*sin(t), z*h],t=-
Pi...Pi, z=0..1, axes=boxed );
```

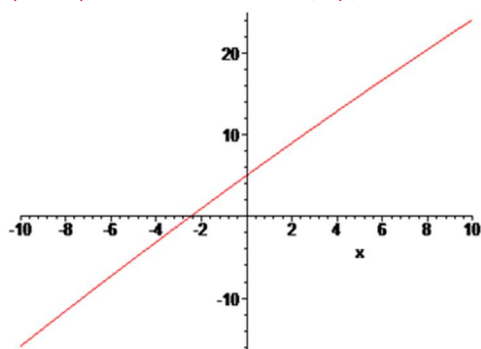


Polynomin ja sen derivaatan piirtäminen Maplella:

```
> plot(x^2+5*x-0.003*x^3,x=-10..10);
```

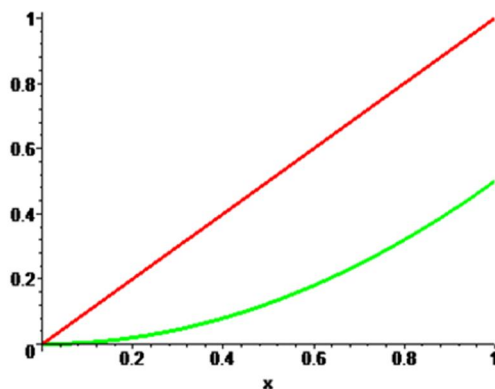


```
> plot(diff(x^2+5*x-0.003*x^3,x),x=-10..10);
```



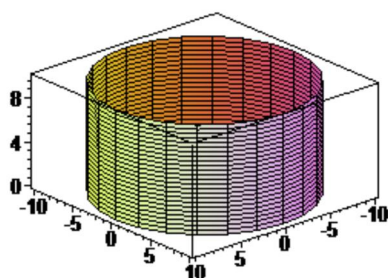
- **Integroituvuus ja integraalit.** Integraalit ovat tärkeitä, kun summataan jotain, jonka voi ilmaista derivoituvalla funktiolla. Esim. puun kasvu ajan suhteen ennustavan funktion integraali kertoo, mikä on puun koko tietyllä iällä tai rungon kapeenemista kuvaavan funktion integraali kertoo, paljon puussa on tilavuutta jollakin korkeusvälillä. Alla on funktion $y = x$ kuvaaja ja integraalin kuvaaja, kun x on välillä 0-1. Vihreä käyrä on lopuksi arvossa 0.5, mikä on punaisen viivan alle jäävä pinta-ala (kolmion pinta-ala).

```
> plot([x, int(x,x)], x =0..1);
```



Sylinterin voi Maplella piirtää, kun sylinterin halkaisija on dx (tässä 20), antamalla säteen (dx/2) pyörähtää z-akselin ympäri. Pyörähtäminen hoituu $\cos(t)$ ja $\sin(t)$ termeillä, jotka tuottavat ympyrän, kun t saa arvoja $-\pi \dots \pi$.

```
> dx:=20;
> plot3d([dx/2*cos(t),dx/2*sin(t), h],t=-
Pi...Pi, h=0..10, axes = boxed);
```



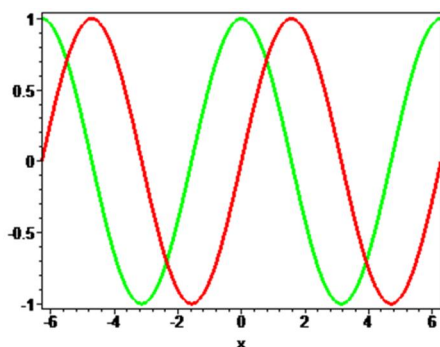
Tällaisen sylinterin tilavuuden voi laskea pyörähdyskappaleen integraalina tai tunnetulla sylinterin tilavuuden kaavalla: pohjan ala kertaa korkeus. Tulos on molemmilla tavoilla sama. Evalf() funktion vain pyöristää saadun luvun. Ympyrän pinta-ala on $\pi/4$ kertaa läpimitta toiseen (tai π kertaa säde toiseen).

```
> evalf(int(dx^2*Pi/4, korkeus=0..10),5);
> evalf(Pi*(dx/2)^2*10,5);
```

- **Trigonometriset funktiot.** Kosini ja sini ovat tärkeitä funktioita geometrisissa tarkasteluissa. Karteesiset (x, y) ja (x, y, z) koordinaatit voi esittää myös napa- ja pallokoordinaatistoissa käyttäen kiertokulmia.

Kosini ja sini ovat jaksollisia, ja tietokoneille niiden argumentiksi annettava kulma annetaan yleensä radiaaneina:

```
> plot([sin(x),cos(x)],x=-2*Pi..2*Pi);
```

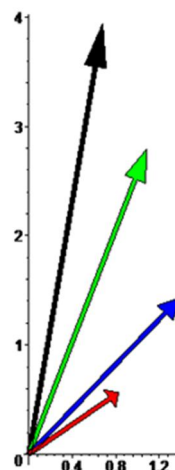


Huomaa $\pi/2$ siirto funktioiden välillä. Napakoordinaatissa xy-piste esitetään muodossa:

$x = \text{säde} \times \cos(\text{kulma})$
 $y = \text{säde} \times \sin(\text{kulma})$

Esimerkki, jossa neljä pistettä esitettyinä vektoreina, kun kiertokulma ja säde vaihtuvat (0.6, 0.8, 1.2 ja 1.4 radiaania ja 1, 2, 3, 4 pituutta). Kaikki vektorit ovat ensimmäisessä koordinaattineljänneksessä:

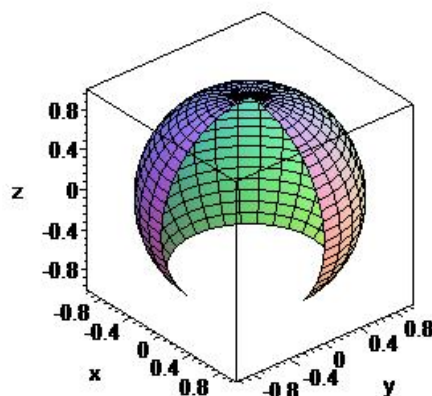
```
> with(plottools):
l1 := arrow([0, 0], [cos(0.6), sin(0.6)], .04,
.2, .1, color=red):
l2 := arrow([0, 0], [2*cos(0.8), 2*sin(0.8)],
.04, .2, .1, color=blue):
l3 := arrow([0, 0], [3*cos(1.2), 3*sin(1.2)],
.04, .2, .1, color=green):
l4 := arrow([0, 0], [4*cos(1.4), 4*sin(1.4)],
.04, .2, .1, color=black):
plots[display](l1, l2,l3,l4, axes=normal,
scaling = constrained);
```



```
x:=r*sin(theta)*cos(phi);
y:=r*sin(theta)*sin(phi);
z:=r*cos(theta);
```

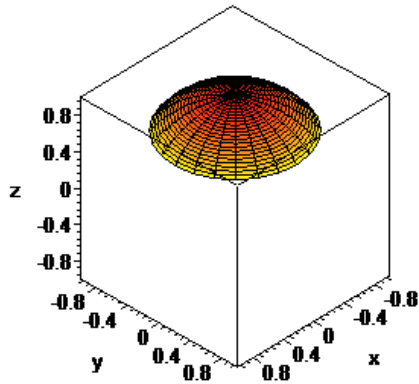
Pallokoordinaatistossa pätevät yllä esitetyt yhtälöt. Niissä theta on pystykulma, phi on kiertotasossa ja r on säde.

```
> plot3d([x,y,z], theta = 0..(Pi-.8), phi =
0..3/2*Pi, scaling =constrained, axes = boxed,
view = [-1..1, -1..1, -1..1], labels
=["x","y","z"]);
```



Tässä theta-kulmaa (pystykulma) on rajattu 0.8 radiaania va-
jaaksi ($\theta = 0..(\pi/8)$), samoin phi ei tee täyttä 2π ympy-
rää.

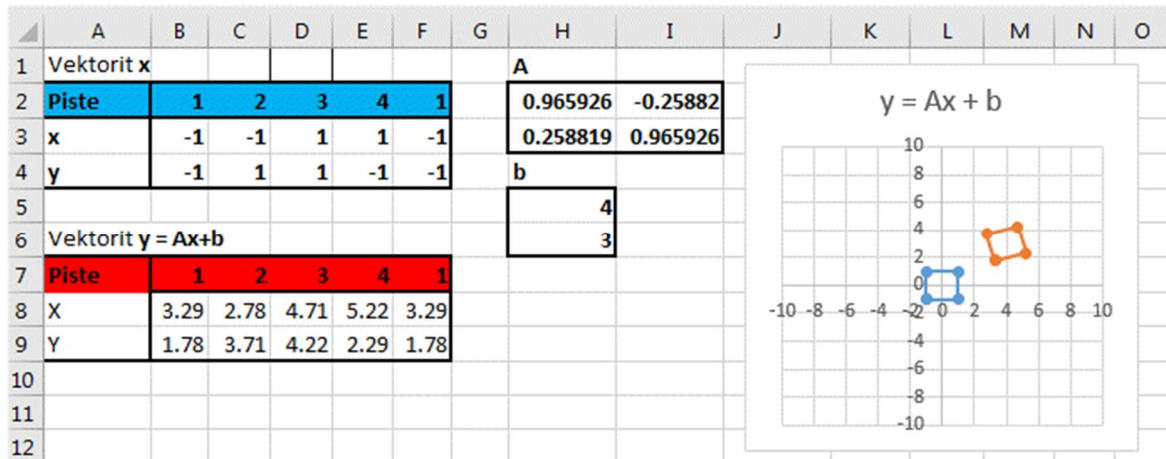
```
> plot3d([x,y,z], theta = 0..0.9, phi =  
0..2*pi, scaling = constrained, axes = boxed,  
view = [-1..1,-1..1, -1..1], labels  
=["x","y","z"]) ;
```



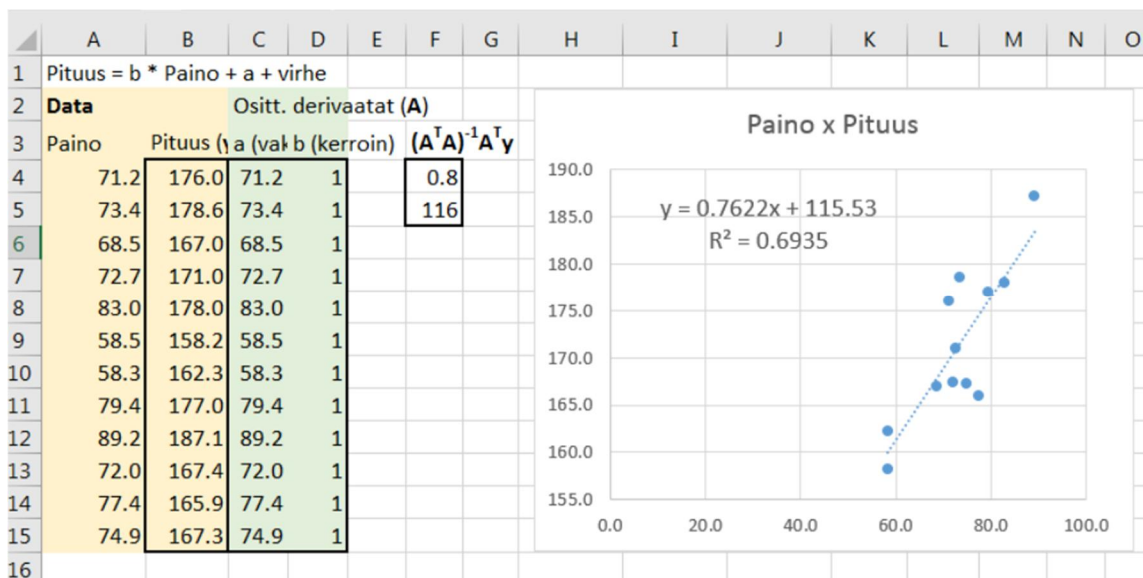
Pallokoordinaatistossa theta on nolla "pohjoisnavalla". Ku-
vassa on pystykulmaa (theta) rajaamalla saatu aikaan "hattu",
kun theta on 'juossut' välillä 0-0.9 radiaania ja phi tekee täy-
den 2π radiaanin kierroksen z-akselin ympäri.

Vektori ja matriisilaskentaa

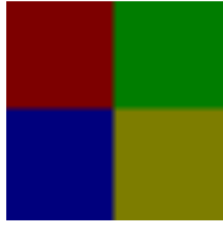
Vektoreille ja matriiseille on käyttöä, kun kuvataan 2D tai 3D geometriaa tai yleisesti datan kuvaamisessa ja analyysissä. Esim. RGB-kuvan pikseli voidaan ajatella kolmiulotteiseksi vektoriksi tai tutkimuksen havaintoaineisto muodostaa matriisin, jossa on eri muuttujien muodostamia vektoreita, joiden pituus on sama kuin havaintojen lukumäärä. Kuva 34 ilmentää tilannetta, jossa neljän pisteen muodostama neliö kuvataan matriisilaskennan keinoin uuteen paikkaan ja kiertoasemaan.



Kuva 34. Pruju_matrix.xlsx. Neljän pisteen (vektoreita origosta) kierto ja siirto tasossa matriisikaavalla $y = Ax + b$. A on kiertomatriisi, kierto 15 astetta vastapäivään, ja b on siirtovektori (4,3).



Kuva 35. Pruju_matrix.xlsx. Tässä on mitattu pituus-paino aineistoa, ja dataan sovitetään regressiosuora $Pituus = b * Paino + a$. Jos ratkaisun haluaa "laskea itse", tarvitaan osittaisderivaatat $a:n$ ja $b:n$ suhteen. Ne esitetään C ja D sarakkeissa (Excel). Matriisikaava $A^T A^{-1} A^T y$ antaa ratkaisuksi pienimmän neliösumman menetelmällä kertoimet a ja b . A on osittaisderivaattojen muodostama matriisi ja y on mitatuista pituuksista muodostettu vektori. Kaava soluissa F4:F5 on Excelissä $=MMULT(MINVERSE(MMULT(TRANPOSE(C4:D15),C4:D15)),MMULT(TRANPOSE(C4:D15),B4:B15)))$. Kuvassa suora on ratkaistu myös Excelin valmiin toiminnon avulla.



Kuva 36. 2×2 pikselin RGB kuva, jonka pikseliarvot ovat vektoreita: $(125, 0, 0)$, $(0, 125, 0)$, $(0, 0, 125)$, $(125, 125, 0)$.

Kun pikselivektorit kerrotaan matriisilla:

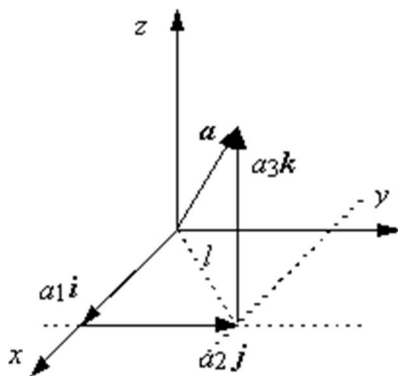
1	0.5	0
0.1	1.7	0.8
0.1	0.1	1

saadaan kuva:



Kuva 37. "Matriisilla kerrotussa" kuvassa (pikseleissä) vihreä korostuu, mutta värit vaikuttavat myös toisiinsa (lineaarikuvaukseen). Kuva tulee kirkkaammaksi, koska kaikki matriisin kertoimet ovat positiivisia. Tulokuvan RGB-pikseliarvot ovat:

$(125, 13, 13)$, $(63, 213, 13)$, $(0, 100, 125)$, $(187, 225, 25)$.



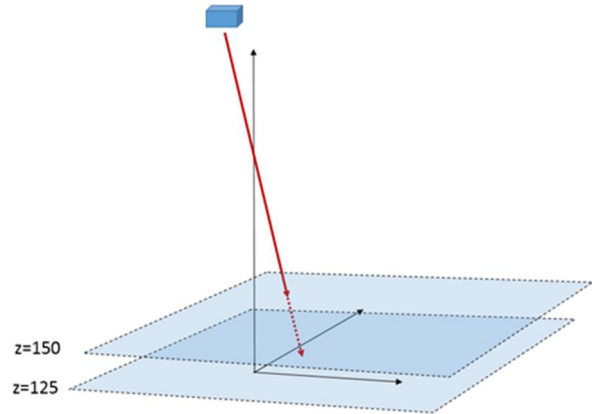
Vektorin $\mathbf{a} = (a_1, a_2, a_3)$ **pituus** lasketaan ottamalla neliöjuuri kertoimien toisten potenssien summasta. Jos kertoimet jaetaan vektorin pituudella, saadaan yksikkövektori (suunta-vektori).

$$|\mathbf{a}| = \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2}$$

$$\bar{\mathbf{a}} = \left(\frac{a_1}{|\mathbf{a}|} \mathbf{i}, \frac{a_2}{|\mathbf{a}|} \mathbf{j}, \frac{a_3}{|\mathbf{a}|} \mathbf{k} \right)$$

Vektoreita tarvitaan esim. kaukokartoituksessa, jos esim. halutaan seurata laserpulssin, suoran valon tai kameran pikseliin osuvan kuvasäteen kulkua latvustossa, lehdellä tai lehvästössä – ylipäänsä geometrisissa tehtävissä.

Esimerkki. Laserkeilausdatan tulkinta: mihin pulssi olisi osunut korkeudella 125 m m.p.y. (meren pinnan yläpuolella)?



Kuva 38. Tilannetta havainnollistava kuva. Laserkeilauksen kaiku on saatu 150 metristä, mutta mihin pulssi olisi osunut 125 m korkeudella (ehkä sinne jokin foton jatkoi matkaa)?

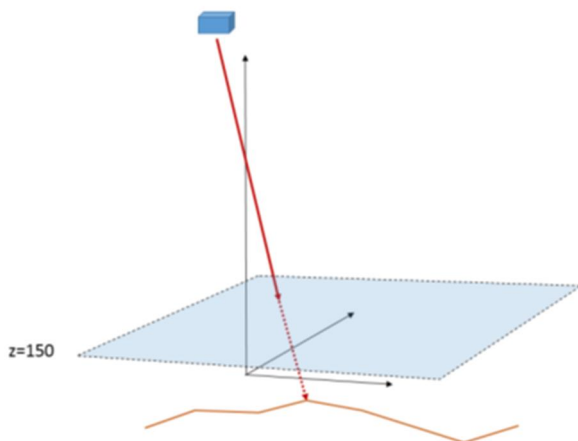
Laserkeilain oli xyz-pisteessä $(1000, 1500, 600)$, josta "ammuttu" pulssi antoi kaiun xyz-pisteestä $(1100, 1550, 150)$. Nämä tiedot käyttäjä saa keilaimen datasta.

Pulssivektori saadaan vektoreiden erotuksena: $(1100-1000)\mathbf{i}$, $(1550-1500)\mathbf{j}$, $(150-600)\mathbf{k}$ eli $(100\mathbf{i}, 50\mathbf{j}, -450\mathbf{k})$. Pulssi kulki 100 m länteen, 50 m pohjoiseen ja 450 m alas, jos xyz-koordinaatisto tulkitaan näin.

Pulssin pituus on $\sqrt{(100)^2 + (50)^2 + (-450)^2} = 463.7$ m.

Suuntavektori on siten $100/463.7\mathbf{i}$, $50/463.7\mathbf{j}$, $-450/463.7\mathbf{k}$ eli $(0.215\mathbf{i}, 0.108\mathbf{j}, -0.970\mathbf{k})$.

Ratkaistaan matka d , jonka pulssin on kuljettava, korkeustasolle, jossa z olisi kysytty 125 m. Yhtälö on $(125 = 600 - d \times 0.970)$, josta matka $d = 477.78$ m. Kun sen sijoittaa yhtälöihin $(1000 + d \times 0.215)$ ja $(1500 + d \times 0.108)$, saa x ja y koordinaatit 1103.04 ja 1551.52. Eli pulssi leikkaa tason $z = 125$ m xyz-pisteessä $(1103.04, 1551.52, 125.00)$.



Kuva 39. Jos oltaisiin kiinnostuneita, missä laserpulssi leikkasi maanpinnan, kun se tuotti kaiun (pisteen) vain ylemmää latvustosta, tehtävä ei enää ratkeakaan suoraviivaisesti, koska maanpinnan korkeus (z) vaihtelee x ja y mukaan. Ratkaisu on haettava kokeilemalla edeten pulssia (pitkin suuntavektoria keilaimesta katsoen) lyhyt askel kerrallaan alapäin tutkien maanpintamallien arvoa. Tarvitaan tietokone ja algoritmien toteutus.

Interpolointi, approksimointi

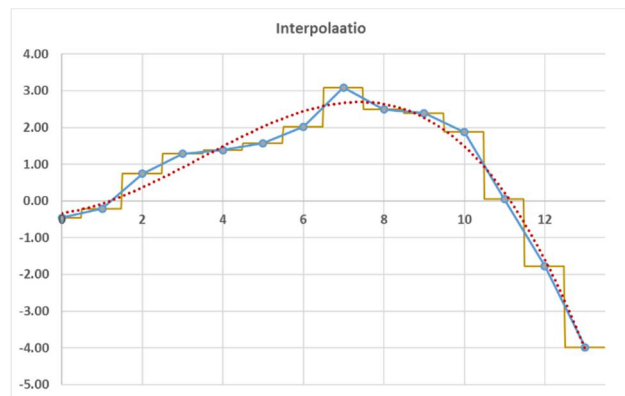
Interpolointi on numeerisen matematiikan menetelmä, jossa lasketaan uusia arvoja tunnettujen arvojen väliin.

Metsänmittauksessa on tavallista, että tarkasteltavasta ilmiöstä saadaan mitattua muutamia arvoja tai kerättyä otos. Ne edustavat tutkittavaa ilmiötä kuvaavan funktion arvoja muutamissa kohdissa. Esimerkiksi käy digitaalinen kuva, jonka taustalla on jatkuva "kuva-funktio" tai systemaattinen koeala-arviointi, jossa koealojen välisiä arvoja joudutaan ennustamaan tai interpoloimaan muun tiedon varassa.

Havaituista arvoista tulisi estimoida eli interpoloida tuntematon funktion arvo halutussa kohdassa, joka jää muuttujien tunnettujen arvojen väliin. Interpoloinnissa voidaan käyttää käyränsovitusta tai regressioanalyysiä.

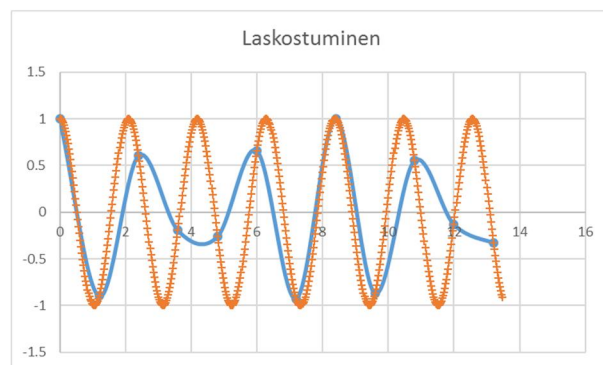
Esimerkki: Käytössä on 14 mittausta muuttujista x ja y . Ne on tehty x -muuttujan suhteen systemaattisesti yhden yksikön välein.

X	Y
0	-0.03
1	0.00
2	0.71
3	1.21
4	1.02
5	2.15
6	2.73
7	2.72
8	2.64
9	2.03
10	1.37
11	0.16
12	-1.98
13	-4.25



Kuva 40. Datapisteet näkyvät sinisinä pallukoina. Ruskea viiva kuvaa "paloittain" ts. "lähimmän naapurin" interpolaatiota, sininen viiva kulkee pisteiden kautta suoranpätkinä ja on lineaarinen interpolaatio, kun taas punainen pisteiviiva on kolmannen asteen polynomi, joka on sovitettu dataan regressioanalyysillä. $Y:n$ arvo ($x:n$ arvolla 9.6) saa eri arvoja riippuen interpolointitekniikasta.

Funktion approksimoinnissa halutaan käyttää vaikeasti käsiteltävän tai työläästi laskettavan funktion lausekkeen sijasta yksinkertaisempaa lauseketta. Silloin voidaan laskea kohdefunktiosta muutama arvo, joihin luodaan interpolaatio sovitamalla siihen yksinkertaisempaa funktiota. Toinen tapa on vaatia approksimaatiolta samanarvoisuutta tärkeissä pisteissä ja että approksimaatiolla on samoja ominaisuuksia kohdefunktion kanssa (esimerkiksi samoja derivaattoja). Koska interpoloivan funktion arvot poikkeavat hieman alkuperäisen funktion arvoista, syntyy tästä interpolaatiovirhettä. Approksimoinnin hyödyt saattavat kuitenkin ylittää siitä koituvat haitat.



Kuva 41. Oranssit pisteet kuvaavat todellista funktiota, olkoon esim. aaltoileva maaston profiili. Siitä on otettu 1.2 yksikön välein mittaus, joita kuvaavat pallot ko. pisteisiin sovitetussa splini-käyrässä.

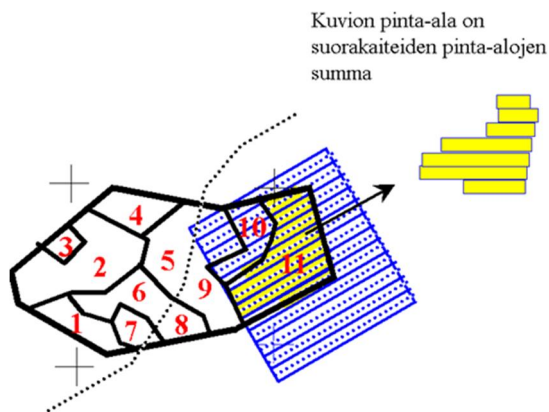
Esimerkkejä approksimaatioista metsänmittauksessa.

- **Metsikön rajat ja pinta-ala.** Raja kahden metsikön välille joudutaan aina asettamaan 'arviona'. On mahdotonta sanoa, missä vanha metsä lakkaa ja taimikko alkaa – täsmälleen ja yksikäsitteisesti.

- **Puun rungon poikkileikkauksen muoto.** Metsänmittauksessa oletetaan yleensä ympyrän muoto.

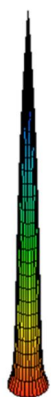
- **Piin arvo.** Puun rungon poikkileikkauksen (ympyrän) pinta-ala on tärkeä suure metsänmittauksessa, kun arvioidaan rungon tilavuutta, joka taas on esimerkiksi yksi puukaupan maksuperusteista. Koska arvioon käytettävä kaava ($v=0.5 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot h$) on likiarvoinen, ei päässälaskussa käytetyn piin arvona tarvitse olla kovin tarkka. Kunhan lopputulokseen tehdään jokin pieni korjaus, jos piin arvona käytetään kokonaislukua kolme.

- **Alueen pinta-ala – integraalina pinturilla** eli poletilla.



Kuva 42. Pinturilla saattoi käsin arvioida kartalle piirretyn alueen pinta-alan (kuva vuodelta 1997). Approksimaatio perustui alueen esittämiseen tasalevyisinä suorakaiteina, jotka ulottuivat rajalta toiselle. Digitaaliselta kartalta pinta-alan saa sulkeutuvan monikulmion (polygon) avulla.

- Puun rungon muodon approksimointi runkokäyrällä.



Suomessa ovat laajalti käytössä polynomimallit, joilla voi arvioida eri puulajien, eri kokoisten puiden rungon läpimitan millä tahansa korkeudella, kun puusta tiedetään pituus ja jokin rungon läpimitta.

Polynomit ovat integroituvia. Jos otaksutaan, että rungon poikkileikkaus on pyöreä, voidaan läpimitan antava polynomi korottaa integraalissa toiseen potenssiin ja kertoa luvulla $\pi/4$ (poikkileikkauksen ala) ja integroida yli halutun rungon korkeusvälin, ja integraalina saadaan rungonosan tilavuus.

Symboleja

π	pii, 3.14159..
Σ	summa
∂	derivaatta
$\in$	kuuluu
$\angle$	kulma
$\perp$	kohtisuoruus

$\Rightarrow$ $A \Rightarrow B$, jos A on totta, B on totta, muuta ei.

$\vee$ ja (looginen)

$\wedge$ tai (looginen)

! kertoma, joskus looginen ei ($\neg$)

$\pm d$ kaksi ratkaisua etäisyyden d päässä

$\times \cdot$ kertomerkkejä; vektori- ja pistetulo vektoreilla

$\int$ integraali (lukuväli, alue, viiva, ...)

... jokin kuvio jatkuu / toistuu

∞ ääretön

$= \neq$ yhtäsuuruus, erisuuruus

$\Leftrightarrow$ $P \Leftrightarrow Q$, jos P niin Q, ja P epätosi jos Q epätosi

$\approx$ likimääräinen yhtäsuuruus

$\sim$ $X \sim N$; X jakautunut N jakauman mukaisesti

$>, <$ suurempi/pienempi kuin

$\leq, \geq$ suurempi/pienempi tai yhtä suuri kuin

$|\mathbf{x}|$ vektorin pituus

A, b Matriisi A, vektori b

$[a, b]$ suljettu väli

(a, b) avoin väli $[a, b]$ puoliavoin väli

N Luonnolliset luvut

$\mathbb{R}, R$ reaalityöt

Z kokonaisluvut

$\{ \}$ tyhjä joukko

$\cup, \cap$ unioni, leikkaus

Δ muutos

P todennäköisyys

Muunnoksia ym.

Sentti	$0.01 \times$	senttimetri = 0.01 m
Desi	$0.1 \times$	desimetri = 0.1 m
		kuutiometri = 1 dm^3 (litra) = 0.001 m ³
Hehto	$100 \times$	hehtaari = 100 aaria = $100 \times 100 \text{ m}^2$
Kilo	$1000 \times$	kilometri = 1000 m
		kilogramma = 1000g
Täysi ympyrä		360 astetta tai 2π radiaania
Tuuma		2.54 cm

Tilastotiedettä

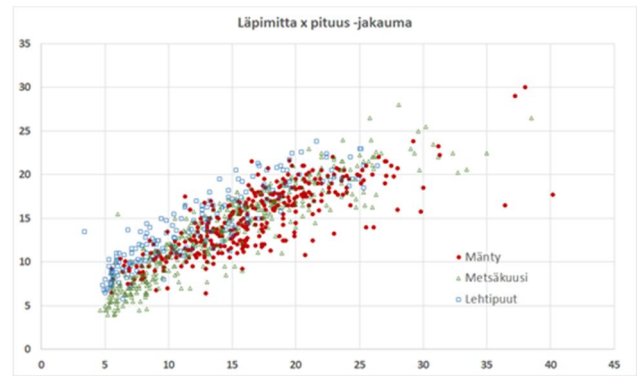
Tilastotiede on todennäköisyyslaskentaan perustuva tieteenala, joka tutkii tilastollisten aineistojen keräämistä, käsittelyä ja tältä pohjalta tehtävää päättelyä.

Metsänmittauksessa syntyy yleensä suuria havaintoaineistoja, esimerkiksi ilma- tai satelliittikuvia käytettäessä pikseli-havainnot voi olla tuhansia tai jopa miljoonia hehtaaria eli 100×100 m alueella. Maastosta kertyy havainnot puista, kasvupaikasta, toimenpidetarpeesta jne. Tilastollinen mallinnus on tarpeen, kun ennustetaan jotain vaikeasti havaittavaa ilmiötä helpommin havaittavien selittävien muuttujien avulla, tai kun tutkitaan jonkin ilmiön takana olevia lainalaisuuksia, selittäviä tekijöitä ja niiden selitysvoimaa. Toisaalta **otanta-teoriaa** tarvitaan, kun tehdään päätelmiä tulosten luotettavuudesta tai asetetaan estimoiduille parametrien (population tunnuksille) arvoille luottamusvälit, esim. pohdittaessa etukäteen, millainen määrä mittauksia tarvitaan.

Havaintoaineiston kuvailu



Kuva 43. Puun pituuden (h) ja läpimitan (d_{13}) mittaus. MARV3-kurssi Toivala Siilinjärvi 1997.



Kuva 44. 56,8 hehtaarin inventoinnissa (Luku 1.3.3 Puiden mittaus ilmakuvilta ja laserkeilaushavainnoista, puu kerrallaan) mitatut 961 koepuuta, ja mittauksista johdettu rungon läpimitan (cm) ja pituuden (m) välinen yhteisjakauma (xy-scatterplot Excelissä).

Kuva 44 esittää yhteisjakauman maastomittaushavainnoista, jotka metsäylioppilaat tekivät vuonna 2007 (kts. luku 1.3.3 Puiden mittaus ilmakuvilta ja laserkeilaushavainnoista, puu kerrallaan) inventoitavalta metsäalueelta. **Havaintoaineiston kuvailu** on aineiston esittämistä joko numeerisesti tai graafisesti. Havaitusta aineistosta voidaan laskea tunnuslukuja, jotka kuvaavat muuttujien ominaisuuksia. Kuva 44 kertoo mm., että koivut ovat hoikempia ja saavuttamat suuremman pituuden samalla rungon läpimitalla. Pisimmät puut ovat olleet 30-metrisiä ja paksuimmat rungot 40 cm. Pienimmätkin männyt ovat suurempia kuin muut puulajit, minkä osin selittää se, että mänty on valopuu. Kuvaajan painopiste on noin (14 cm, 14 m). Koska puut on valittu valitsemalla joka kolmas puu pituusmittaukseen (eli kaikilla koealoihin osuneilla puilla on ollut sama 33,3% todennäköisyys tulla mitatuksi myös pituuden osalta), voi kuvaajasta karkeasti päätellä, että kuusi on yleisin puulaji alueella. Kuvaajassa näkyy myös joitakin epäilyttäviä (poikkeavia) havainnot, joiden kohdalla voi epäillä mittausvirhettä, joko pituus- tai lpm-mittauksessa – emme voi tietää kummissa. Selkeästi läpimittaa 5 cm pienempiä puita on vähän. Todennäköisesti 46 mm on ollut alaraja mittaukseen mukaan otettavan puun koolle – opiskelijat ovat ensin karkeasti määrittäneet mitattavat puut ("yli 5 cm"), ja joukkoon on tullut myös pienempiä, ja, joskus on ehkä jäänyt hieman yli 5 cm puita vastineeksi pois.

Koko aineistossa, joka koostuu 59 koealan mittauksista, on 3630 puuhavaintoa. (MARV4_2007_maasto_aineisto.xlsm).

Aineiston tarkastelu Excel-ohjelmassa Data | Filter -toiminnolla (Kuva 45) paljasti, että puista 1219 on mäntyjä, 1750 näreitä (kuusia), 548 koivuja, 27 haapoja, 42 harmaaleppää, 15 raitaa, 4 pihlajaa jne. Tämä on alueen puulajijakauman (parametri) estimaatti. Puulaji on **luokka-asteikollinen** muuttuja. Jakauman moodi eli yleisin havainto on näre. Jakautuma antaa kuvan metsäalueesta.

TÄRKEÄ Kts. <https://fi.wikipedia.org/wiki/Mitta-asteikko>

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Plot-ID	Tree-ID	STRS-st	Field-S	Elossa	Sp-fotd	Sp-ref	d13-ref
8	37	13						6.8
21	37	48						13.6
22	37	53						12.8
25	37	60						12.4
26	37	61						10.6
28	37	65						15.9
29	37	66						15.8
33	37	72						8.5
34	37	76						13
35	37	78						12.9
37	37	90						9.9
42	37	113						17.5
45	37	123						11.6
49	37	133						9.6
51	37	137						13.9
57	37	202						9.8
58	37	203						8.7
62	37	207						6.8
70	37	215						6.6
71	37	216						6.7
73	37	218						6.8

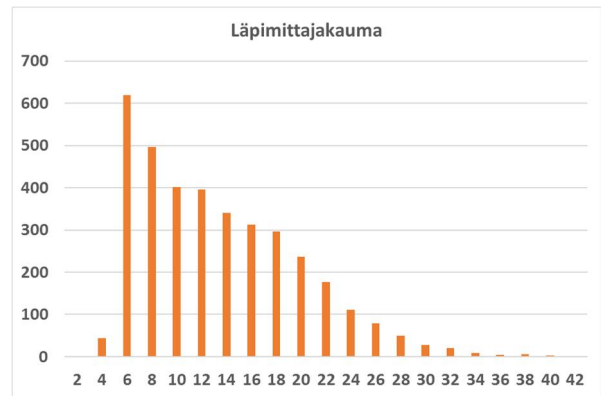
Kuva 45. Havaintoaineiston ensimmäiset muuttujat ovat koealan tunnus, puun numero, havaintotapa, puun tila, puulaji, rungon läpimitta jne. Kuvassa on valittu muuttuja sp-ref eli maastossa havaittu puulaji. 1 = mä, 2 = näre, 3 ja 4 = koivut, 5 = haapa jne.

Aineistoa kuvaavia tunnuslukuja ovat jakaumatunnukset, kuten edellä ollut puulajin **moodi**. Läpimittajakauman **mini-mi** on 2.9 cm, **maksimi** 42.0 cm, **mediaani** 12.3 cm, aritmeettinen **keskiarvo** 13.5 cm, sekä ala- ja yläkvartiilit 8.0 ja 17.7 cm. Mediaania suurempia ja pienempiä havaintoja on yhtä paljon, se on 50. prosenttipiste. Ala- ja yläkvartiilit ovat 25 % ja 75 %:n jakaumapisteet. Excel ohjelmassa alakvartiiliin saa funktiolla PERCENTILE(sarake, 0.25), kun "sarake" solurefrenssi viittaa läpimitat sisältävään taulukon sarakkeeseen. AVERAGE(), MIN(), MEDIAN() ja MAX() antavat muut mainitut tunnusluvut Excel-ohjelmassa.

Läpimittahavainnot (**suhde-asteikollinen muuttuja**) jakautuvat siis välille 2.9-42.0 cm. Melko suurella todennäköisyydellä suurin läpimitta 56.8 hehtaarin metsäalueella on yli 42 cm – sellainen puu ei vain osunut otokseen, joka kattoi 4% alueesta (59 kpl 0.04 ha koealoja 56.8 hehtaarin alueella). Samoin havaitsematta ovat voineet jäädä muutamat tervalepät ja metsälehmukset. LPM-jakaumasta voi laskea **keskihajonnan** (s) STDEV(P)-funktioilla. Se on 6.5 cm. Yleinen tulkinna on, että keskiarvo $\pm$ s sisältää noin 68% havainnosta. 2608 puun läpimitta osui tuohon väliin (tarkastelu Excelin Filter toiminnolla). Se on 70 % kaikista puista. 68% pätee tarkasti normaalijakaumalle. **Varianssi** on keskihajonnan toinen potenssi – hajonnan mitta. Tarkastellaan seuraavaksi läpimitan frekvenssijakaumaa inventoidulla alueella.

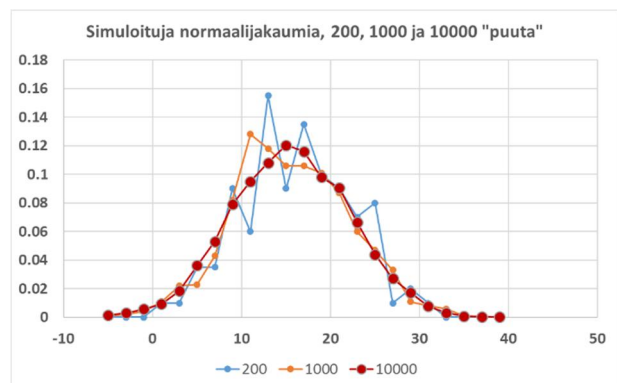
Sen saa kätevästi Excelin FREQUENCY() funktiolla (kts. esim. ME-017 kurssin ohjeet). Histogrammi (Kuva 46) katkeaa 3-5 cm luokkaan. Pieniä puita on runsaasti metsissä, joissa alikasvosta ei ole raivattu, ja jos myös 46 mm pienempiä puita olisi mitattu, jakauman kuvaaja olisi todennäköisesti jatkanut nousuaan pienemmissä lpm-luokissa. Alue oli sikäli poikkeuksellinen, että nuorimmat puustot olivat 25-vuotiaita eli taimikot ja riukuvaiheen metsiköt puuttuivat alueelta ja mitausaineistosta kokonaan. Tällainen metsäalueen rakenne voi syntyä, kun jonakin ajanjaksona tehdään runsaasti uudistamista, eikä jäljelle jäävää uudistuskypsää metsää haluta hakata. Tällä 56.8 hehtaarin Juupajoen valtionmaalla on vuosikymmenet säästetty ns. Kalelan kuusikkoa. LPM-jakauma ei

juurikaan muistuta normaalijakaumaa. Kuvan jakaumaa (runkolukusarjaa) kutsutaan käänteiseksi J-jakaumaksi.



Kuva 46. 56.8 hehtaarin metsäalueen puiden lukumäärä läpimittaluokittain. Koealoja on 59, kukin 0.04 ha kooltaan, eli mitattua metsää oli 2.36 ha mikä on 4.1% koko pinta-alasta. Tämä oli inventoinnin otantasuhde. Luvut x-akselilla ovat 2 cm läpimittaluokkien keskikohtia.

Millainen olisi läpimittojen normaalijakauma? Edellä esitetty histogrammi approksimoi metsäalueen yli 46 mm paksujen puiden (tuntematonta, todellista) läpimittajakaumaa. Teoreettisista todennäköisyysjakaumista tunnetuin on normaalijakauma, jolla on jokin odotusarvo ja varianssi (tai keskihajonta) (Kuva 47).



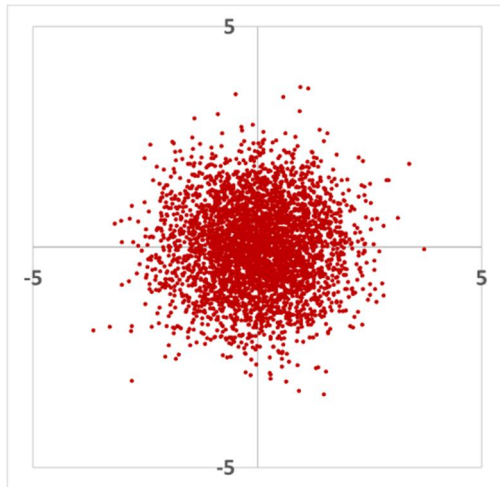
Kuva 47. Excel ohjelman NORMINV() funktiolla voi simuloida havaintoja halutusta normaalijakaumasta, tässä $\sim N(13.5, 6.5^2)$. Puiden läpimittoja on simuloitu 200, 1000 ja 10000 kertaa. Kun "puita" on 10000, ei simuloidun jakauman muoto enää poikkea juurikaan 'kellokäyrästä'. Kun taas 200 tai 1000 puun otoksissa satunnaisvaihtelu tuottaa vielä selkeitä poikkeamia.

Yhteisvaihtelu

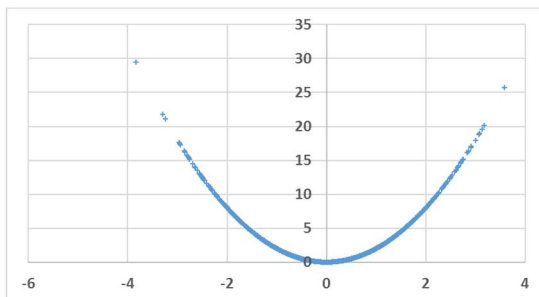
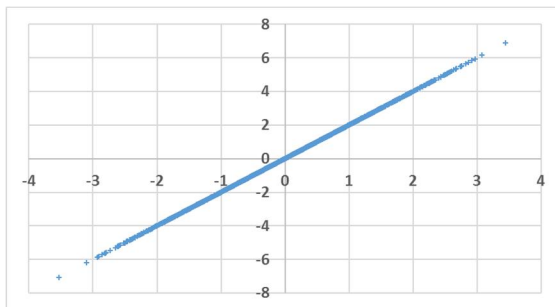
Läpimitan ja pituuden yhteisjakaumasta (Kuva 44) näkee, että tietyllä läpimitalla pituus ei saa mitään tahansa arvoja. Pituisuuden odotusarvo muuttuu läpimitan vaihdellaessa ja riippuvuudessa on puulajien välillä eroja. Läpimitaltaan 5 cm kuuset ja lehtipuut ovat keskimäärin eri mittaisia ja koivut kaikkiaan solakampia kuin männyt tai kuuset.

Pituus ja läpimitta eivät ole **riippumattomia muuttujia**. Jos ne olisivat, niiden arvoihin ei vaikuttaisi mitään satunnaisia eli stokastisia mekanismeja. Jos kaksi muuttujaa ovat **täysin riippuvia** toisistaan, määrää toisen arvo toisen, ja päinvastoin.

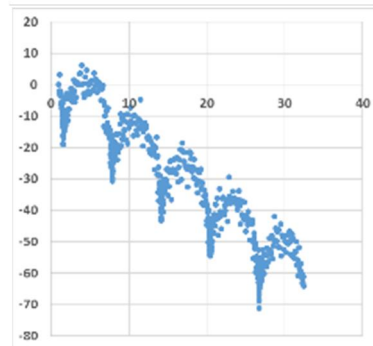
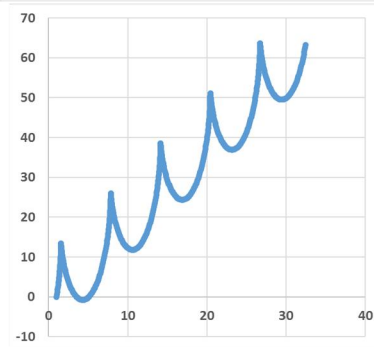
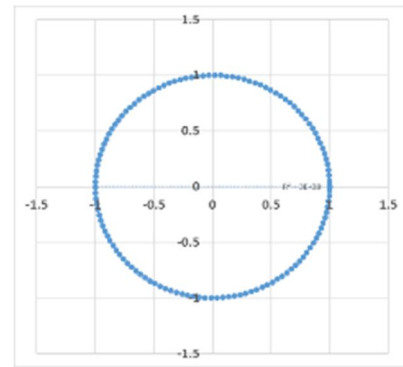
Siinä missä varianssi ja keskihajonta mittaavat yhden muuttujan hajontaa, mittaa kovarianssi kahden muuttujan riippuvuutta. Excel-ohjelmassa COVAR() -funktio antaa kovarianssin. CORREL() antaa korrelaatiokertoimen, joka vaihtelee -1 ja +1 välillä, ja on normalisoitu lineaarisen riippuvuuden voimakkuuden ja suunnan mitta. Esimerkkejä: Kuva 49 ja Kuva 50.



Kuva 48. Kahden riippumattoman normaalijakautuneen ($N(0,1)$) satunnaismuuttujan kovarianssi on $\sim$ nolla. 3000 simuloitua lukuparia.



Kuva 49. Kaksi esimerkkiä täysin toisistaan riippuvista muuttujista. Ylemmässä kuvassa riippuvuus on täydellistä ja korrelaatiokerroin on +1. Jälkimmäisessä tapauksessa riippuvuus on epälineaarista, ja samaan y :n arvoon johtaa kaksi eri x :n arvoa ja korrelaatiokerroin lähestyy nollaa.



Kuva 50. Korrelaatiokertoimet nolla, +0.92 ja -0.91.

Metsätieto on paikkatietoa, eli siihen voi liittää XY tai XYZ koordinaatit. Usein aika ajatellaan neljänneksi dimensioksi ja liitetään muutoksen arviointiin tai ennustamiseen.

Puu sijaitsee XY pisteessä, kun ajatellaan rungon poikileikkauksen keskipistettä jollakin korkeudella. Tuota pistettä ei voida suoraan havaita. Muutenhan puu on 3-ulotteinen olio, jonka latvus on fraktaalinen, täynnä reikiä. Puulla on lähin naapuri. Aivan vieressä voi olla pieni puu, jonka latvus ei ulotu tarkasteltavan puun latvuksen tasolle, mutta vähän kauempana on naapuri, jonka latvus peittää tarkasteltavan puun. Spatiaalisuus on muutakin kuin taso-koordinaatteja (XY).

Puita on tiheässä tai harvassa - riveissä tai satunnaisissa paikoissa, ryhmissä tai yksittäin. Ryhmittäinen tilajärjestys valitsee esim. kermirämeillä tai sekatyypin korvissa, joissa puut esiintyvät pääosin mätäspinoilla avosuon suotyypin valitessa muualla (Kuva 51). Yhden puun latvus "peittää" tietyn alueen, ja latvukset voivat olla "lomittain". Myös juuristo leviää melko kauas rungosta. Puut vaikuttavat toisiinsa, ja kasvupaikan ominaisuuksien paikallinen vaihtelu näkyy puisa. Ilmasto vaikuttaa isommassa mittakaavassa, poikkeuksena vuoristoalueet, missä vaikutukset kasvillisuuteen voivat näkyä lyhyelläkin etäisyydellä. Puhutaan Järvi-Suomen männyköistä ja rannikkoalueiden metsistä. Tunturia kivutessa voi vastaan tulla metsänraja. Etelä-Suomen kuusikoita vaivaa maannousemasieni - kun löytää yhden sienien vaurioittaman rungon - on todennäköistä, että läheltä löytyy toinen ja kolmaskin. Ilmiö on paikallinen. Sama pätee haapaan, yhden rungon löytymisen jälkeen on todennäköistä löytää läheltä toinenkin runko. Rämeellä ruoppapintaa reunustaa usein kuljuille ominainen kasvillisuus pikemmin kuin korkea rämemätäs. Rinteen alaosa on usein yläosaa rehevämpi. Voidaan puhua spatiaalista lainalaisuuksista tai riippuvuussuhteista.

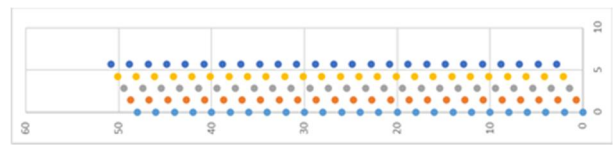


Kuva 51. Puut kermirämeillä kasvavat ryhmittäin, pitkällä mättäillä.

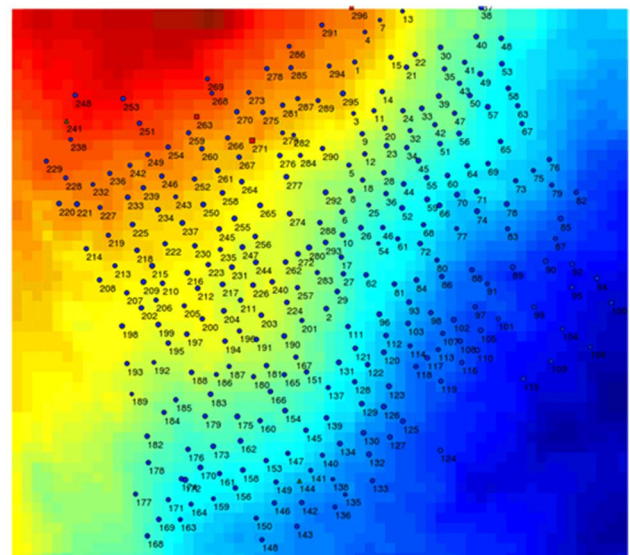
Edellä olevaan liittyen, metsikkö on eräässä mielessä "ominaisuksiltaan yhtenäinen alue". Metsässä liikuttaessa siirtymisen metsiköstä toiseen voi huomata selkeästi: esim. maa-
luokan vaihtuessa kangasmaasta turvemaahan tai puuston vaihtuessa 50-vuotiaasta istutusmetsästä taimikoksi. Toisaal-

ta puut itse eivät tiedä, missä metsikössä ne kasvavat. Metsikön sisällä metsikön ominaisuuksien vaihtelu on tietyissä rajoissa ja vaihtelu voi olla satunnaista tai trendinomaista. Vaihtelua voivat tuottaa maan tuotoskyvyn vaihtelu, puustoa kohdanneet tuhot, ja muu luonnonvaihtelu tai ihmistoiminnan vaikutukset. Metsikkö on subjektiivinen käsite ja metsä-
alueen jako yhtenäisiin metsiköihin tai kuvioihin ei ole yksikäsitteistä, mutta taustalla on ajatus spatiaalisesta yhtenäisyydestä ja vaihtelusta, joka "vielä mahtuu" yhden metsikön sisään. Lisäksi esim. puunkorjuun huomioiva kuviointi ei tuota liian pieniä metsiköitä (tulevaisuuden leimikoita) tai sisällyttä talvikorjuuta vaativaa metsän osaa samaan kuvioon (metsikköön).

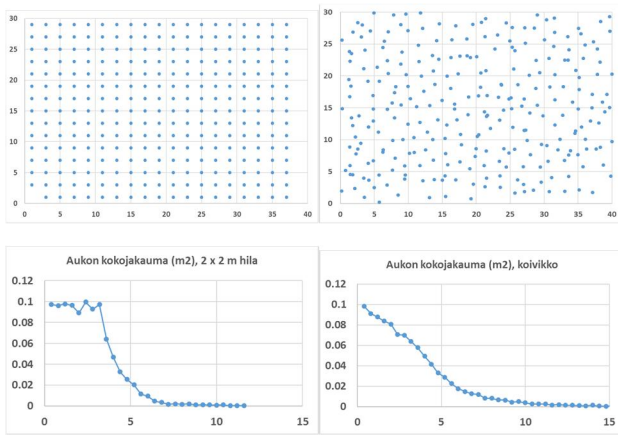
Metsän uudistamisen tavoitteena on yleensä kasvupaikalle oikeaa (haluttua) puolajia oleva taimikko, josta voi kasvattaa pitkän ajan kuluessa tavoitteiden mukaisen puuston. Tavoitetaimikko voidaan muotoilla esim. puuston tiheytenä, tasaisuutena ja puolajavaihteluna. "Kymmenen vuoden iällä 2000 närettä ja 500 koivua hehtaarilla s.e. molempien tilajärjestys on tasainen - ei suuria reikiä tai ryppeitä". Puut täytävät kasvutilan parhaiten, jos ne istutetaan kuusikolmioiden kärkein (vrt. mehiläisten kennot). Tämä tilajärjestys on mahdollista saavuttaa plantaasimetsässä tai peltomaalla.



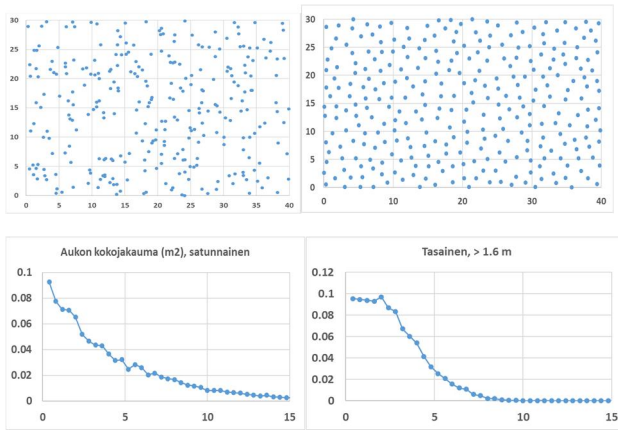
Kuva 52. Optimaalinen tilajärjestys.



Kuva 53. Erään 25-vuotiaan istutuskovikon (pituus 13-15 m) puukartta (MARV-koeala #132, Hyytiälä). Puut on istutettu ja puustoa (latvuk-
sia) on hoidettu pyrkien tasaiseen tilajärjestykseen. Aukot johtuvat kal-
lioista, kivistä ja kuolleisuudesta. Väritys tulee maaston korkeusmallis-
ta. Puusto sijaitsee kaakkois-etelärinteessä



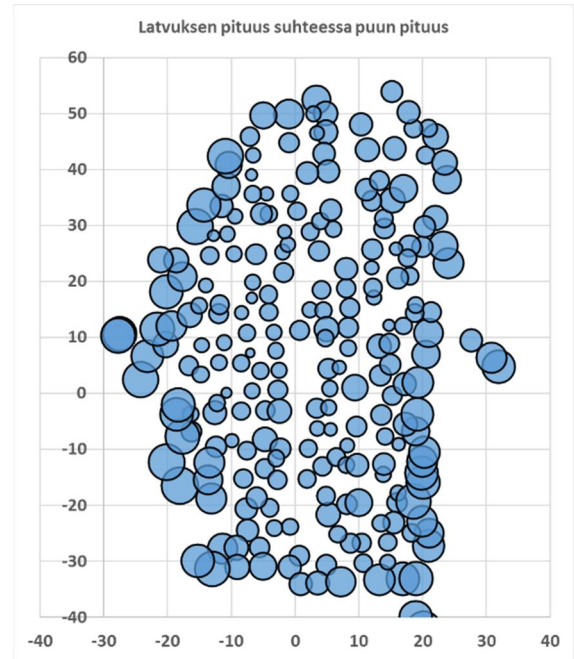
Kuva 54. Jos puut sijaitsevat 2 x 2 m hilassa (vasen) tai kuten istutuskoivikossa (oikea), ja alueelle sijoitetaan satunnaisia pisteitä (10000), ja niistä lasketaan etäisyys lähimpään puuhun, ja tästä ympyrän muotoisen aukon pinta-ala ("pisteeseen mahtuva aukko"), saadaan alemmien kuvien mukaiset aukkojen pinta-alajakaumat.



Kuva 55. Satunnainen tilajärjestys ja tasainen-satunnainen tilajärjestys. Ensimmäisessä pisteiden paikat on saatu arpomalla x- ja y-koordinaatit tasajakautuneesti (Excel rand()-funktio), jälkimmäisessä tapauksessa puiden paikat on arvottu samalla tavalla, mutta arvottu sijainti on hylätty, jos se on osunut 1.6 m lähemmäs jo luotua puuta. Aukkojen kokojakauman muoto lähestyy "lineaarisesti laskevaa" satunnaisessa tilajärjestyksessä. Tasaisen tilajärjestyksen pinta-alajakauma muistuttaa hila-tapausta.

Suomalaisissa metsissä puiden tilajärjestystä "rikkovat" ajourat, jotka tehdään ensimmäisen koneellisen harvennuksen yhteydessä. Ojitusalueilla ajourat (ja kunnostusojat) voidaan tehdä saran keskelle, jolloin "raitoja riittää", kun sekä ojalinjat että ajourat pidetään puustosta vapaana. Plantaasimetsissä, jossa harvennuksia ei tunneta, ei tarvita ajouria ja puut istutetaan riveihin.

Tilajärjestyksessä on myös trendejä (Kuva 56). Se taimikon osa, joka rajautuu varttuneeseen varjostavaan (+ juuristokilpailu) puustoon, kehittyy eri tahtiin muun taimikon puuston kanssa. Rinteissä on usein havaittavissa ilmiö, jossa kasvupaikan puuntuotoskyky paranee alarinteeseen kuljettaessa, huonontuen ehkä jälleen notkossa, soistumisen takia.



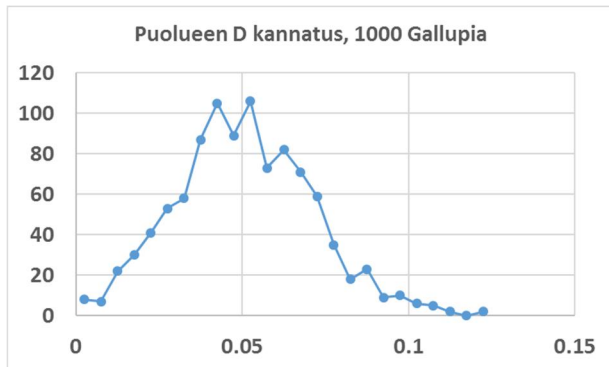
Kuva 56. Trendinomainen vaihtelu. 70-vuotias kuusikko rajautuu niittyyn idässä ja nyt 30-vuotiaaseen puustoon lännessä. Reunametsän puiden latvussuhde poikkeaa vallitsevien valo-olosuhteiden takia, ja latvukset ovat pidempiä, ja rungot tyvekkäämpiä. Muistokuusikko, Hyypiälä.

Otanta

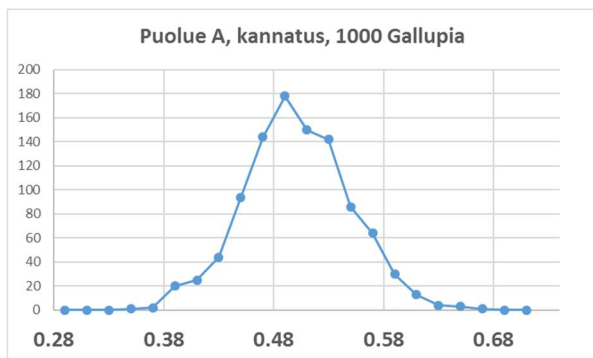
Kyselytutkimusesimerkki (otanta)

Oletetaan, että eräässä kunnassa on 1000 äänestäjää, jotka kaikki aikovat käyttää äänioikeuttaan. Tarkastelua varten "tiedetään", että heistä 50 % äänestää puoluetta A, 30 % puoluetta B, 15 % puoluetta C ja 5 % puoluetta D.

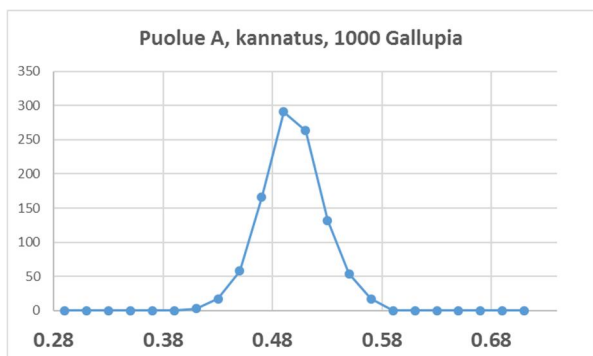
Kunnan sanomalehti on kiinnostunut teettämään kyselyn puolueiden kannatusluvuista. Heillä on varaa haastatella 100 äänestäjää. Voimme antaa tietokoneen tehdä 1000 Gallupia, joissa kussakin haastatellaan 100 kuntalaista.



Kuva 57. 1000 Gallupin tulosten jakauma puolueen D osalta (5 % todellinen kannatus)). Kaikkien kyselyiden tulosten keskiarvo on 5.0 %. 67 % tuloksista oli $\pm 2\%$ oikeasta kannatuksesta. Joka kymmenes toistettu kysely tuotti puolueen kannatusprosentiksi joko alle 2% tai yli 10%. 100 haastateltua henkilöä per gallup.



Kuva 58. Puolueen A "kannatuksen vaihtelu" 1000 kyselytutkimuksessa, joissa haastateltiin 100 henkilöä. 32% tapauksista oli $\pm 2\%$ sisällä, 70% $\pm 5\%$ sisällä.

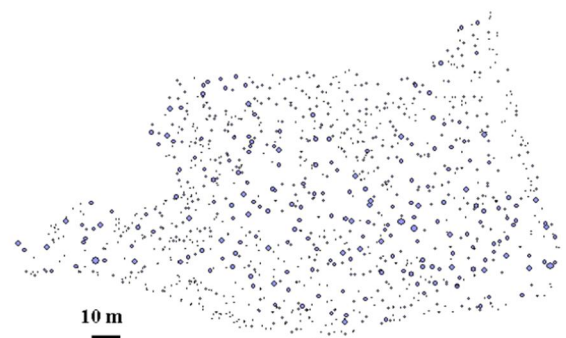


Kuva 59. Tulokset, kun haastateltavia oli 250 eli joka neljäs äänioikeutettu. Vaihtelu on pienempää.

Otantasimulaatiot osoittavat, että 100 haastatellun Gallupit ovat melko luotettavia, vaikka harvinaisissa tapauksissa puolueen D kannatuksiksi (5 %) voikin tulla 0 % tai jopa yli 10 %. Puolueen A kannatus (50%) vaihteli otoksissa välillä 36-68 % toistetuissa kyselyissä. Kaava $(p \times (p-1)) / \sqrt{n}$ antaa osuuden keskivirheen satunnaisotannassa. Tässä n oli 100 ja p joko 0.05 tai 0.5. Arvolla 0.5 (puolue A) keskivirheeksi saadaan 0.05, eli noin 68% tapauksista pitäisi olla $\pm 5\%$ oikeasta tuloksesta ja tämä päti melko tarkkaan (Kuva 58). Puolueen D tapauksessa kaava antaa keskivirheeksi 2.1 %. Sekin päti melko tarkkaan 1000 toistetun kyselyn aineistossa (Kuva 57). Tulokset tarkentuivat, kun otoskoko kasvatettiin 100:sta haastatellusta 250:een (Kuva 59) eli otantasuhdetta kasvatettiin 25%:iin (1000 asukasta).

Metsään sovellettuna puolueet voisivat vastata puulajeja, ja puolueiden kannatusprosentit metsäalueen puulajisuhteita, jotka saadaan mittaamalla osajoukko alueen puista otokseen. Äänestysioikeutetut kuntalaiset eli tutkittava populaatio on luetteloitu, ja otantaan pohjautuva kysely voidaan suorittaa soittamalla, kirjeitse, kotikäynteinä jne. Tärkeää on huolehtia satunnaistuksesta eli siitä, että kaikilla kuntalaisilla (populaation alkiolla) on sama tai ainakin tunnettu todennäköisyys tulla haastatelluksi. Äänioikeutetuilla on yleensä SOTU ja postiosoite. Silti, kaikkia ei ehkä voida saavuttaa ja syyt voivat kytkeytyä siihen, mitä puoluetta ko. henkilö saattaisi äänestää. Tällöin otantaan pohjautuvat tulokset eivät koskaan voi olla virheettömiä. Näissä tilanteissa pyritään lisätutkimuksin korjaamaan tulosten vääristymiä. Esimerkiksi sopii vaalivalvojaisten ennusteiden laskenta, joka pohjaa ennako-oletuksiin (todennäköisyyksiin) laskentaa odottavista vaalipiireistä.

Metsäesimerkki (otanta)



Kuva 60. Eräaseen tutkimukseen kartoitettiin puita (cm-tarkasti takymetrillä) noin 2 hehtaarin alueelta.

Puita kuten äänestäjiä on rajallinen lukumäärä. Useimmiten emme kuitenkaan tiedä puista ennakkoon paljoa. Käytössä saattaa olla ilmakuvia ja vanhoja mittaustietoja, joiden perusteella voi tehdä päätelmiä siitä, mistä puulajeista ja minkäkoisista puista mitattava puujoukko likipitään koostuu. "Puun SOTU" voisi olla sen sijainti kartalla, piste yleisessä koordinaatistossa. Paikka yksilöi puun tarkasti (Kuva 60), ainakin milloin kyse on pystypuusta. Kaatunut tai katkennut runko ei enää olekaan yhtä helposti yksilöitävissä sijainnin avulla. Metsässä on myös muitakin kuin puita. Muurahaispesät ovat pistemäisiä kohteita, joilla on pinta-ala ja tilavuus. Niille voidaan määrittää lukumäärä (kpl alueella) tai tiheys (kpl/ha).

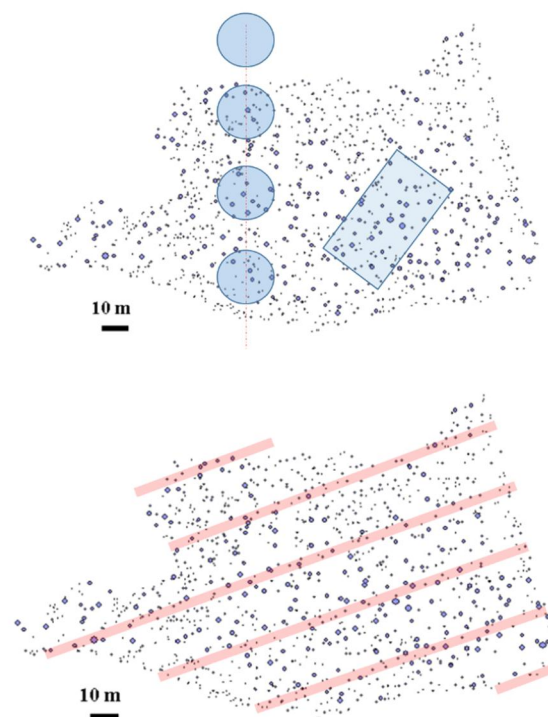
Mustikka-, rahkasammal- tai poronjäkäläkasvustot muodostavat laukkuja ja niille voidaan määrittää osuus (%) kokonaispinta-alasta. Tällöinkin eteen voi tulla haastavia tilanteita, jos esim. mustikkakasvusto on harvaa tai siinä on muitakin varpuja mukana. Tässä on kuitenkin enemmän kyse havaintojen teon (määritelmällisestä) vaikeudesta kuin otannan järjestämisen haasteista.

Jos mielenkiinnon kohteena oleva populaatio koostuu jonkin alueen puista, tulee alue pystyä yksilöimään ja rajaamaan tarkasti, jotta otannassa voidaan taata kaikille puille sama tai tunnettu todennäköisyys tulla mukaan otokseen eli mitatuksi. Hakkuuseen tuleva leimikko rajataan usein tarkasti ja selkeästi kuitunauhoin, jotta esim. naapurin puiden kaatamisen todennäköisyys olisi nolla. Leimikon rajausta määrittää alueen ja puujoukon. Alueelle voidaan laskea pinta-ala. Useissa tapauksissa ei kuitenkaan ole helppoa määrittää, mihin yksi metsikkö loppuu, ja mistä toinen alkaa. Taimikon reunassa, jossa vastaan tulee vanhaa metsää, raja voidaan laittaa kulkemaan reunimmaisten isojen puiden kautta, tai jostakin niiden ja taimien väliltä, ja toisaalta taimia voi kasvaa isojen puiden alla reunavaikutuksen ansioista. Tämä voi tuntua pilkun viilaamiselta, mutta pinta-alan tarkka määrittäminen on tarpeen, kun kaikkia puita ei mitata, vaan otannalla pyritään selvittämään esim. keskimääräinen puuston tiheys (puita / ha), joka sitten kerrotaan alueen pinta-alalla, jolloin saadaan arvion puiden lukumäärästä alueella. Tätä vastaa tilanne, jossa jokin kysely tehtäisiin maakunnittain, ja saadut luvut (esim. Vihreät ry:n kannatus) painotettaisiin koko maan tuloksiksi kunkin maakunnan asukasluvun perusteella.

Kuinka sitten metsästä (puista) kerätään otannalla havaintoja? Jos tavoitteena on, että kaikilla puilla on sama todennäköisyys tulla otantaan, voidaan harvesterin kaatamista puista ottaa esim. joka kymmenes sivuun mitattavaksi otokseen (vaikka puuaineen laadun selvittämistä varten). Tämäkään tilanne ei ole optimaalinen, sillä pienet puut saattavat jäädä hakkuun ulkopuolelle. Seuraava vaihtoehto olisi rajata alue tiheään asennetuin rajaseipäin ja luetteloida puut esim. kiinnittämällä jokaiseen puuhun lappu, jossa on juokseva numerointi (1...N) eli "SOTUt", ja suorittaa sen jälkeen satunnaisotannan toteuttava arvonta (arvotaan numerolappuja korista), jonka perusteella valittaisiin mitatuiksi tulevat puut. Jos numerointi (puidenluku) tehtiin jollakin tavalla systemaattisesti (esim. kaistoissa), löytyvät otokseen arvotut puut rajallisessa ajassa ja niistä voidaan mitata haluttuja tunnuk-
sia, esim. puulaji. Jos luetteloituja puita on kaikkiaan (N) 1000 kpl, ja otoskoko oli 10 puuta, ja näistä 25 oli mentyjä, on mentyjen kokonaismäärän estimaatti $25/10 \times 1000$ eli 2500 kpl. Esitetty otanta on erittäin työläs toteuttaa, mutta sivutuotteena saadaan puiden kokonaismäärä ja tällöin alueen pinta-alaa ei tarvitse arvioida. Tämä esimerkki kuvastaa kahta tapaa ajatella metsikköä – **1)** äärellinen puujoukko (tai kivien, muurahaispesien tai muiden pistemäisten kohteiden joukko) – **2)** sulkeutuvan murtoviivan sisään jäävä alue, jolla on pinta-ala. Jos luovumme populaation luetteloinnista puiden mitauksen ja otannan tapauksessa, jää jäljelle vaihtoehto 2), eli populaatio sijaitsee metsikössä (alueella), jolla on pinta-ala ja rajat.

Kuva 61 havainnollistaa, kuinka metsästä voidaan mitata otokseen ”pinta-alaa ja sillä kasvavat puut”. Pinta-alaa kertyy

yhdestä tai useammasta satunnaisesti sijoitetusta koelasta tai kaistasta. Otantasuhde lasketaan pinta-alojen avulla. Yleisesti voidaan sanoa, että mitä enemmän otos sisältää pinta-alaa ja puita, sitä tarkemmat tulokset ovat, eli sitä pienempi on otannasta johtuva tulosten epävarmuus koko alueen tuloksissa. Tavoite on aina suorittaa otanta siten, että siitä ei aiheudu systemaattista virhettä (esim. voi syntyä jos otannassa vältetään metsän reunoja tai vaikeasti saavutettavia alueita), ja, että saatujen tulosten luottamusvälit ovat kapeat.



Kuva 61. Satunnaisuudesta huolehtiminen otannan yhteydessä (mitkä puut mitataan otokseen, mitkä jäävät otoksen ulkopuolelle) ”vaatii omat temppunsa”. Kuviolta voidaan mitata näytealoja (pinta-alaa ja sillä kasvavat puut), esim. ympyräkoealoja, suorakaidealoja, kaistoja.

Otannasta seuraa aina kustannuksia ja siksi se kannattaa tehdä järkevästi. Jos tiedetään, että jonkin alueen puut on istutettu samaan aikaan ja puustoa on hoidettu pyrkien tasaiseen metsän rakenteeseen, voidaan ajatella että tällaiseen alueeseen ei tarvitse kohdentaa yhtä paljon otantaa (otoskoko) ja mittauksia verrattuna alueeseen, jonka puuston rakenne on vaihtelevampaa.

Kuva 61 havainnollistaa myös metsän kaista-arviointia (harvinainen menetelmä), jossa mitataan kaikki kaistalla eteen tulevat puut, kaistan alusta loppuun. Kun tutkitaan puiden keskimääräisiä ominaisuuksia ”kaistan varrella”, huomataan usein, että ominaisuudet muuttuvat asteittain eli vierekkäiset alueet ovat korreloituneita. Tästä seuraa, ettei kaistaa välttämättä ole järkevää mitata ”yhtenä pötkönä”, vaan pitää välissä taukoja, jotta puuston ominaisuudet ehtivät muuttua ja satsata useampaan ”pötköön” sijoitettuna eri puolille aluetta. Tilannetta voisi verrata mielipidekyselyyn, jossa kuljetaan katua talosta toiseen ”hienostasuinalueella”, jossa kaikkeilla on ”sama (korreloitunut) mielipide” johonkin yhteiskunnalliseen kysymykseen. Sen sijaan kannattaa jättää puoli katua

haastatteleematta ja "vaihtaa hoodia", jotta samoilla resursseilla saadaan tehokkaammat estimaattorit mielipiteistä. Korrelaatio "vähentää todellisten edustavien havaintojen määrää".

Tilastolliset mallit

Mallit ovat metsänarvioimistieteessä tärkeitä. Niiden avulla voidaan tutkia ja simuloida ilmiöitä - laatia tulevaisuuden skenaarioita, tai johtaa vaikeasti mitattavia tunnuksia helpommin mitattavien tunnusten avulla.

Esimerkkejä metsää koskevista malleista voisivat olla:

- Metsä- ja suotyyppit
Luokka = f (kasvillisuuspiirteitä)
- Puuston kokojakaumamallit
Puiden kokojakauma = f (puulaji, puuston ikä, keskiläpimitta, jne.)
- Puun biomassaositteiden estimointimallit
Oksabiomassa = f (puulaji, puun läpimitta)
- Puiden syntymis-, kasvu- ja kuolemismallit
 $P_{kuolee_5v_aikana} = f$ (puulaji, ikä, puuston tiheys, puun metsikköasema)
- Hiilitasemallit
 CO_2 (kg/ha/a) = f (kasvupaikka, puuston määrä)
- Marjasatomallit
 $Phyvin_mustikka = f$ (puulaji, puuston tiheys ja ikä, maanmuokkaus, ekspositio)
- Ulkoilu-, maisema- jne. arvoja kuvaavat mallit
- Biodiversiteettimallit

Metsä on rakenteen, toiminnan ja ympäristöolosuhteiden kokonaisuus, jossa nämä kolme osaa ovat jatkuvassa vuorovaikutuksessa. Esimerkiksi:

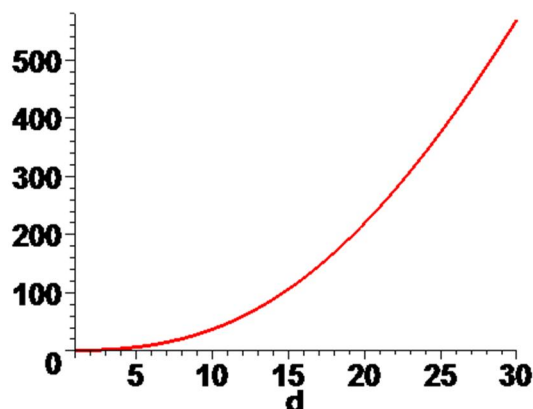
- Metsätyyppin kuvaus on malli kasvupaikan eli ympäristöolosuhteiden kuvaamiseen. Metsätyyppi liittyy puulajivalintaan, puuntuotoskykyyn, taimikonhoitoon jne.

- Puun pituuskasvua (paksuuskasvua, tilavuuskasvua, kuolemista) ennustava malli pyrkii kuvaamaan toimintaa, tai ainakin toiminnan tulosta. Pituuskasvuennusteilla kasvatetaan tietojärjestelmään kuvattua metsää ja sen puita, ja tehdään päätelmiä hoito- ja hakkuutoimenpiteiden vaikutuksista.

- Puun rungon tilavuus on vaikea määrittää tarkasti kaatamatta puuta (mittaamalla pystyyn), mutta sen voi ennustaa noin 17% suhteellisella (RMSE-%) virheellä mittaamalla ai-noastaan rungon läpimitan ja puulajin (Kuva 62) ja soveltamalla regressiomallia.

Malleja on "joka lähtöön" ja kaikki mallit ovat lähtökohtaisesti puutteellisia ja niihin pitää siksi tutustua "pitkällä tikulla" ennen käyttöä.

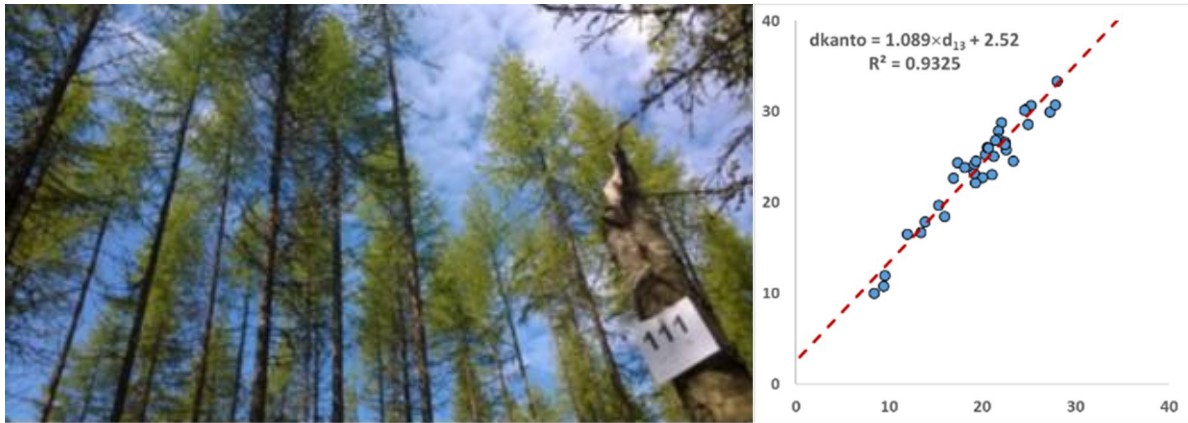
Rungon tilavuuden yhden läpimitan avulla ennustava malli ei ota kantaa puun pituuteen, mikä voi vaihdella huomattavastikin "samanpaksuisille puille". Riippuen puuston kasvustustiheydestä, puun kilpailuasemasta ja kasvupaikan hyvydestä, puun läpimitta-pituussuhde (solakkuus, rungon muoto) vaihtelee ja esimerkiksi läpimitaltaan 20 cm avoimen paikan mänty voi olla 8-10 m pituinen, kun vastaavan läpimitan omaava puu voi saavuttaa 15–20 m pituuden sulkeutuneessa metsässä. Tästä syystä mallille on luvattu vain 17% RMSE tarkkuus – eli – 68% tapauksista mallin tulos (ennustettu tilavuus) on $\pm 17\%$ oikeasta arvostaan. Tosin, tämä epävarmuus (RMSE on mallin "tuotespesifikaatio") on todettu siinä puupopulaatiossa, josta mittausaineisto alun perin kerättiin mallinnusta varten. Käyrä asettui kulkemaan sen aineiston mukaan, mutta käyrä ei ehkä olekaan enää "oikeassa paikassa", jos aikaa on kulunut ja puiden runkomuotoon vaikuttavat seikat ovat muuttuneet, lähinnä metsänkäsitteilymenetelmät. "Onko N.N. tekemä malli Ruotsalaisille leville minun aineistooni sopiva?" on relevantti kysymys samoin kuin "Voinko tehdä oman mallini?" tai "Voinko kalibroida N.N. mallia niin että se paremmin sopisi käyttööni?".



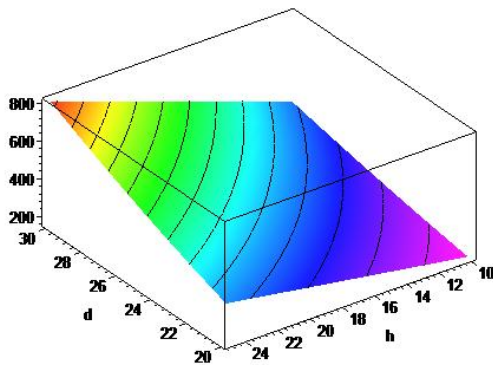
Kuva 62. Männyn rungon kokonaistilavuus (litroja) puun rinnankorkeusläpimitan (d, cm) funktiona. Alla funktio ja plot() komento Maple-muodossa. Laasasenaho (1983).

```
> v:=exp(-5.22553+ 3.434904*ln(2+1.25*d)-
0.03526*d );
> plot(v,d=1..30, font=[HELVETICA,BOLD,20],
thickness =3);
```

Tilavuusmallin (Kuva 62) yhtälö kätkee sisäänsä toisen empiirisen mallin $d_{kanto} = 2 + 1.25 \times d$. Sen mukaan puun kannon läpimitan voi arvioida lisäämällä 25% rinnankorkeudelta mitattuun läpimittaan, sekä lisäämällä vielä 2 cm näin saatuun lukuun.



Kuva 63. Kesällä 2015 Hyytiälässä mitatun lehtikuusikon puista mitattiin läpimitta sekä kannon- että rinnankorkeudelta. Aineistoon voi sovittaa regressioanalyysillä suoran. Suoran kertoimen arvo on 1.09 ja vakio 2.5 cm. Kannonkorkeudella tavoiteltiin keskimäärin sitä korkeutta, jolla lehtikuusikossa operoinut harvesteri oli käyttänyt puita harventaessaan. 45-vuotiaiden lehtikuusien kantoläpimitta oli vain noin 9 % paksumpi kuin runko rinnankorkeudella. Ratkaisu saatu MS-Excel xy-chart | add trendline -toiminnolla.



Kuva 64. Männyn runkotilavuus (litraa) kahden muuttujan yhtälöillä, kun rinnankorkeusläpimitta (d) vaihtelee välillä 20-30 cm ja pituus (h) 10-25 m. Laasasenaho (1983). Tuloksena saadaan 3D pinta.

```
> v:=.036089*(d^2.01395)*(0.99676^d)*  
(h^2.07025)*((h-1.3)^(-1.07209));
```

```
> plot3d(v,d=20..30, h = 10..25);
```

Edellä esitetyt funktiomuotoiset mallit (tilavuus, kantoläpimitta), olivat **parametrisia malleja**. Matemaattinen funktio antoi halutun tunnuksen arvon selittävien tunnusten funktiona. Metsätyypimalli on päättelyketjumalli, vähän samaan tapaan kuin kasvion määrittyskaava, joka on päätöspuu: **Puu** → **kyllä** → **Lehtiasento** → **parittainen** → **Lehtimuoto ja silmun rakenne** → .. → **Acer platanoides** (vrt. *Viburnum opulus*, tarkista kasvupaikka jne.). Määrittyskaavan lopussa annetaan vielä "todennäköisyys" väärinmäärittelyselle ja pyydetään varmistamaan se. Kaukokartoituksessa voidaan käyttää päätöspuita esim. kuvasta löydetyn puun puulajin määrittämiseen. Puun kuolemistodennäköisyyden ennustava malli ennustaa jatkuvan arvon välille 0..1, maisema-arvo voi olla luokka tai indeksi, joka lopulta kuvaa subjektiivista kokemusta.

Lisäksi käytössä on **ei-parametrisia malleja**, joita käytettäessä mitataan tarkkaan opetusaineistoa (esim.

erilaisia metsiköitä), ja kun kohdataan metsikkö, jonka yleiset helposti havaittavat piirteet muistuttavat (ovat lähellä) jotakuta "aineistopankissa" olevaa metsää, oletetaan näiden kahden välille samankaltaisuus, ja (maastossa/kaukokartoitusdatassa) kohdattu metsikkö kuvataan yksityiskohdiltaan samanlaiseksi kuin aineistopankissa ollut mallikappale, johon helposti havaittavat piirteet "mätsäävät". Analogiaa voi hakea kiinteistö- ja asuntokaupasta, kun haetaan käypää hintaa toteutuneiden vastaavien kauppajien avulla. Esimerkkejä ovat kNN ja kMSN-menetelmät, Random Forest algoritmi jne.

Lineaarinen ja epälineaarinen regressioanalyysi

Funktioimuotoinen malli.

Mallinnuksessa on vastemuuttuja (y) ja selittäviä muuttujia (x_p). Tavoitteena on estimoida joukko parametreja, jotka esiintyvät mallissa kertoimina.

Malli on muotoa (havainnolle i, $i=1..N$):

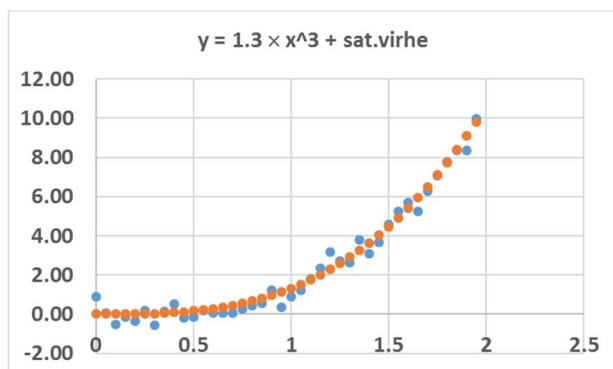
$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1,i} + \beta_2 x_{2,i} + \dots + \beta_p x_{p,i} + \varepsilon_i$$

Lineaarisuus tarkoittaa sitä, että malli on lineaarinen parametrien (β) suhteen. Selittävät muuttujat saavat olla monimutkaisiakin lausekkeita, mutta parametrit $\beta_0, \dots, \beta_p$ esiintyvät aina kertoimena tai vakiona. Alla olevista kolmesta mallista kaksi ensimmäistä ovat kertoimien suhteen lineaarisia, mutta alin ei ole, koska tuntemattomat ovat $\cos()$ argumentteina.

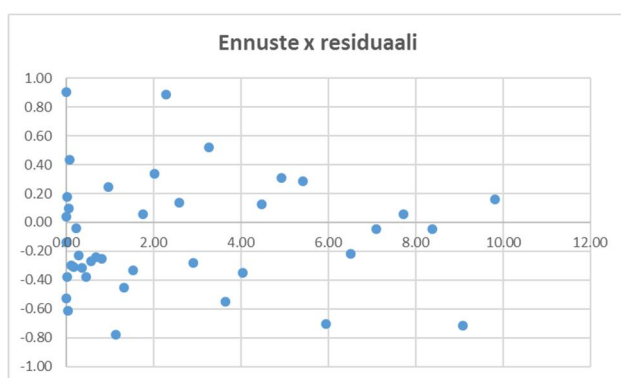
$$y = \beta_0 + \beta_1 x^3$$

$$y = \beta_0 + \beta_1 \cos(x)$$

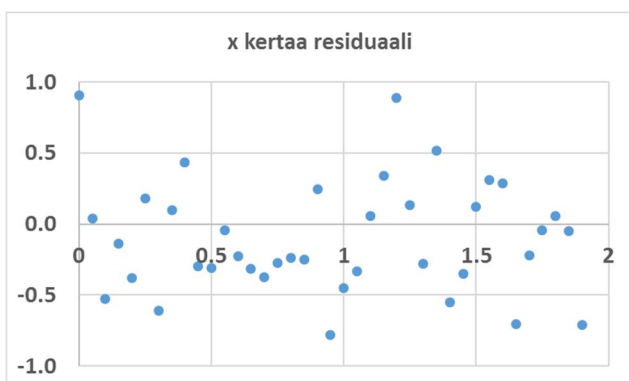
$$y = \beta_0 \cos(\beta_1 x + \beta_2)$$



Kuva 65. Simuloitu aineisto (siniset pisteet), joka noudattaa funktiota $y = 1.3 \times x^3$ lisättyä termeillä, joiden jakauma noudattaa normaali-jakaumaa odotusarvolla nolla, ja keskihajonnalla 1. Regressioanalyysi antaa mallin (oranssit pisteet) kertoimeksi 1.324. Sen mukaiset ennusteet on piirretty oransseilla pisteillä eli kaavalla $y = 1.324 \times x^3$.



Kuva 66. Regressioanalyysiin kuuluu aina **residuaalien tarkastelu**. Tässä x-akselilla on mallin ennuste ("y-hat") ja y-akselilla residuaalit eli jäännösvirheet: havaittu y miinus "y-hat" eli havainto miinus ennuste. Suurimmat residuaalit ovat itseisarvoltaan lähellä ykköstä. On tärkeää, että vaihtelu y-suunnassa on tasaista nollan ympärillä. Tällöin malli ei yli/aliarvioi suuria tai pieniä havaintoja, eikä varianssi ole heteroskedastista vaan vakioisuista kaikkialla, mikä tässä esimerkissä toteutettiin lisäämällä simuloituihin havaintoihin juuri vakiovarianssinen virhetermi (kts. ###).

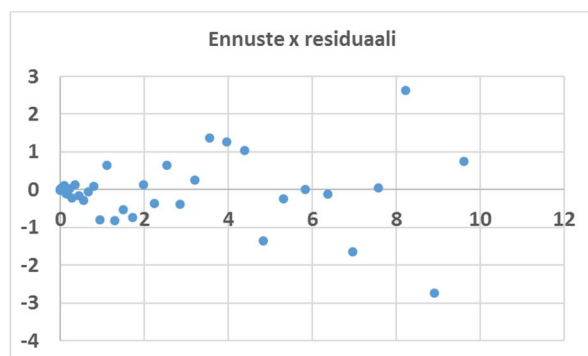
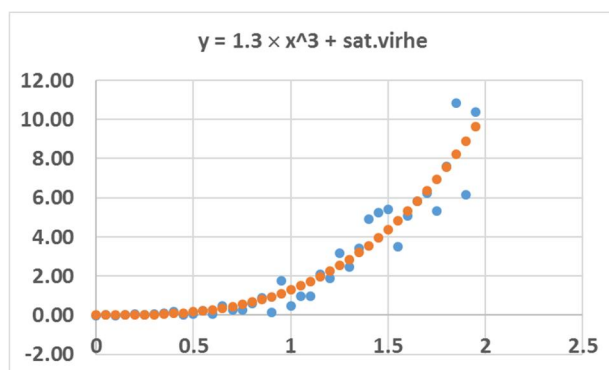


Kuva 67. Residuaaleja pitää tarkastella myös selittävien muuttujien suhteen, joita tässä esimerkissä oli vain yksi, x nimeltään. Residuaalien pitää jakautua tasaisesti nollan molemmin puolin, eikä malli saa esimerkiksi yliarvioida havaintoja, joissa x on suuri,

Hyvä malli "sopii aineistoon" ja selittää vastemuuttujan (y) vaihtelusta mahdollisimman suuren osan (**R², selitysaste**). Hyvä malli tuottaa pienen **keskineliövirheen (MSE)**, joka lasketaan neliöimällä havaitun y ja mallilla tuotetun vastemuuttujan, $\hat{y}$ erotukset (**residuaalit**), joista lasketaan summa, joka vielä jaetaan havaintojen määrän (n) ja parametrien (β) lukumäärän (p) erotuksella

$$MSE = \frac{(\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2)}{(n - p)}$$

Edellä olleessa mallissa MSE oli 0.16, n oli 40 ja p oli yksi, koska estimoititiin vain yksi kerroin, joka sai arvon 1.324. Sen keskivirhe-estimaatti (ohjelman laskemana) oli 0.03, mikä on pieni suhteessa kertoimen arvoon, ja mallin R² oli 0.98, eli malli selitti 98% havaintojen vaihtelusta.



Kuva 68. Usein y:n vaihtelu kasvaa arvojen suuretessa – esim. isojen puiden pituutta mitattaessa tehdään suurempia virheitä kuin pienten puiden kohdalla. Tällöin residuaalikuvaus näkyy hajonnan suureneminen – vaihtelu on **heteroskedastista**. Malli on oikein, mutta tuloksena saatavat kertoimien keskivirhe-estimaattorit eivät ole, eivätkä niitä koskevat tilastolliset päätelmät, kuten päätelmät siitä, mitkä kertoimet (selittäjät) ovat tärkeitä.

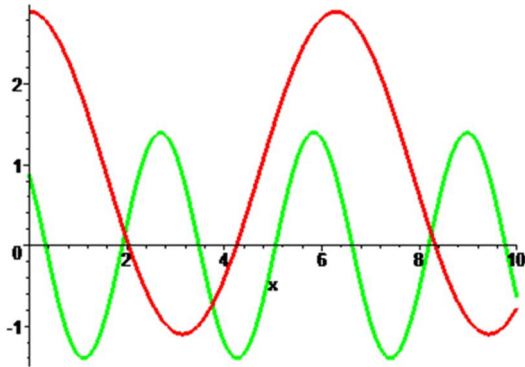
Seuraavaksi käsitellään kahta muuta aiemmin esitettyä mallia (lineaarinen ja epälineaarinen), jossa mukana on syklinen sinimuotoinen (sinusoidi) vaihtelu.

$$y = \beta_0 + \beta_1 \cos(x)$$

$$y = \beta_0 \cos(\beta_1 x + \beta_2)$$

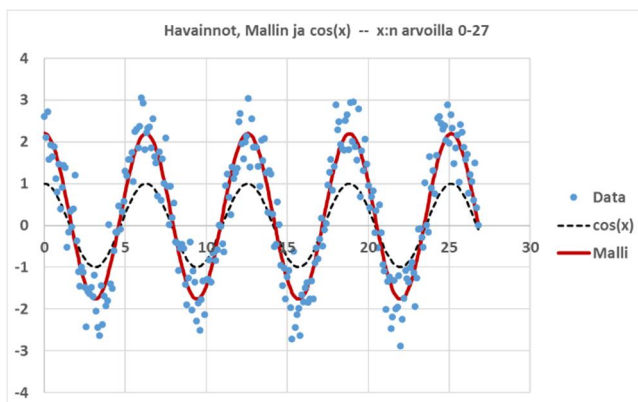
Piirretään molemmat kuvaajat välillä $x = 0..10$ Maple-ohjelmassa, antaen parametreille arvot.

```
plot([0.9+2*cos(x), 1.4*cos(2*x+0.5)], x=0..10);
```

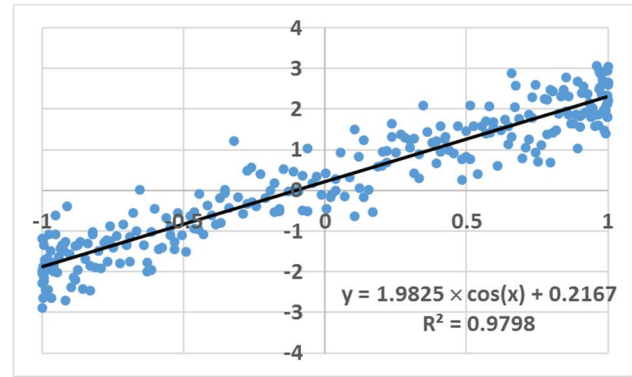


Kuva 69. Vihreässä kertoimien suhteen epälineaarisessa mallissa taajuus on kaksinkertainen, koska $\beta_1 = 2$ ja kuvio on siirtynyt x :n suunnassa, koska siirtoparametri $\beta_2 = 0.5$. Kerroin $\beta_0 = 1.4$ määrää amplitudin, ja on pienempi kuin punaisen (lineaarisen) mallin kerroin 2. Kertoimien suhteen lineaarisessa mallissa siirtoparametri 0.9 siirtää kuvaajaa y :n suunnassa.

Alla (Kuva 70) esitetään esimerkki, jossa on havaittu sinimuotoista ilmiötä eri ajanhetkillä, kun aika (x) sai arvoja välillä 0-27. Havainnot on simuloitu kertoimien suhteen lineaarisella kaavalla $y = \beta_0 + \beta_1 \cos(x) + \text{virhe}$, jossa kertoimet olivat 2 ja 0.2 ja virheet normaalijakautuneita lukuja. Koska malli on kertoimien suhteen lineaarinen, se voitiin ratkaista Kuva 71 esittämällä tavalla.



Kuva 70. Havainnot (siniset pisteet, simuloituja), $\cos(x)$:n kulku, ja mallin $y = \beta_0 + \beta_1 \cos(x)$ kulku, kun kertoimet β_0 ja β_1 on estimoitu lineaarisella regressiolla.



Kuva 71. Kun x sai arvoja 0-27 radiaania, saadaan selittävän muuttujan $\cos(x)$ arvoja, jotka vaihtelevat välillä $-1..1$. Vastemuuttujan (y) arvot vaihtelevat noin välillä $-3.5..+3.3$. Regressiosuoran (MS-Excel) sovituksen avulla saadaan kertoimeksi 1.9825 ja vakioksi 0.2167. Kun nämä on sijoitettu yhtälöön, saadaan Kuva 70:n punainen käyrä, joka approksimoi dataa. Ratkaistut parametrit ovat signaalin amplitudi ja siirto y -suunnassa. Simuloitaessa ne olivat 2 ja 0.2, mutta dataan lisätty satunnaisvaihtelu tuotti poikkeavat estimaatit (1.92, 0.21).

Kuva 72 havainnollistaa tilannetta, jossa on mittauksia ilmiöstä, jonka tiedetään olevan sinimuotoista, mutta jonka taajuus, ja vaihesiirto ovat tuntemattomia, ja ne pitää selvittää havaintoaineistosta **epälineaarista regressiomallia**

$$y = \cos(\beta_1 x + \beta_2)$$

käyttäen. Epälineaarinen regressio on hieman vaikeampi toteuttaa (ellei löydy tapaa linearisoida yhtälöä), koska ratkaisu edellyttää optimointimenetelmien käyttöä (numeerinen optimointi, esim. Excel-ohjelman Solver-toiminto) tai esim. menettelyä, jossa tarvitaan malliyhtälön osittaisderivoitintia, ja ratkaisuun (tuntemattomien β arvot) päästään iteratiivisesti parantamalla askel kerrallaan alkuarvauksia. Matemaattisesti lineaarinen regressio on regressioanalyysin erikoistapaus ja epälineaarinen regressio se yleinen tapaus.

Alla esitetään aiemmin esitellyn epälineaarisen mallin osittaisderivaattojen ratkaisu Maple-ohjelmalla.

$$y = \cos(\beta_1 x + \beta_2)$$

```
> y:=cos(b1*x+b2);
```

```
> diff(y,b1);
```

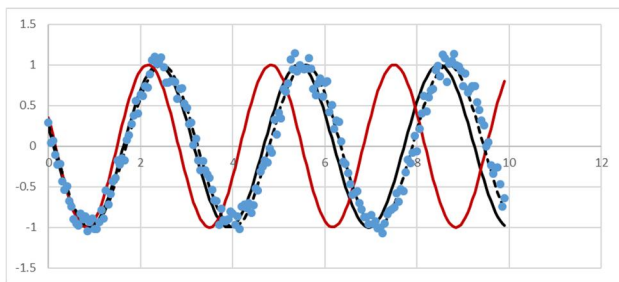
```
> diff(y,b2);
```

```
-sin(b1*x+b2)*x
```

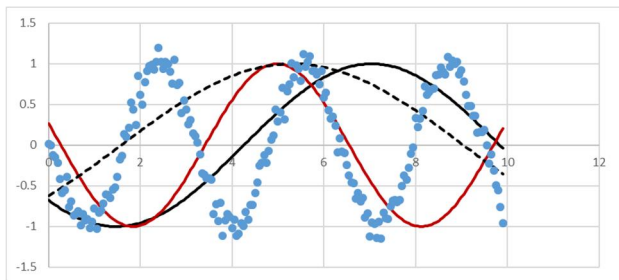
```
-sin(b1*x+b2)
```

Ratkaisussa osittaisderivaatat $\frac{\partial y}{\partial \beta_1}$, $\frac{\partial y}{\partial \beta_2}$, muodostavat matriisiin **A** kaksi saraketta. Alussa β_1 ja β_2 saavat alkuarvaukset, alla olevan esimerkin (Kuva 72) tapauksessa $\beta_1 = 2.35$ ja $\beta_2 = 1.21$. Alkuarvaukset tulevat jostain ennakkokäsityksestä tai ovat puhtaita arvauksia. Matriisissa **A** on yhtä monta riviä kuin on havaintoja, esimerkissä niitä on 200. Seuraavaksi lasketaan mallin ennusteet ($\hat{y}$) näillä kertoimien arvoilla ja saadaan kuvan punaista käyrää noudattavia ennusteita. Mittausten (y , siniset pisteet) ja ennusteiden ($\hat{y}$) erotukset ovat residuaaleja, virhetermejä, ja niitä on 200 vektorissa **v**. Seuraavaksi lasketaan parannukset kertoimiin β_1 ja β_2 matriisikaavalla $\mathbf{x} = (\mathbf{ATA})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{v}$. **x** on vektori, jossa on kaksi lukua. Esimerkissä ne olivat -0.32 ja 0.20. Luvut lisätään

alkuarvauksiin ja saadaan parannetut kertoimet β_1 ja β_2 , 2.03 ja 1.42. Kuva 72 havaintoaineisto (siniset pisteet) on generoitu "oikeilla arvoilla" $\beta_1=2.0$ ja $\beta_2=1.4$ lisäten mukaan normaalijakautunutta virhettä (pisteistö ei noudata sinikäyrää). Sitten laskelmat toistetaan eli tehdään toinen iteraatio. Lasketaan uusilla β_1 :n ja β_2 :n arvoilla 2.03 ja 1.42 uudet ennusteet ($\hat{y}$, musta käyrä kuvassa) ja virhetermien vektori $\mathbf{v}$, jossa yksittäiset poikkeamat (residuaalit) ovat nyt pienempiä, kuten kuvan mustan käyrän "dataan istuva" kulku kertoo. Osittaisderivaattojen arvot matriisissa $\mathbf{A}$ muuttuvat, koska β_1 ja β_2 saivat uudet arvot. Samalla matriisikaavalla saadaan uudet korjaukset $\mathbf{x}$ -vektoriin: -0.013 ja $+0.032$. Kun nämä lisätään edellä saatuihin arvoihin, saadaan katkoviivan mukainen malli, jossa $\beta_1=2.016$ ja $\beta_2 = 1.383$. Koska parannukset olivat jo melko pieniä, voidaan iterointi lopettaa ja epälineaarinen regressio saatiin ratkaistua.

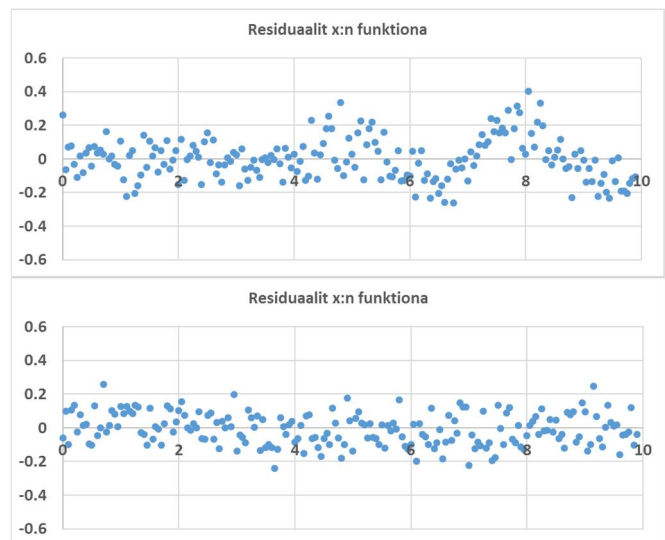


Kuva 72. xy-data (siniset pisteet), alkuarvauksen mukainen malli (punainen käyrä), ensimmäisen iteraation jälkeinen mallin ratkaisu (musta yhtenäinen käyrä), ja 2. iteraation tulos (katkoviiva).



Kuva 73. Epälineaarinen regressio ei aina ratkea. Tässä tapauksessa alkuarvaus taajuudesta (β_1) oli liikaa pielessä, ja on liian alhainen (punainen käyrä) ja toisen iteraation jälkeinen malli (katkoviiva) hakeutuu väärään paikkaan (β_2) ja taajuudelle (β_1).

Residuaaleja kannattaa (pitää) siis tarkastella selittäjien ($\mathbf{x}$ -muuttujat) suhteen (Kuva 74). Kuvan esimerkissä residuaalit kasvavat $\mathbf{x}$:n mukana, mikä ei ole haluttu piirre ja kertoo siitä, että taajuusparametri b_1 ei ole tarkka (eikä b_2 ei ole tarkka).



Kuva 74. Residuaalitarkastelu, jossa y-akselilla on havainnon ja mallin antaman arvon erotus (residuaali) x-akselilla esitetään selittävä muuttuja. Ylempään kuvan esimerkissä on virhettä sekä mallin b_1 (taajuusparametrissa) että b_2 (siirto) parametreissa. Alemmassa kuvassa mallin b_1 ja b_2 on saatu estimoitua oikein (huipputarkasti), ja jäljelle jää vain virheitä, jotka eivät riipu selittäjästä $\mathbf{x}$. Tällaisia voivat olla mm. mittausvirheet, joita syntyi $\mathbf{y}$ - ja/tai $\mathbf{x}$ -muuttujaa havaittaessa.

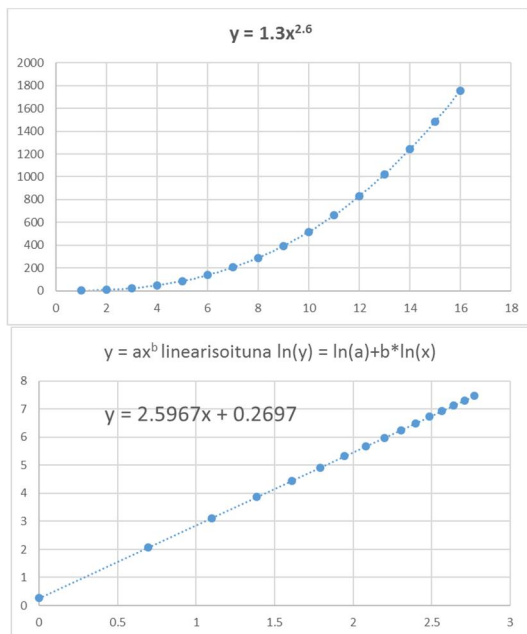
Mallin RMSE

Samoin kuten lineaarisen mallin tapauksessa, voidaan laskea mallinnusta koskevia tunnuslukuja. Kuva 72: Katkoviivan mukaisen mallin residuaaleille, $y_i - \hat{y}_i$, joita oli 200, saatiin varianssiksi $\text{var1} = 0.00209$, kun $\mathbf{y}$ -havaintojen varianssi $\text{var2} = 2.28117$. Kaavalla $1 - \text{var1}/\text{var2}$ saatiin selitysasteeksi $R^2=0.999$. MSE puolestaan lasketaan, kun jakajana on $(n-p)$ eli $(200-2)$, jossa 2 on ratkaistujen mallin parametrien (b_1 , b_2) lukumäärä ja 200 havaintojen lukumäärä. MSE oli 0.0253, kun residuaalien neliösumma oli 5.02. **MSE on varianssin mitta.** Sen neliöjuuri **RMSE** oli 0.159 (**keskineliövirheen neliöjuuri**). Kun tarkasteltiin, kuinka monta kertaa residuaalin itseisarvo ylitti saadun RMSE:n (200 residuaalin joukossa), vaihteli se simulaatiosta toiseen (havaintoaineisto arvottiin aina uudelleen ja uudelleen tätä tarkastelua varten) noin 52–74 kertaa. Se vastaa noin 26–37% havainnoista. **RMSE antaakin noin 68% luottamusvälin mallin ennusteille.** Vastaavasti residuaalin itseisarvo ylitti arvon $2 \times \text{RMSE}$ noin 6–15 kertaa simulaatiota toistettaessa. Viisi prosenttia 200 havainnosta on 10, eli $2 \times \text{RMSE}$ antaa noin 95% luottamusvälin mallin ennusteille.

Mallin linearisointi tulee joskus kyseeseen, ja tällöin malliin tehdään matemaattinen muunnos, jolla se saadaan kertoimien suhteen lineaariseksi, eikä työlästä iteroivaa (tai optimointi-) ratkaisua tarvita. Alla esimerkki tulomuotoisen eksponentiaalisen mallin linearisoinnista logaritmin otolla.

$$y = \beta_1 x^{\beta_2}$$

$$\ln(y) = \ln(\beta_1) + \beta_2 \ln(x)$$



Kuva 75. Havaintoja (siniset pisteet) simuloitiin $a:n$ ja $b:n$ arvoilla 1.3 ja 2.6 ja y -muuttujaan lisättiin pieni normaalijakautunut virhetermi. Yhtälölle $a \cdot x^b$ tehtiin muunnos ja regressioanalyysillä saatiin kuvan mukaiset kertoimet suoran sovituksen tuloksena. Huom $\exp(0.2697) = 1.31$ ja $\exp(2.59 \log(x)) = x^{2.59}$, kokeile Maplessa komentoa `simplify(exp(2.59*log(x)))`;

Metsänmittauksessa käytetään paljon **Näslundin pituuskäyrää**, jossa on kaksi parametria a ja b . Malli antaa puun pituuden (h) puun rinnankorkeusläpimitan (d) funktiona. Malli on epälineaarinen, koska parametrit ovat lausekkeessa, joka korotetaan toiseen potenssiin. Se voidaan kuitenkin linearisoida tarvittavaan muotoon $y = a + b \cdot d$:

Alkuperäinen muoto, jolla saadaan pituus läpimitasta.

$$h = 1.3 + \frac{d^2}{(a + b \cdot d)^2}$$

Siirretään 1.3 yhtälön vasemmalla puolelle ja kerrotaan $1/d^2$.

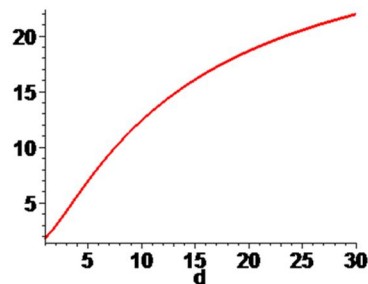
$$\frac{d^2}{h - 1.3} = (a + b \cdot d)^2$$

Otetaan neliöjuuri molemmin puolin:

$$\sqrt{\frac{d^2}{h - 1.3}} = a + b \cdot d$$

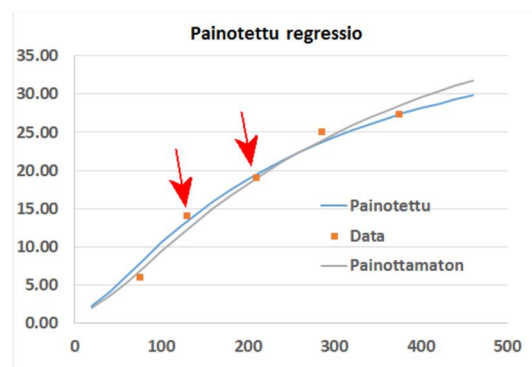
Piirretään kuvaaja Maplessa, kun $a = 1.2$ ja $b = 0.18$:

```
> plot(1.3+d^2/(1.2+.18*d)^2, d = 1..30, font
=[HELVETICA, BOLD,17]);
```

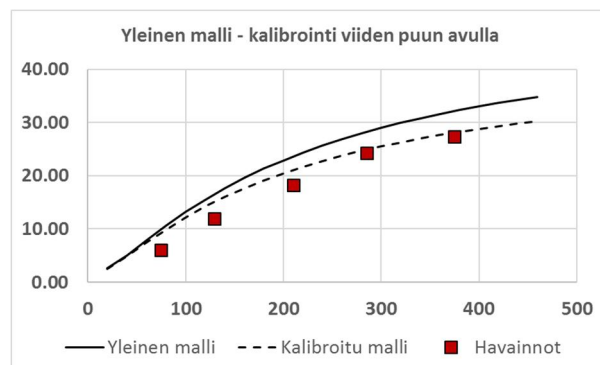


Kuva 76. Näslundin pituuskäyrä. Pituus metrejä, läpimitta senttimetrejä. Parametrien arvot annettu yllä Maple-komennossa.

Painotetussa regressiossa otetaan huomioon havaintojen tarkkuuseroja, tai painotetaan muusta syystä joitakin havaintoja ajatuksena, että näin saatava malli on parempi. Pituuskäyrää estimoitaessa (Kuva 77), "huonoja havaintoja" painotetaan vähemmän tai tärkeitä puita (esim. tietyn kokoisia) painotetaan enemmän. Painotettua regressioanalyysiä sovelletaan paljon maanmittaustieteissä, kun paikannukseen käytetään erilaisia havaintoja, kulmia, etäisyyksiä ja geometrisia ehtoja, ja mallit ovat epälineaarisia sisältäen paljon trigonometrisia funktioita ja "Pythagoraan lauseita" (etäisyyden laskenta). Metsänmittauksessa painotettua estimointia voidaan soveltaa esim. kalibroitaessa yleistä (koko maan tasolla määriteltyä) mallia johonkin metsikköön (Kuva 78).



Kuva 77. Painotetun ja samoilla painoilla lasketun regressioanalyysin tulosten eroja, kun painotus koski kahta puuta, joiden tarkkuus oletettiin 10-kertaiseksi muihin nähden. Painotettu Näslundin pituuskäyrä kulkee melko tarkkaan näiden pisteiden (nuolet) kautta. Huom. Rungon läpimitta x -akselilla on millimetreissä (0-500 mm), pituudet y -akselilla ovat metrejä (0-35 m).



Kuva 78. Pituuskäyrän kalibrointi. X -akselilla on puun läpimitta (d) millimetreinä ja y -akselilla pituus, metreinä. Näslundin käyrän parametrit yleiselle mallille (esim. 50-vuotiaalle kuusikolle Etelä-Suomessa)

olivat 15 ja 0.14, ja pienimmän neliösumman ratkaisussa näille kertomille annettiin suuret painot viiteen läpimitta-pituus havaintoon (mittattuun puuhun) nähden. Ratkaisussa arvot olivat 15 ja 0.153. Kalibroitu malli "on taipunut alas" kohti metsiköstä tehtyjä havaintoja, mutta ei kuitenkaan kulje "niiden kautta". Painoilla määritetään, kuinka paljon tilanteessa uskotaan yleiseen pituusmallin ja kuinka paljon omiin viiteen havaintoon. Yhtä oikeaa ratkaisua ei ole, mutta lähtökohtaisesti omien havaintojen hyödyntäminen kannattaa aina.

Maanmittausta ja kaukokartoitusta

Metsätieto on paikkatietoa.

Perusteita

Kartta = pienennetty ja yksinkertaistettu maaston kuva.

Mittakaava = suhdeluku (matka kartalla):(matka maastossa)

Karttaprojektio = "Pallo rutistetaan/venytetään" tasolle jollain tavalla.

Koordinaattijärjestelmä. Siinä ilmoitetaan pisteen sijainti

Maapallo on "kuhmurainen ellipsoidi", 6378 ja 6357 km puoliksi akselilta.

Maapallolla sij. pisteellä on leveys ja pituus (kulma) eli maantieteelliset koordinaatit.

Kulma on asteita (0..360°), radiaaneja (0..2π), aikaa (24h). Kulmia mitataan kulmaprismoilla, suuntakehällä, bussolilla ja kompassilla, teodoliitilla.

Kulma kasvaa myötä- tai vastapäivään – ja sillä on nollasuunta, esim. pohjoisessa (etusormi oikeakätisessä koordinaatistossa/y-akseli) tai idässä/oikealla (peukalo/x-akseli).

Etäisyys – metrejä – saadaan mittanauhalla, optisella etäisyysmittarilla, elektronisella et. mittarilla.

Kaltevuus tarkoittaa poikkeamaa tasosta, johon vapaa vesipinta hakeutuu. Ilmaistaan asteina tai prosentteina, jolloin 45 astetta = 100%.

Suuntaa viittaa johonkin kulmaan suhteessa jokin referenssisuunta, yleensä pohjoinen. Atsimuuttisuunta on 0° tai 360° pohjoiseen, 90° itään, 180° etelään. Se kasvaa myötäpäivään. Kompassilla saadaan atsimuutti suhteessa magneettikentän viivoihin. Koordinaattijärjestelmän karttapohjoinen voi olla referenssisuunta, mutta tällöin kompassi on kalibroitava kartta- ja neulapohjoisen paikalliseen eroon.

Korkeus. Korkeus kasvaa luotilangan suuntaan eli "suoraan ylös". On helppo määrittää rakennuksen tai puun korkeus suhteessa johonkin lähistön referenssipintaan. Päijänteen (pituus > 100 km) pinnankorkeus on 78.3 m, vaikka maanpinta kaareutuu tuolla matkalla kymmeniä metrejä. Tällöin puhutaan ortometrisistä korkeuksista, joihin vaikuttaa painovoimakenttä sekä maankuoren liikkeet (meillä maankohoaminen). Korkeuseroja mitataan ilmapuntareilla, kulmanmittauskojeilla tai vaaitsemalla, nykyään myös cm-tarkoilla GNSS-laitteilla.

Pinta-ala. Monikulmion pinta-ala voidaan laskea, kun tiedetään n kpl kulmapisteiden x ja y-koordinaatit:

$$A = \frac{1}{2} \times \sum_{i=1}^n x_i \times (y_{i-1} - y_{i+1})$$

Kaava toimii janellekin antaen vastaukseksi 0.

Kartta-aineistot. Digitaaliset aineistot ovat korvanneet paperikartat ja filmi-ilmakuvat lähes täysin. Karttojen taustalla

olevat rakennus-, maaston korkeus- jne. tiedot voivat muuttua nopeallakin syklillä ja päivitetyn kartan tuottaa automaattinen algoritmi. Erilaisia karttoja saa mm.

<https://avaa.tdata.fi/web/paituli>

Kartta-aineistoja tuottavat kunnat ja kaupungit, maanmittauslaitos, topografikunta, liikennevirasto, Finnavia jne.

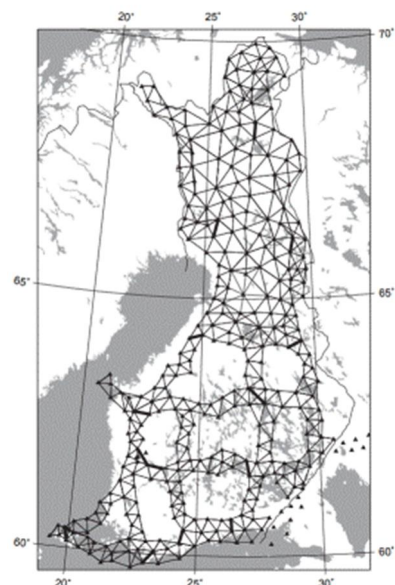
Kiinteistörekisteri sisältää kiinteistöjen sijainti- ja omistustiedot. "[Toimitusmenettelyn käsikirja \(TMK\)](#)" sisältää hyödyllistä tietoa metsäammattilaiselle koskien kiinteistötoimituksia (löytyy netistä).

Paikkatietojärjestelmä. Tietokoneohjelma tai kokoelma toimintaa, jolla voidaan käsitellä moninaisia paikkatietoaineistoja ja tehdä analyysejä, joissa näitä yhdistetään. Aineistot ovat joko rasteri- tai vektorimuodossa. Esim. reittihakuohjelmat tai navigaattorit ovat paikkatietosovelluksia. Hakuun tarvittava aineisto on tallennettuna järjestelmään, esim. Hgin kaupungin paikkatietojärjestelmä. Metsätietojärjestelmät ovat paikkatietojärjestelmiä ja voivat olla kytkennässä erilaisiin toiminnanohjausjärjestelmiin (esim. puunkorjuun ja kaukokuljetuksen suunnittelu). Paikkatiedon moninaisuuden takia on olemassa standardeja, joiden avulla tietoja voidaan siirtää järjestelmistä toiseen. Esim.

<https://www.iso.org/committee/54904.html>

Koordinaatistot ja paikantaminen

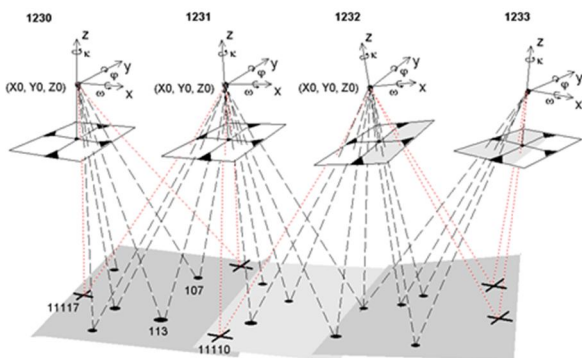
Spatiaalista tilastotiedettä sivuttaessa todettiin kaiken metsätiedon olevan paikkatietoa, ja aika ajatellaan usein neljänneksi koordinaatiksi.



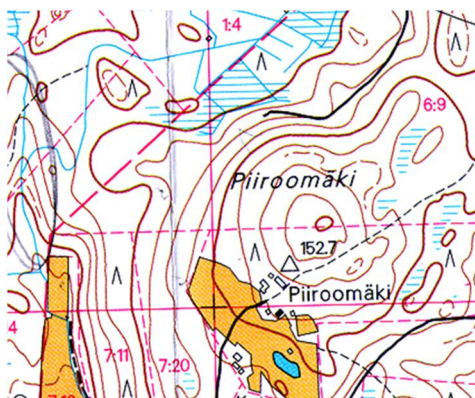
Kuva 79. Suomen 1-luokan kolmioverkko (kuva Jorma Jokela).

Kaikki metsät Suomessa kuuluvat kiinteistöihin, monikulmioihin, joiden kulmissa on rajapyykit ja niille on pyritty määrittämään mahdollisimman tarkat **kartta(taso)koordinaatit**. Ennen satelliittipaikannuksen aikakautta koordinaatit

perustuivat maastossa tehtyyn kolmiomittaukseen. Ensin (ja aina määrävällein) mitattiin pitkä suora, perusviiva, jonka pituus saattoi olla 3–6 km, ja jonka pituus tunnettiin mm-tarkkuudella. Kolmiomittauksin tämä mittakaava siirrettiin (suurennos) varsinaisten kolmiopisteiden etäisyyksiksi, jotka puolestaan saattoivat olla kymmeniä kilometrejä. Kolmioverkko sidottiin pisteisiin, joille oli tähtitieteellisin menetelmin saatu maantieteelliset koordinaatit (leveys- ja pituuspiiri). Kolmioverkkoa tihennettiin noin 300 I-luokan pisteen avulla (Kuva 79) ja luotiin II- ja III-luokan kiintopisteitä, joita saattoi olla 3–5 km välein lähinnä korkeiden mäkien päällä. Karttakoordinaatiston pisteillä ei ole varsinaista Z-koordinaattia vaan korkeus johonkin referenssiin nähden. Yleinen referenssi on merenpinta, jolloin puhutaan ortometrisistä korkeuksista (metriä merenpinnan yläpuolella, m.p.y). Pitkän järven vedenpinta asettuu (kaarevaksi) mukaillen painovoimakenttää, mutta sen ortometrisen korkeus on kauttaaltaan sama. Kiinteistön rajapyykin koordinaatit saatiin ennen GPS-aikakautta ilmakolmiomittauksen avulla (Kuva 80), kun pyykin päälle ensin rakennettiin valkea risti, joka näkyisi kuvalla.



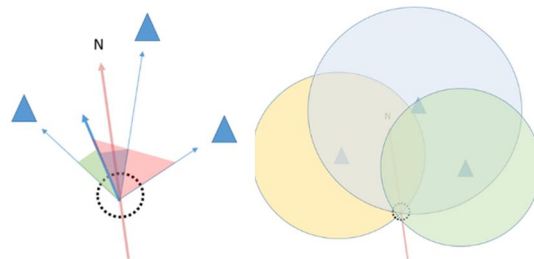
Kuva 80. Ilmakolmiointi. Ilmakuvien avulla voidaan ylittää alueita, joilla ei ollut kolmiomittauspisteitä (ristit, punaiset kuvasäteet) ja saada koordinaatteja kohteille, jotka näkyivät vähintään kahdella ilmakuvalla (ympyrät). Tällaisia kohteita olivat rajapyykit, rakennusten ääri- viivat. Nykyään koneessa oleva GNSS-laitteisto antaa tarkat kuvan- ottopisteet ja kolmiomittauspisteitä ei enää juurikaan käytetä.



Kuva 81. Kivimäen tilan (kts. 1.3.2 Metsätalouden suunnitteluinventointi) lähellä oleva III-luokan kolmiopiste 1990-luvun paperisella peruskartalla. Korkeus 152.7 m m.p.y. on saatu joko vaaitsemalla (korkeus tuotu tunnetulta tarkkavaaitus/korkeuspisteeltä) tai mittaamalla pystykulma ja etäisyys johonkin kolmiopisteeseen, jolle korkeus on tunnettu (korkeusero on etäisyys kertaa kulman tangentti). Maastosta saattoi löytää maahan tai kallioon lyötyjä metalli- tankoja/tappeja, joista yksi on varsinainen pisteen merkki ja muut

varamerkkejä, joiden avulla pisteen voi paikantaa, jos merkki on kateissa.

Kolmiomittauksessa tuntemattomalle pisteelle (tai torniin sen yläpuolelle) sijoitetaan laite, joka voi mitata tarkasti vaak- (ja pysty) kiertoja. Jos pisteeltä näkyy kolme tunnettua jo paikannettua pistettä, voidaan määrittää kojeen kierto (suhteessa esim. pohjoissuuntaan / Y-akseliin) ja tasokoordinaatit (XY). Paikannus/kojeen asemointi tapahtuu ottamalla suunta jokaiseen kolmeen pisteeseen (Kuva 82).



Kuva 82. VASEN: Kolmiomittaus, kun käytössä on kolme tunnettua pistettä. Ratkaistavia parametreja ovat 1) vaakakiertokulmaa mittaavan laitteen (teodoliitti) nollasuunnan ja karttapohjoisen välinen ero ja 2) kojeen XY-koordinaatit. OIKEA: Etäisyyksiin perustuva paikannus (trilaterointi) kolmea kiintopistettä käytettäessä. Tässä tapauksessa riittäisi kaksi pistettä, jos kahdesta kahden ympyrän leikkauspisteestä pystyttäisiin valitsemaan se oikea. Kolme etäisyyttä johtaa tilanteeseen, jossa paikka ratkaistaan regressioanalyysillä tai sijainnin voi laskea kolmen ympyräparin leikkauspisteiden keskiarvona (ei-suositeltava tapa).

Puun paikantaminen maastossa paikallisesti

Usein tulee eteen tilanne, jossa tarvitaan paikallinen kartta metsän kohteista: puut, kivet, kasvustot jne.

1. Suunta ja etäisyys -menetelmä: Mikäli tarkoitukseen riittää 2D-koordinaatisto, voidaan keskeiselle paikalle perustaa origo ja mitata tältä pisteeltä suunta ja vaakae- täisyys (napakoordinaatistossa) kuhunkin kartoitettavaan pisteeseen ja laskea XY koordinaatit. Suunta, johon X- tai Y-akseli osoittaa, voidaan siis valita vapaasti. Kartta on sitä tarkempi, mitä tarkempia ovat suunta- ja etäisyyshavainnot. Esim. yhden asteen suuntavirhe vastaa 16 cm virhettä (ympyrän kaarella) 10 m etäisyydellä. Mikäli alue on suuri, joudutaan mittauspistettä siirtämään jollekin jo mitatulle pisteelle ja täsmäämään suuntakehä suuntaamalla sen takaisin origoon (ellei käytetä kompassia). Sen jälkeen tälle pisteelle näkyvät kohteet mitataan tältä pisteeltä napakoordinaatistossa. On selvää, että tällainen mittauspisteiden verkko alkaa vääristyä kuta kauemmas alkupisteestä edetään. Verkko voidaan myös perustaa hilana: ensin mitataan selkälinja, josta kohtisuoras- sa suunnassa apulinjoja.

2. Suunnat ja etäisyys 3D: napakoordinaatistossa riitti suunta (tasossa) ja vaakae- täisyys ja tuloksena saatiin XY- tasokoordinaatteja. Jos käytössä on laite, joka mittaa sekä vaak- että pystykulman sekä vinoetäisyyden, voidaan kohde paikantaa pallokoordinaatistossa. Takymetri on tällainen mittalaite. Aivan kuten edellä, voidaan takymetrillä mitata vain ne kohteet, jotka näkyvät mittauspisteeseen, ja laitetta täytyy siirtää, jos kartoitettava alue on suuri. Laitteissa on toiminnallisuus, jonka avulla ne voidaan asemoida jo

mitattujen pisteiden avulla ja uuden paikan sijaintitarkkuudesta saadaan estimaatti, kunhan asemoinnissa käytetään riittävän montaa pistettä. Takymetriä käytettäessä koordinaatisto degeneroituu hitaammin verrattuna esim. kompassin käyttöön edellä kuvatussa 2D ratkaisussa, koska takymetrin suunta- ja etäisyshavainnot ovat hyvin tarkkoja.

Edellä esitellyt menetelmät olivat suoria menetelmiä, joissa havaintoja oli yhtä monta, 2 tai 3, kuin tuntemattomia koordinaatteja (XY tai XYZ). Paikkaa ratkaistaessa voidaan soveltaa ylimääritystä, jonka avulla voidaan myös laskea tarkkuusestimaatti. Näin voidaan toimia myös puita paikannettaessa.

3. Ultraääni- ja radiopaikannus. Metsään voidaan tuoda suuri [kolmijalka](#), josta osoittaa kolmeen suuntaan 3 m pitkä puomi, jonka päässä sijaitsee ultraäänitransponderi. Kolmijalka on vaakittu eli transponderit ovat samalla korkeustasolla. Mittaajan mukana kulkee lähetinvastaanotin, joka mittaa vinoetäisyyden kuhunkin transponderiin. Kolmen etäisyyden avulla voidaan laskea mittaajan 3D koordinaatit koordinaatistossa, jonka määrää kolmijalan (lähetinten) asento. Toinen vaihtoehto on asettaa metsään lukuisia radio-transpondereita ([pseudoliitteja](#), paikallisia "GPS-imitaattoreita"). Niistä kaksi muodostavat X-akselin jomman kumman ollessa origo. Pseudoliitit mittaavat toistensa välisiä etäisyyksiä ja etäisyyksiä mittaajaan, joka kartoittaa kohteita. Ratkaisuna saadaan 3D-koordinaatteja. Etäisyyksiä käyttäviä tekniikoita sanotaan trilaterointitekniikoiksi.

4. Monta suuntaa -menetelmä. Kolmiontia voidaan soveltaa myös puiden paikantamisessa ja jos vaakasuuntia (leikkaavia suoria) otetaan enemmän kuin kaksi, saadaan XY koordinaateille tarkkuusarvio. Suunnat otetaan metsään tarkasti paikannetuilta linjoilta/tunnetuilta pisteiltä.

5. Puut tukipisteinä -menetelmä. Tässä vaihtoehdossa mitataan ensin puiden latvoja kaukokartoituksen avulla. Syntyvä puukartta todetaan maastossa, eli kartan puut merkitään maastossa. Näin syntyy XY-tukipisteiden verkko, jonka tarkkuus riippuu siitä, kuinka suoria rungot ovat, ja kuinka hyvin latvapiste onnistuttiin mittaamaan. Plussaa tässä menetelmässä on se, että puiden koordinaatit tiedetään suoraan kaukokartoituksen käyttämässä globaalissa järjestelmässä, eikä aiemmissa vaihtoehdoissa pakollista koordinaatiston GNSS-paikannusta tarvita. Kohteet, jotka puutuvat kaukokartoituksen avulla saadulta kartalta paikannetaan käyttämällä puita tukipisteinä, joihin mitataan tuntemattomilta puilta suuntia (kolmionti)ja/tai etäisyyksiä.

Satelliittipaikannus (GNSS)

Perustuu etäisyyden käyttöön paikannuksen perustana (trilaterointi vrt. Kuva 82). Paikannus tapahtuu 3D-koordinaatistossa, jonka origo on maan massakeskipisteessä ja X-, Y- ja Z-koordinaattiakselit määritelty kulkemaan tiettyjen pisteiden kautta. Tämä karteellinen koordinaatisto on siis globaali ja perustuu satelliittipaikannukseen. Jokaisen satelliitin sijainti (XYZ) tunnetaan tarkasti kunakin ajanhetkenä tässä järjestelmässä. Satelliittivastaanotin pyrkii ratkaisemaan samanaikaisesti etäisyytensä mahdollisimman moneen satelliittiin. Sen jälkeen voidaan laskea mihin XYZ-pisteeseen nämä etäisyydet pätevät. Kolme etäisyyttä on mi-

nimi ratkaistaessa vastaanottimen XYZ-sijaintia, mutta tarvitaan aina vähintään neljäs (satelliitti), jotta etäisyyksimittaukset onnistuvat (vastaanottimen kellovirhe pitää ratkaista).

Paikannuksen tarkkuus riippuu olosuhteista: kuinka monta satelliittia on taivaalla, miten ne sijaitsevat (supussa vai tasaisesti yli taivaankannen), ollaanko kasvillisuuden alla vai vapaassa tilassa (kasvillisuus aiheuttaa katkoksia kuuluvuudessa). Kallis vastaanotin pystyy mittaamaan etäisyyksiä useisiin satelliittijärjestelmiin samanaikaisesti ja etäisyshavainnot ovat tarkkoja. Vastaanotin, joka on kytketty [RTK-järjestelmään](#) (verkkoyhteydellä) saa jatkuvasti tarkkaa tietoa signaalien vääristymisestä alueella, jossa laitetta käytetään ja pystyy cm-tarkkaan paikannukseen, jossa aikaa mittaukseen kuluu vain joitakin sekunteja. Tieto perustuu pysyvien satelliittipaikantimien verkkoon, joiden avulla voidaan interpoloida ja mallintaa korjaukset mihin tahansa paikkaan verkon sisällä. On olemassa myös muita järjestelmiä, joilla sijaintia voi tarkentaa joko reaaliaikaisesti tai jälkilaskentana. RTK-järjestelmä ei yleensä toimi metsässä (vastaanotin ei pysty ratkaisemaan kaikkia tuntemattomia satelliittiyhteyksien katkeillessa jatkuvasti puiden takia), ja siellä joudutaan tyytymään metri- ja desimetritason paikannukseen reaali- ja jälkilaskentaa sovellettaessa.



Kuva 83. Vuonna 2000 Suomessa ei vielä ollut pysyvää GNSS-vastaanottimien verkkoa, jota hyödyntää RTK-paikannuksessa. Asia ratkaistiin sijoittamalla oma tukiasema tunnetulle kolmioverkon pisteelle (Pätsäinmäki Hyytiälä), jossa oli myös radiolähetin ja antenni, jolla korjaustiedot saatiin toiselle liikkuvalla vastaanottimella cm-tarkkaa paikantamista varten (Jaakko Uusitalo Tampere, mmyo Jarno Kallonen).

Kun pisteen koordinaatit tunnetaan (laite siis ratkaisee ne) WGS84 XYZ-koordinaatistossa, niille voidaan laskea maantieteelliset koordinaatit (leveys ja pituusasteet) tai ne voidaan projisoida karttakoordinaatistoon ja sen jälkeen sijoittaa kartalle tai karttakoordinaatistoon oikaistulle ilma- tai satelliittikuvalle. Pisteelle voidaan määrittää myös korkeus. WGS84 järjestelmään kuuluu maapallon muotoa jäljittelevä **ellipsoidi**, ja pisteen korkeuden voi määrittää sen pinnalta. Jos halutaan korkeuksia m.p.y tarvitaan lisäksi [geoidimalli](#), joka kertoo, kuinka ellipsoidikorkeutta tulee korjata, jotta saa ortometrisen korkeuden. Geoidimalli huomioi gravitaation alueelliset erot. Esim. Kymenlaaksossa ja Karjalan kannaksella painovoimakentässä on kuoppa, joka johtuu alueen rapakivi-kallioperästä.

Suomessa on erittäin hyvä **geodeettinen infrastruktuuri**. Vanhat kolmioverkot on saatu korjattua (oikaistua) satelliittipaikannuksen avulla tarkasti ja uuden satelliittipaikannukseen perustuvan karttakoordinaatiston (TM35FIN) ja vanhan

kolmiomittauksiin perustuvan (kkj) koordinaatiston väliset muunnokset ovat cm-tarkkoja. Tarkkavaatusten ja GNSS-mittausten ansiosta ortometriset korkeudet saadaan nekin cm-tarkasti GNSS-havainnoista, koska laaditut geodimallit ovat tarkkoja koko maassa ja vaatusverkkoja on yhdistetty lähimaiden verkkoihin, jolloin voidaan mm. seurata maanpinnan nousua Itämeren – Pohjanmeren alueella. Metsäammatilainen voi halutessaan paikantaa itsensä taimikoissa cm-tarkasti RGK-GNSS laitteella (laitevuokra 50-100€/päivä) ja 0.2–2 m tarkkuudella puustoisissa kohteissa. Mobiililaitteiden GNSS kykenee metritason tarkkuuteen ja saatavilla on koordinaatistoon oikaistuja ilma- ja satelliittikuvia, joilta voi paikantaa maastonkohtia – kännykän näyttöä maastoon vertaamalla. Kaukokartoitus hyötyy myös infrasta, sillä ilmakuvaukskalusto saadaan paikannettua cm-tarkasti 1-2 kertaa sekunnissa, jolloin ilmakuvat ja laserpulssit ovat tarkasti orientoituja ilman että tarvitaan maastoreferenssipisteitä (signaaleja).



Kuva 84. Metsikkökoealan korkeusvaihtelun mittaaminen vaatuskoneella. Hyytiälä 2002 (kuva Markus Holopainen).

ETRS-TM35FIN taso(kartta)koordinaattijärjestelmä

otettiin käyttöön v. 2010 maanmittauslaitoksen tuotteissa. Projektio (3D -> taso) on käänteinen lieriöprojektiio (Transverse Mercator) ja taustalla on eurooppalainen vertausjärjestelmä ETRS89 ja sen suomalainen sovellus EUREF-FIN. Olemme kiinnittyneet Euraasian mannerlaatan yhtenäiseen osaan, ja koordinaatit muuttuvat mannerlaatan liikkuaessa ja tätä muutosta ja deformaatiota voidaan mitata GNSS-asemaverkon avulla. GPS-järjestelmän pohjana olevan WGS84 vertausjärjestelmän ja eurooppalaisen ETRS89 ero on nyt alle metrin, mutta muuttuu jatkuvasti. Käytännössä WGS-84 pohjautuvat UTM35-tasokoordinaatit ja suomalaiset ETRS-TM-35FIN tasokoordinaatit ovat millimetritasolla yhtenevät. Niinpä, jos GNSS vastaanotin antaa UTM35 tasokoordinaatteja ja ellipsoidikorkeuksia, niitä voi hyvin käyttää ETRS-TM35FIN koordinaatteina.

Esimerkki: Piste Juupajoen Hyytiälässä

KKJ-2 koordinaatit

6860000 m Pohjoista, 2516000 m Itä

Muunnos coordtrans.fgi.fi –sivustolla ETRS-TM35FIN
6860030.4886 m Pohj., 357922.0445 m Itä

Muunnos coordtrans.fgi.fi –sivustolla EUREF-FIN
Maantieteellinen (2D)
61.846484899° N, 24.300429423° E

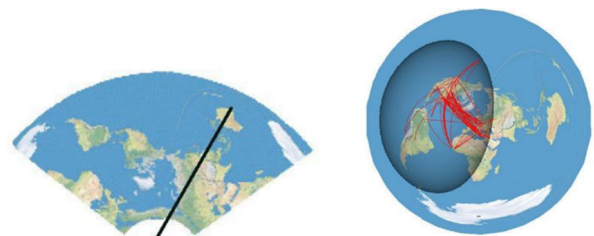
Muunnos <https://www.ngs.noaa.gov/TOOLS/utm.shtml>
takaisin UTM35 tasokoordinaateiksi
6860030.489 m Pohj, 357922.045 m Itä

Kuva 86 havainnollistaa muunnoksia Kansalaisen karttapaikan –sivulla. Koordinaattimuunnokset on hyvä aina tarkistaa. Maantieteellisissä (leveys- ja pituuspiiri) koordinaateissa käytetään sekä desimaalista esitystä, että aste, minuutti, sekunti –muotoa tai aste + desimaaliminuutti -muotoa.

Hanko on leveyspiirillä 59.83° N- Eckerön pituuspiiri on 19.48° E, Ilomantsin itäisin kolkka on 31.56° E, ja Utsjoen pohjoisin leveyspiiri on 70.10° N. Suomi on tämä "laatikon sisällä".

Karttaprojektio

(3D maailman kuvaus 2D tasolle) on aina kompromissi. Joisain karttaprojektioissa Tokio näyttäisi olevan 'Idässä', vaikka oikea atsimuuttisuunta, jonne radioantenni pitää Helsingissä kääntää, on 45 astetta eli koilliseen. Kaksiulotteisilta kartoilta ei koskaan voi mitata todellisia suuntia ja kohteiden välisiä etäisyyksiä täsmällisesti oikein ilman, että kartta jollain tavalla vääristyy.



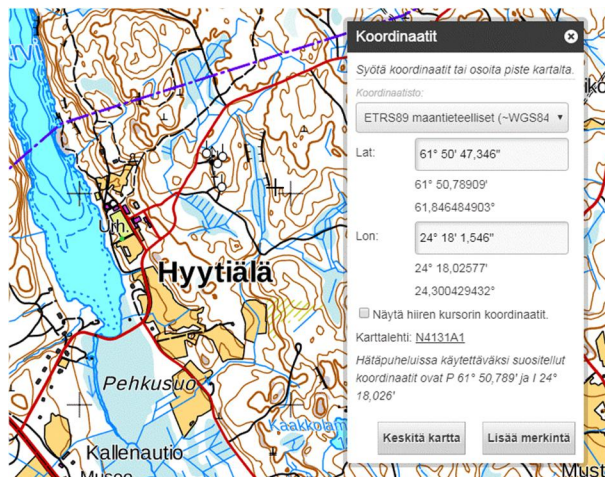
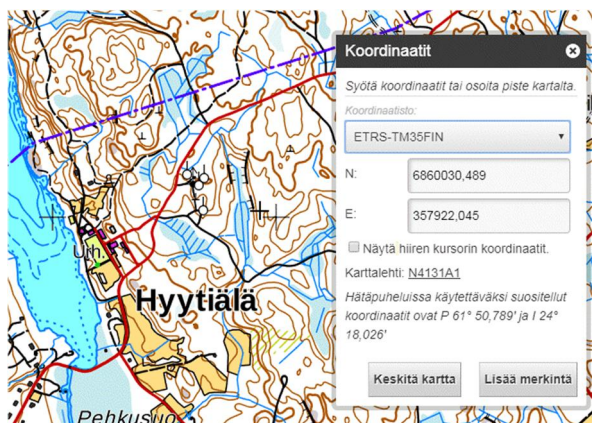
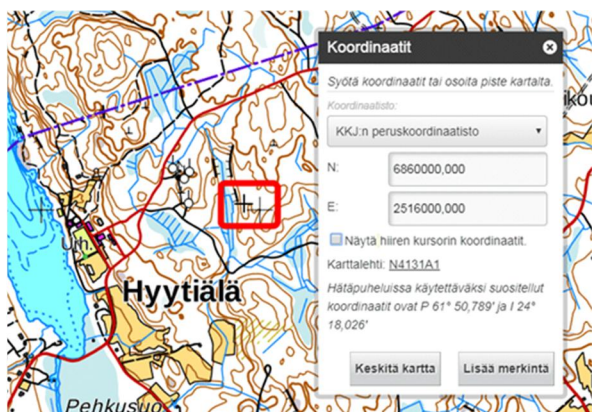
Kuva 85. Suuntakartta antennikääntäjää varten, jossa on neulamittarinäyttö. "Neula" kuvassa osoittaa Australiaan, joka on noin atsimuuttisuunnassa 90 astetta. Etäisyys luetaan neulalta. Kartta on piirretty Oulun horisontista, ja lähellä olevat kohteet on jätetty pois rajujen vääristymien takia. Etelä on atsimuuttisuunnassa +180 astetta, jossa kartta "katkeaa". Toinen kartta on piirretty atsimuuttiprojektiossa Helsingin horisontista ja siltä voi mitata atsimuuttisuunnan (0...360 °) ja etäisyyden kohteeseen. Kaukana olevat kohteet vääristyvät – esimerkkinä Uusi-Seelanti ja Antarktika. Kauimmaiset kohteet "maailman toisella puolen" on jätetty piirtämättä, koska kartta räjähtäisi kohtuuttomasti. Punaiset viivat kuvaavat lentoreittejä.

Korkeusmalli

Kartalta saa tasokoordinaatteja - "kuinka kaukana idässä ja pohjoisessa" ollaan suhteessa origoon. Tasokoordinaateissa yksiköt ovat metrejä ja maantieteellisessä koordinaatistossa ne ovat asteita, pituus- ja leveyspiirin arvot. Taustalla on ellipsoidi, jonka pinnalle esim. (GNSS) GPS:n mittaamat todelliset WGS84 XYZ-koordinaatit projisoidaan jollakin menetelmällä (esim. Gauss-Kruger tai Transverse Mercator projisointi). Ajattele, että ellipsoidi (maa) on pallo. Mihin tahansa pisteeseen pallon pinnalla voidaan sijoittaa pinnan normaali eli

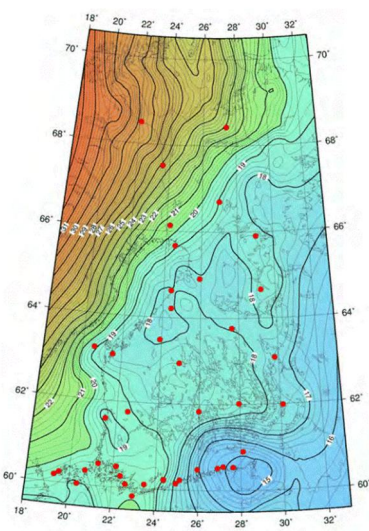
suora, joka on kohtisuorassa pallon pintaa vastaan. Kaikki pisteet, jotka osuvat tuolle viivalle (eri etäisyyksillä pallon kuvaamasta maasta) projisoidaan pallon pinnalle tuohon pisteeseen ja saavat samat pallokoordinaatit – kierto- ja korkeuskulman arvot (== pituus- ja leveyspiiri). Koska maapallo ei ole pallo, tarvitaan sen kuvaamiseen ellipsoidi, litistynyt pallo, ja tämän takia projisoinnissa tarvittava matematiikka on hankalampaa, mutta periaate on sama.

Lentoliikenne, joka perustuu osaltaan GNSS:n käyttöön, tarvitsee 3D informaatiota. Olisi ikävä tilanne, jos koneen laskeutuessa maanpinta tulisikin vastaan "50 m otaksuttua korkeammalla". Tietyllä leveys- ja pituuspiirillä maanpinta leikkaa edellä kuvatun pinnan normaalin jollakin "korkeudella". Nollakorkeus on teoreettisen ellipsoidin pinnalla. Lentokentän kiitorata on maan pinnalla. Korkeusmalli kertoo maanpinnan korkeuden kussakin karttakoordinaatiston pisteessä suhteessa ellipsoidiin. Puhutaan ellipsoidikorkeuksista. Se on eri asia kuin korkeus merenpinnan yläpuolella eli ortometrinen korkeus, johon vaikuttaa painovoimakenttä ja sen paikallinen vaihtelu. Esimerkiksi vuoden 1960 keskimerenpinnan mukaan määritetyn N60 korkeuden ja ellipsoidikorkeuden ero on n. 18.67 m Juupajoen Hyytiälässä, mutta suurempi kun vertailuna on vuoden 2000 merenpinnan referenssitaso (N2000 korkeusjärjestelmä). Ellipsoidikorkeus "ei periaatteessa muutu", koska siinä on kyse matemaattisesta maapallon muodosta. Maanpinnan kohoaminen näkyy ellipsoidikorkeuksien ja ortometristen korkeuksien muutoksena (koska on erisuuruista eri osissa Suomea ja lähiympäristöä) ja on Suomessa positiivista, Alankomaissa negatiivista.



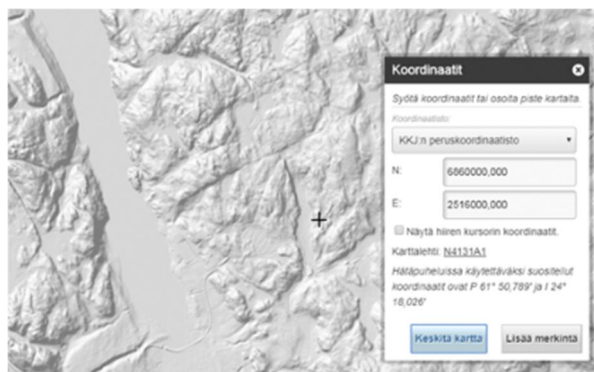
Kuva 86. Muunnokset Kansalaisen karttapaikka -sivulla.

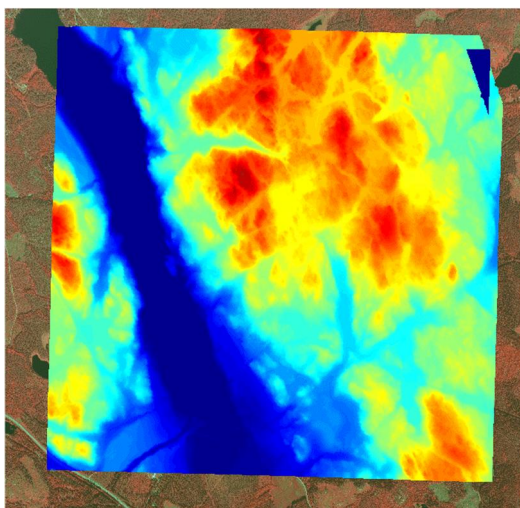
Korkeusmalli kuvaa maanpinnan muotoja, ja siltä voi lukea ellipsoidikorkeuksia tai ortometrisia korkeuksia (m.p.y), jotka voi muuttaa toisikseen, jos käytössä on geoidimalli, joka kertoo niiden (alati muuttuvan) eron, esim. tuo 18.67 m Juupajoen Hyytiälässä vuoden 1960 epookissa.



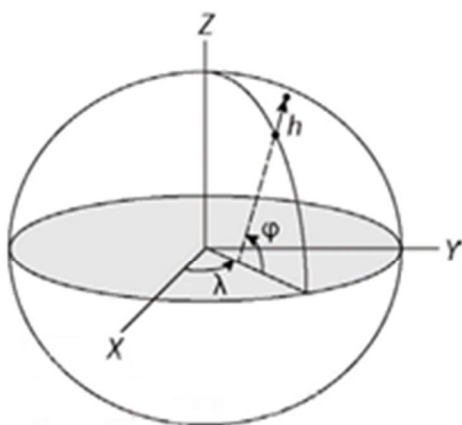
Kuva 3-4. FIN95-geoidimalli ja sen laskennassa käytetty GPS/vaaituspisteistö.

Kuva 87. Suomalainen Geoidimalli. Ellipsoidikorkeuden ja ortometrisen korkeuden välinen ero. Huomaa rapakivialue Kaakkois-Suomessa. (Bilker-Kaartila ja Ollikainen, 2009).

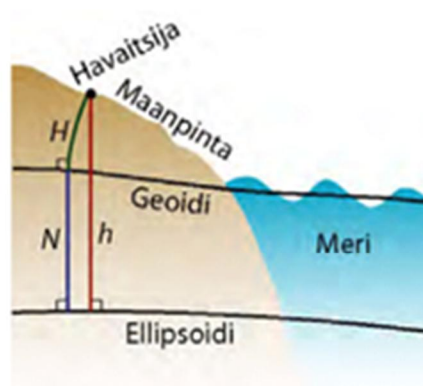




Kuva 88. Korkeusmallin rinnevarjostuskuva (Maanmittauslaitoksen laserkeilausmalli vdlta 2013, Kansalaisen Karttapaikka) ja saman alueen yksityisellä rahalla toteutetusta laserkeilauksesta muodostettu korkeusmalli ilmakuvalla tulostettuna (2010). Hyytilän Kuivajärven S-pää.



Kuva 2-1. Kolmiulotteiset koodinaatit (X,Y,Z) ja maantieteelliset koodinaatit (ϕ, λ, h).



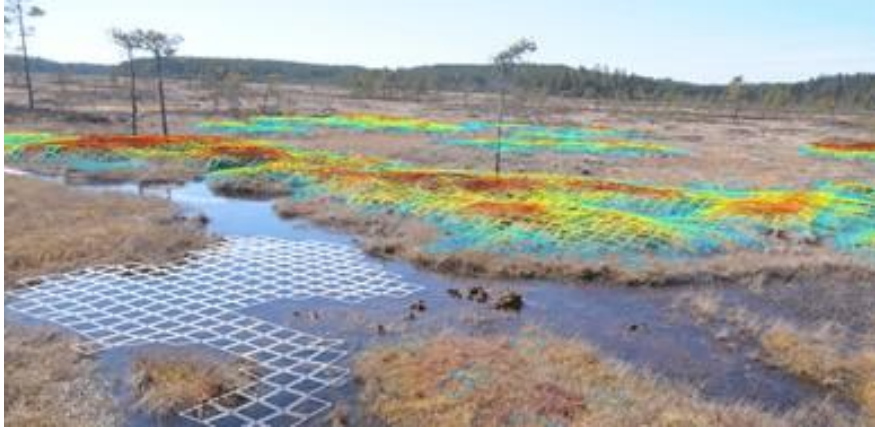
Kuva 2-2. Eri korkeuksia: korkeus ellipsoidista, h , vaaittu korkeus, H , ja geoidikorkeus, N .

Kuva 89. Koordinaatistojen ja korkeusjärjestelmien havainnollistus (Bilker-Kaartila ja Ollikainen, 2009)

Korkeusmalli voidaan esittää rasterina tai kolmioverkkona (TIN) tai muussa matemaattisessa muodossa, ja se on projisoitu tasokoordinaatistoon. Google Earth-ohjelmassa käytetään maantieteellisiä koordinaatteja (pituus ja leveys), kun taas Maanmittauslaitoksen (MML) korkeusmallituote on rasteri (Kuva 88), jossa jokainen pikseli liittyy ETRS-TM35FIN koordinaatteihin ("metrejä pohjoista ja itää"). Huomaa esitystapa: ensin pohjoiskoordinaatti (X), sitten itäkoordinaatti (Y). Maanmittarit ovat käyttäneet perinteisesti vasenkätistä koordinaatistoa (X kasvaa ylös, Y oikealle), mutta tapa on muuttumassa. Tässä monisteessa itä tarkoittaa X-suuntaa ja pohjoinen Y-suuntaa oikeakätisessä koordinaatistossa.

Jos korkeusmalli on rasterimuodossa ja siinä jokainen pikseli vastaa 1×1 metrin pinta-alaa, ja pikseleitä on 10000×10000 , kattaa malli 100 km^2 ($10 \times 10 \text{ km}$) alueen. Mallin vasemman yläkulman koordinaatit on annettu: esim. 350000.00 m ja 6860000.00 m UTM35 (ETRS-TM35FIN) tasokoordinaattijärjestelmässä. Jos olemme kiinnostuneita pisteen 355000.50 ja 6855000.50 korkeudesta, tulee meidän lukea se tietyltä riviltä ja sarakkeesta rasteria. Rivi lasketaan seuraavasti: piste

on $6860000-6855000.5$ metriä yläreunasta alas eli 4999.50 metriä. Ensimmäinen rivi kattaa välin "0-1 m alas", toinen välin 1-2 m jne. Rivi on siis 5000. Piste on $355000.5-350000.0$ metriä rasterin vasemmasta reunasta oikealle, eli 5000.5 metriä. Sarake on siksi 5001. Tässä esimerkissä mallia ei interpoloida, vaan arvo otetaan siitä pikselistä, mihin piste osuu (nearest neighbor interpolation) - riviltä 5000, sarakkeesta 5001. Jos rasterimalli on tallennettu 2 tavun kokonaislukuina $0-65535$, on tiedoston koko 200 miljoonaa tavua. Arvo luetaan $(5000-1) \times 2 + 5001 \times 2$ tavun päästä tiedoston alusta, jos rasteri on tallennettu binäärisen muotoon. Tämä yksityiskohta on tietenkin yleensä piilotettu käyttäjältä eri ohjelmissa. Tärkeää on kuitenkin huomata, että mallin origo (XY-koordinaatit) voidaan määritellä ensimmäisen pikselin keskelle tai kulmaan. Jos tätä ei ohjelmia käyttäessään huomioi oikein, voi kaikki mennä systemaattisesti "puoli pikseliä väärin". Sama huomio koskee kaikkia rasterimuotoisia paikkatietoaineistoja. Jos tiedostosta luettu kokonaislukuarvo oli 17234, voidaan se tulkita esim. korkeudeksi 172.34 m mp.p.y.



Kuva 90. Korkeusmalli (20 cm rasteri) projisoituna maastovalokuvalle. Parhaimmillaan korkeusmallin tarkkuus voi olla muutamia senttimetrejä, kun korkeuspisteaineisto kerätään ilmalaserkeilaimella matalalta korkeudelta.

Kaukokartoitus

Lento- ja avaruuskaukokartoitus ovat melkein aina käytössä metsänmittauksessa. Kun ajatellaan **havainnot-mallit-otanta** perusasetelmaa, edustaa kaukokartoitus tapaa kerätä havaintoja. Kaukokartoitus on sitä, että kohdetta koskematta tehdään siitä havaintoja ja päätelmiä. Havainnot ovat syöte malleille (malliketjuun). Esim. pikseliarvo -> puulajimalli -> puulaji. Mallit ovat usein täysin erilaisia verrattuna malleihin, joihin syötteenä on maastomittauksia.

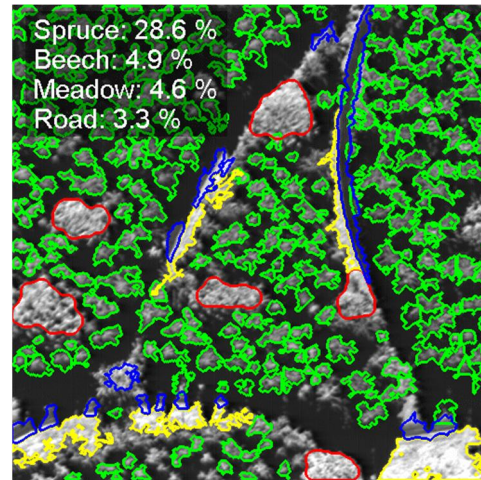
Lähikaukokartoitusta (close-range) on lennokka-, drone-, mörnkijä-, kolmijalka-, reppu-, käsiskanneri/kameramittaus.

Ilma- ja avaruuskaukokartoitus "näkee enemmän", ja havaintoja saadaan yleensä koko alueelta, eli kaukokartoitusta käytettäessä ei tarvita otantaa paitsi maastossa.

Yleensä havaintojen tekoon käytetään sähkömagneettista säteilyä. Jos se tuotetaan itse, puhutaan **aktiivisesta** kaukokartoituksesta, kun taas **passiivisessa** kaukokartoituksessa käytetään yleensä auringosta peräisin olevaa energiaa. Esimerkkeinä olkoon [Microsoft Kinect](#), [tutka](#)- ja [laserkeilaus](#) sekä [valo](#)- ja [lämpökuvaus](#).

Puhutaan **2D, 3D ja 4D menetelmistä**.

2D:llä tarkoitetaan yleensä XY-tasossa (kartalla) tapahtuvaa tulkintaa, jossa XY-pisteeseen haetaan jonkin muuttujan arvoa, esim. 0/1-arvoista suo/kangas-maskia (rasteria) tai runkotilavuutta m³/ha. Kuvan/alueen [segmentointi](#) on myös 2D sovellus. Segmenttejä voivat olla latvukset, kuviot, puuryhmät jne.



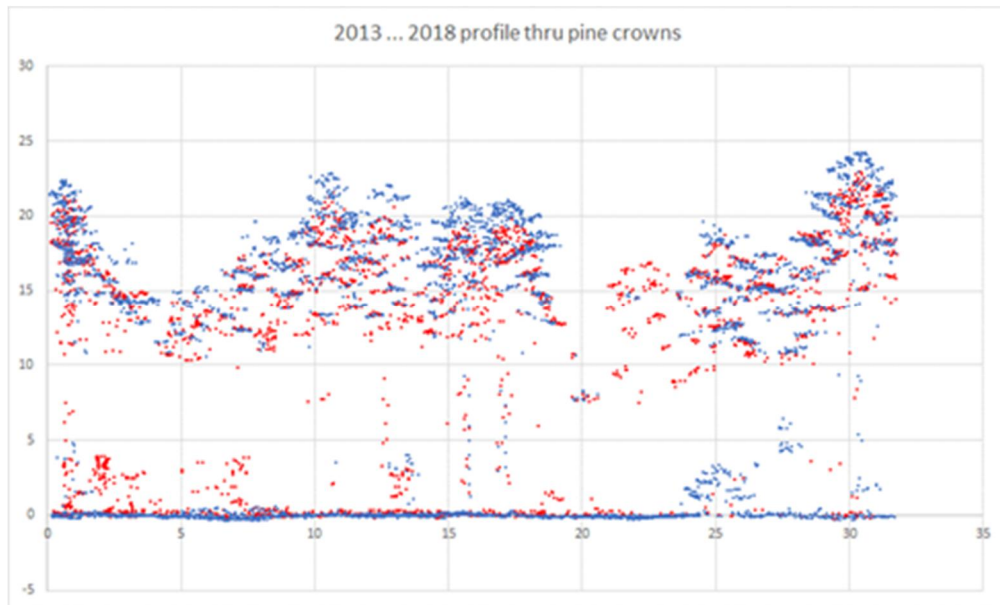
Kuva 91. Segmentoitu ilmakuva (<http://www.imageops.com>).

3D-menetelmät ovat yleistyneet. Niissä pyritään tulkitsemaan mitä on jossakin 3D avaruuden pisteessä, laatikossa (voxel) tai pinnalla (maastomallilla, latvuston korkeusmallilla). Esimerkiksi useaa ilmakuvaa käyttäen voidaan ratkaista kuvilla näkyvien yksityiskohtien 3D-sijainti tai laserkeilauksella saadaan suoraan kohteesta 3D kaikuja.



Kuva 92. Laserkeilaus ja fotogrammetria ovat 3D tiedonkeruumenetelmiä. Fotogrammetria on kohteen ominaisuuksien mittaamista valokuvilta, kun taas laserkeilaus perustuu lähetetyn valon käyttöön (valotutka). **Lähifotogrammetriselle** kuvaparille on tulostettu kilometrin korkeudelta ammuttujen **ilma**laserpulssien kulkureitti ja matkalta vastaanottimeen takaisinsironneen signaalin voimakkuus. Hyttiälä, Konehalli.

4D-menetelmillä tarkoitetaan 3D tulkintaa yli ajan, kun havaitaan 3D rakenteiden muutoksia.

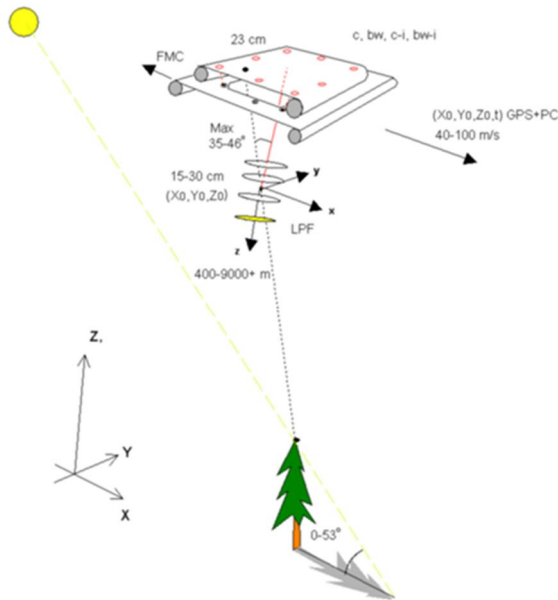


Kuva 93. 4D-tulkintaa. Ilmalaserkeilauspistepilvet vuodelta 2013 (punaiset) ja 2018 (siniset) Hyytiälän SMEAR-männikössä. Pisteet on valittu 2 m leveältä kaistalta. Puiden kasvu ja poistuma näkyvät ihmissilmälle, joka tulkitsee dataa.

Metsänmittauksen kehitys viimeisten 10-25 vuoden aikana on ollut pitkälle uusien kaukokartoitus- ja tulkintamenetelmien ansiota. Tiedonsiirto-, säilytys- ja käsittelykapasiteetti ovat parantuneet samalla. Tietomäärät ovat valtavia. Koko Suomen ilmakuvaaaminen 40 cm resoluutiossa tuottaa 75 teratavua kuvatietoa, jos jokaisella kuvalla on 20% muilla kuvilla näkymätöntä pinta-alaa, ja kuva on tyypiltään nelikanavainen 16-bittiiä per kanava (48 bittiiä per pikseli). Pelkkä datan siirto 50 Mbps yhteydellä vie 3580 tuntia eli 5 kuukautta.

Ilmakuvaus

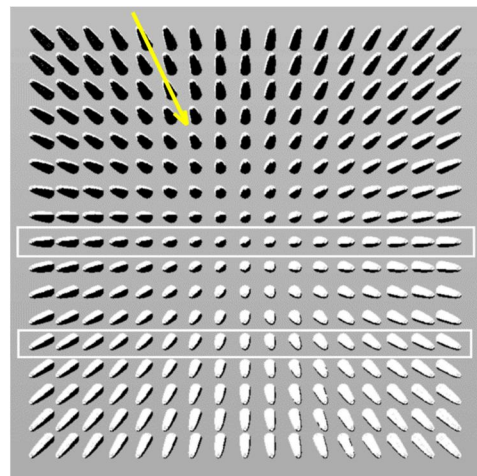
Ilmakuvilta voidaan tulkita maastoa, mitata koordinaatteja ja piirtää karttoja. Seuraavassa ilmakuvausta käsitellään metsätiedon keruun näkökulmasta. Katso myös luku ”1.3.3 Puiden mittaus ilmakuvilta ja laserkeilaushavainnoista, puu kerrallaan”.



Kuva 94. Ilmakuvauksen periaatepiirros filmikameroiden ajalta. Kts. selitys leipätekstistä.

Vakavasti otettava ilmavalokuvaus maksaa noin 2500-3000 €/h sekä noin 5-6000 € lähtö- tai mobilisaatiokustannuksia (pilotti + navigaattori, nopea paineistettu potkuriturbiini-kone). Kuvattaessa kone lentää nopeudella 60-80 m/s, lentokorkeus on 1-10 km ja mukana on kamera, jossa on ainakin yksi linssi ja kuvan tallentava sensori. Kuva 94 esittää aikaa, jolloin kuva otettiin filmille, jonka koko oli 23 x 23 cm ja filmi kelaui isolta rullalta toiselle sitä mukaa, kun kuvia otettiin ja filmille valottui maisemaa koneen alta. Valittavana oli mustavalko (bw), mustavalkoinfra (bw-i), väri (c) tai väri-infrafilmi (cir). Kameran polttoväli oli 15, 21 tai 30 cm, ja (vaihdettava) optiikka oli kallista, sillä kuvissa oli hyvin vähän piirtovirheitä (eli kuvat olivat +/- täydellisiä neulanreikä-kamerakuvia) tai optiikasta aiheutuvia tummuuseroja (valonsäteet jotka taittuvat paksummasta optiikasta vaimentuvat, [vinjetointia](#)) tai [kromaattista aberraatiota](#) (eri valon värit taittuvat eri tavoin sotkien kuvaa). Kuvia otetaan kirkkaina aurinkoisina päivinä, jolloin aurinko kipuaa maksimissaan 53 asteen korkeudelle Etelä-Suomessa, keskikesällä. Kuvaussäät ovat ”kortilla”, sillä pilviä tai varjoja ei sallita ja auringon korkeuskulman tulisi olla yli 30 (33) astetta. Ilmakuvaukskameraa voi kuitenkin siirtää säiden mukana toisin kuin satelliitissa olevan kameraa.

Ilmakuvakamera tuottaa **keskusprojektion** alapuolella näkyvästä maisemasta (Kuva 95). Ellei jonkin syyn takia ole tarpeen, pyritään kamera pitämään pystysuorassa eli kameran optinen akseli on luotisuoran kanssa yhdensuuntainen. Kohteet, joissa on korkeusvaihtelua kuvautuvat keskusprojektion takia kuin ne kaatuisivat pois päin kuvan keskipisteestä (Kuva 95). Tämän **säteissiirtymä** -ilmiön takia ilmakuva ei voi käyttää tarkkana karttana, koska esim. lipputanko, jolla on selkeä XY-sijainti, näkyy kuvalla viivana, kun ilmakuva oikaistaan kartalle (karttaprojektioon) käyttäen esim. maanpinnan **korkeusmallia**. Mitä lyhyempi on kameran polttoväli, sitä suurempi on avautumiskulma, jonka kamera näkee, ja sitä suurempi on keskusprojektion aiheuttama efekti. Ellei kuvaa oteta tasaisen pilviverhon alta (käytännössä lennokkikuvauksessa näin voidaan toimia) näkyy kuvalla aina suoran valon aiheuttamia varjoja paitsi sen kuvapisteen lähellä, jossa lentokoneen varjo näkyy (Kuva 99). Vastavalon puolella, kuvan laidoilla olevat puiden latvukset näkyvät tummina, koska kameraan näkyy niiden varjoon jäävä puoli. Vastaavasti latvukset ovat kirkkaampia myötävalon puolella (Kuva 95).

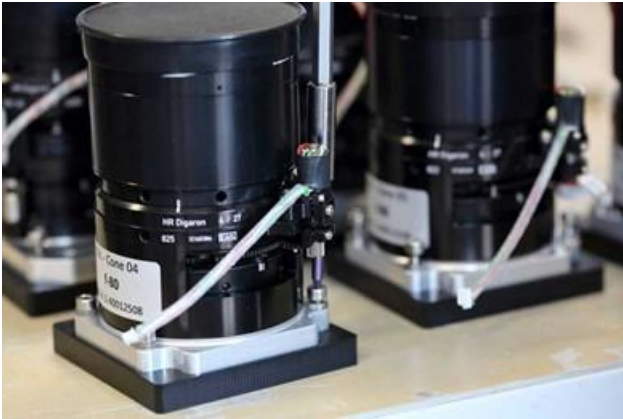


Kuva 95. Ilmakuvan keskusprojektio. Auringonvalon tulosuunta on merkitty keltaisella nuolella. Kuvan kohteita ei pystytä oikaistamaan kuin yhteen pintaan $Z = f(X, Y)$, joten syntyvälle oikaistulle kuvalle, esim. ortoilmakuvulle (ilmakuvakartta), jää aina säteissiirtymän aiheuttamia virheitä, jotka kasvavat pois päin kuvan keskipisteestä (nadirista). Puut ”kaatuvat” ja ne näkyvät vasta-sivu-myötävalon vaihteluun.

Kamera mittaa valoa, pikseliin lankeaa tietty määrä (energia) fotoneja, jotka kulkeutuvat läpi kameran aukon (apertuurin) linssin pikseliin ohjaamina. Kun aukko on iso ja/tai [valotusaika](#) on pitkä, energiaa kertyy enemmän. Isompi pikseli kerää enemmän fotoneja kuin pieni, ja siksi kuvan radiometrinen laatu (sävyjen lkm on suurempi) on parempi kamerassa, jonka pikselit ovat suuria. Ilmavalokuvauksessa kaikki valo on peräisin auringosta, ja vain sitä voi kulkeutua pikseliin. Vertailuksi voidaan todeta, että salamavalolla kuvattu kuva on erilainen kuin luonnonvalolla otettu valokuva. Syitä ovat valon tehosppektrin erot (valon koostumus eri aallonpituuksista), ja valon suuntajakauma. Ammattivalokuvaajat käyttävät useita salamalaitteita ja pehmentävät valoa ja varjoja vaaleilla varjoilla. Ilmakuvauksessa tähän ei ole mahdollisuuksia. Kameroissa on suotimia, joilla vaikutetaan siihen, minkä aallonpituusalueen fotoneja pääsee pikseliin (filmille). Kapea kaistanpäästösuodin vähentää pikseliin tulevan

energian määrää, mutta fotonien aallonpituus on pienellä alueella ja kuvilta ”nähdään värieroja”.

Noin vuoteen 2005 käytössä oli yksinomaan filmikameroita (ilmakuvauskamerat), vaikka satelliittisensoreissa filmistä luovuttiin jo 1960-luvulla. Digitaaliset ilmakuvakamerat muodostuvat usein monesta erillisestä (vierekkäisestä) kamerasta, ja useampi objektiivi katsoo +/- samaan suuntaan. Kameroiden suotimet poikkeavat toisistaan, ja kukin mittaa omaa kanavaansa. Kuvattaessa kaikkien kameroiden sulkiimet aukeavat +/- samanaikaisesti ja alueen monikanavakuva (esim. Red, Green, Blue + infrared) muodostetaan jälkikäteen laskennallisesti.



Kuva 96. Microsoft UltraCAM kameroissa on useita objektiiveja (kameroita), jotka valotetaan samanaikaisesti kuvattaessa. Osa syntyvistä kuvista on herkkiä halutulle spektrille, osa taas laajakaistaisia (mustavalko). Kuvia yhdistelemällä saadaan aikaiseksi erotuskyvyltään ja sävyiltään erilaisia kuvatuotteita. <https://www.vexcel-imaging.com/ultracam-eagle/>.

Kun ilmakehän otetaan, sijaitsee kamerasuuttimen polttopiste (projektiokeskus, linssin sisällä) tietyssä XYZ-pisteessä (töki kamera hieman liikkuu kuvaa valottaessa) jota sanotaan kuvanottopisteeksi. Kuvataso (aiemmin filmiemulsio, nykytemmin CCD-kenno) on polttopisteen ”takana” tietyllä etäisyydellä, jota sanotaan kamerasuuttimen polttoväliksi (f) tai kamerasuuttimen vakioksi. Tyypilliset arvot ovat noin 3-10 cm, kun ne filmi-ilmakuvakameroiden aikakaudella olivat 15-30 cm (kännykässä polttoväli on muutama millimetri). Fotoni saapuu kohteesta polttopisteeseen ja jatkaa matkaansa suoraan ja pysähtyy kuvatasolle aikaansaaden muutoksen filmissä tai CCD-kennon pikselissä. Kamerasuuttimen kierrot (kallistukset) kuvanottopisteen ympärillä vaikuttavat siihen, mihin pikseliin fotoni päättyy. Nämä kierrot, polttopisteen paikka ja kamerasuuttimen tule minimissään tuntee, jos halutaan käyttää kuvia 3D mittauksiin tai ortokuvan laskentaan.

Yhden **pikselin koko maastossa** lasketaan etäisyyden, pikselin koon ja kamerasuuttimen polttovälin avulla. Jos pikseli on 9 μm leveä, kamerasuuttimen polttoväli on 10 cm ja etäisyys kohteeseen on 3 km, on ”pikselin leveys” (d) maassa (etäisyydellä 3 km) laskettavissa verrannolla $0.000009/0.1 = d/3000$ avulla.

$$d = 0.000009/0.1 \cdot 3000 = 0.27 \text{ m eli } 27 \text{ cm.}$$

Jos pikselin on pienempi, esim. 4 mikronia, pienenee d arvoon 12 cm. Jos kamera viedään 8 km korkeuteen ja pikselin leveys on 4 μm , on pikselin leveys maassa 32 cm.



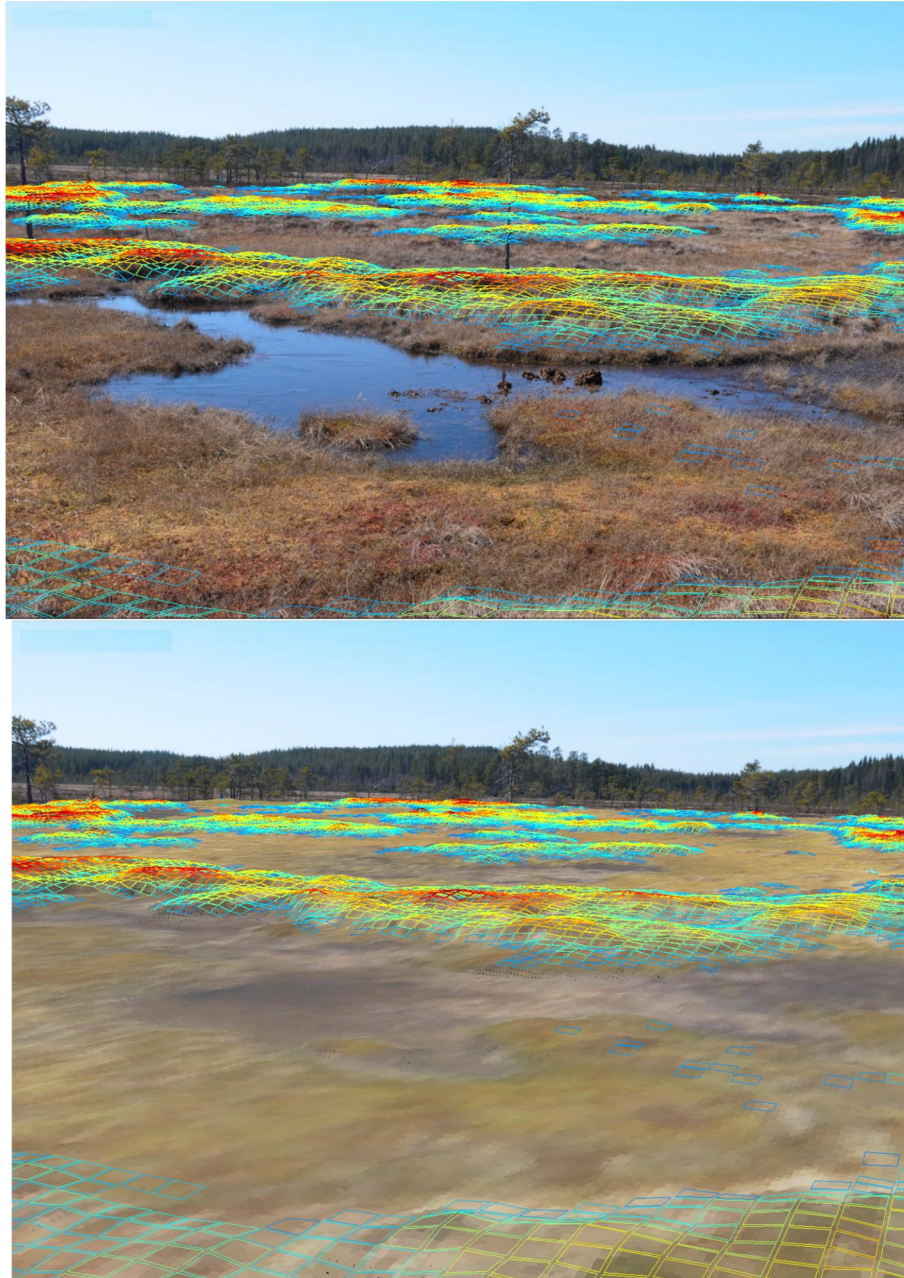
Kuva 97. Hyytiälän metsäseman vanha pihapiiri; mustavalkofilmi 1946, mustavalkoinfrafilmi 1985, väri-filmi 2002, vääräväri-filmi 2002, digitaalinen kamera ja väärävärikuva 2006, digitaalinen RGB-kamera 2013. Kuvaussuunnat ovat vaihdelleet eri kertoina.



Kuva 98. Pihapiiri kuvattuna 4 km korkeudesta ADS40 rivikameralla, jossa on 4 tarkkaa (kaistanleveys 50 nanometriä) aallonpituusalueita, BLUE, GREEN, RED ja NEAR-INFRARED. Huomaa sinisen kanavan (aallonpituus 450 nm) heikko kontrasti (sumeus) ja heikot varjot. Infrapunalla (900 nm) kasvillisuus on kirkasta ja kirkas peltikattokin (rakennus vasemmalla) tumma. Kanavakohtaiset kuvat esitetään tässä mustavalkoisina (intensiteetti) kuvina.



Kuva 99. Modifioidulla RGB-kameralla pilvisenä päivänä otettu lennökkikuva. Varjot puuttuvat (pilvinen kuvaussää), valon määrä vähenee alempana latvustossa, kun diffuusi (joka suunnasta tuleva) valo sammuu puiden varjostuksen lisääntyessä. Punainen kanava "näkee" myös infrapunavaloa, koska pikseleiden edestä on (modifioitu) poistettu infrapunasäteilyn estävä ylipäästösuodatin. Lehtipuut ovat kirkkaan punaisia, koska ne heijastavat enemmän infrapunavaloa verrattuna havupuihin. Keskusprojektio kaataa pystysuoria puita poispäin nadirista, joka sijaitsee suoraan kameran alla, mutta ei välttämättä kuvan keskellä, ellei kuva ole täydellinen pystykuva. (nuolella osoitettu).



Kuva 100. Ylempi kuva: Suon (kermiräme) pinnalla otetulle kuvalle on projisoitu tarkalta suon pinnan korkeusmallilta tulkitut määttää 20 x 20 cm rasterina, jonka väritys vastaa määttään korkeutta. Alempaan kuvaan on projisoitu 300 m korkeudelta otetun ilmakuvan noin 5 x 5 cm kokoiset pikselit. Tämä on tehty siten, että pintamallin päällä on kuljettu 5 cm välein, ja XYZ pisteestä on projisoitu ilmakuvalle, josta on otettu pikseliarvot (RGB), joilla maakuva on väritetty.

Kuva 101 ja Kuva 102 havainnollistavat ortoilmakuvan laskentaa. [Ortoilmakuva](#) on kartta, jossa pikseleillä on taso-koordinaatit, pohjoinen on kuvan ylälaidassa ja itä oikealla. Ortokuvat ovat tärkeitä, sillä niiltä tulkintaan metsäalueen metsikkörakennetta ja voi mitata pinta-aloja. Ortokuvan laskennassa pikselien sävyarvot haetaan ilmakuvasta, kun tiedetään pikselin X, Y ja Z koordinaatit. Jos käytössä on maaston korkeusmalli, saadaan Z sieltä ja ortokuva "oikais-taan maanpintaan". Esimerkin kuvakolmikossa on kaksi

viistokuvaa (kuvaussuunta pohjoiseen, kuvaus rakennuksen katolta) ja yksi ilmakeku, joka on lennetty suunnassa pohjoisesta etelään. Näille kuville on ratkaistu edellä esiteltyt parametrit: kuvauspaikka ja kameran kierrot. Niiden avulla tunnetaan kaikki kuvasuorat "pikselistä ulos 3D maailmaan ja takaisin" ja voidaan "siirtää pikselit kartalle" eli tehdä orto-oikaisu.



Kuva 101. Kaksi viistokuvaa, jotka on otettu rakennuksen katolta kahdesta pisteestä, noin 5 metrin etäisyydellä toisistaan (punaiset neliöt ilmakuvalla) sekä ilmakuva, jossa pihapiiri näkyy ja keskusprojektiovirheet ovat pieniä. Kuville on merkitty 15 x 30 m alue, jolle lasketaan ortokuva (-pala) 5 cm resoluutiossa eli (301 x 601) xy-pisteessä, joille on luettu maastomallilta korkeus (Z), ja näille XYZ pisteille on haettu ilma- ja maa-kuvalta pikseliarvot. Kuva 102 näyttää vasemmasta viistokuvasta ja ilmakuvasta lasketut ortokuvat.



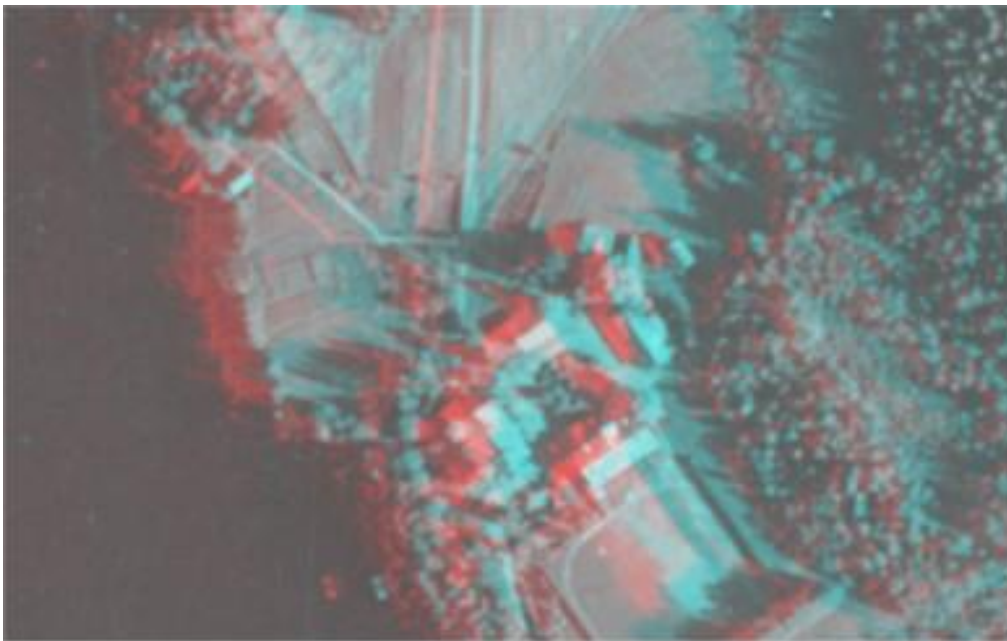
Kuva 102. Maanpinnan tasoon (korkeusmallille) oikaistut ortokuvat. Pikselikooksi valittiin 0.05 m. Keskusprojektio aiheuttaa ongelmia viistokuvalla siellä, missä maanpinta ei näy. Huomaa, ettei auto viistokuvassa ollut ilmakuvauksen aikana parkkeerattuna. Viistokuvasta tehdyssä ortokuvassa puuttuu lisäksi maapisteitä ortokuvan alareunassa ja vasemmasta alakulmasta (mustaa kuvaa). Ne eivät näkyneet alkuperäisessä kuvassa. Ortokuvan vasen alakulma on pisteessä 2515245 E, 6859890 N (kkj-2) ja kuvan koko on 15 x 30 m. Kuvan rivit ovat itä-länsisuuntaisia ja sarakkeet pohjois-eteläsuuntaisia.

Ilmakuvamittaukset. Ortoilmakuvalta (tai satelliittikuvalta) voi mitata 2D etäisyyksiä, koska se on oikaistu tunnettuun koordinaatistoon. (Kuva 103). Maanpinnan yläpuolella olevien kohteiden sijainnin voi tarkasti mitata vain, jos ortokuva on alkuperäisen kuvan keskiosista, läheltä nadiria. Muutoin paikkoihin tulee keskusprojektion aiheuttamia virheitä ja paikat siirtyvät systemaattisesti pois päin kuvan

keskeltä. Ilmakuvia tulkittamalla voi piirtää metsikkökuvioiden rajoja. Stereoskooppinen tarkastelu auttaa havaitsemaan puuston koko- ja korkeuseroja (Kuva 104). Stereotarkastelumahdollisuus on implementoitu moniin GIS-ohjelmistoihin, mutta yleisesti kuviorajoja piirretään vieläkin suoraan ortoilmakuvan päälle.



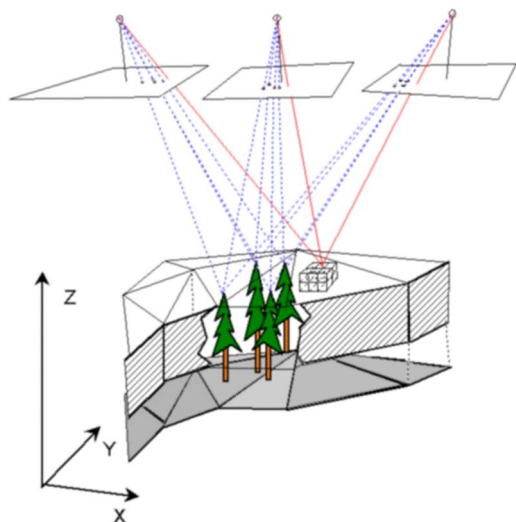
Kuva 103. Ortoilmakuvamosaikin sauma. MML - Kansalaisen karttapaikka, Nyby Porvoo. Huomaa katon harjan "liike" kuvasaumassa samoin kuin puiden erilainen "kaatumissuunta" sauman eri puolilla. Mosaiikki on koostettu eri kuvilta ja keskusprojektion erot aiheuttavat saumoissa "ongelmia" kohteille, jotka ovat maanpinnan yläpuolella, kuten rakennuksen katon harja. Myös sävyt muuttuvat saumassa, erityisesti, koska auringon ja kameran keskinäinen geometria ei täsmää.



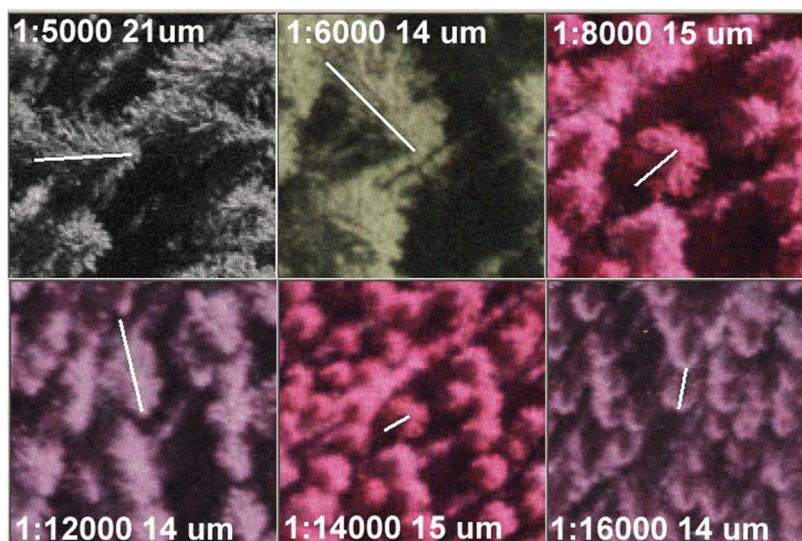
Kuva 104. Vuoden 1946 ilmakuvista muodostettu anaglyfistereopari. Hyytiälän metsäasema.

Ilmakuvalta voidaan mitata kohteen **3D koordinaatteja**, jos kohde näkyy vähintään kahdelle kuvalle. Sama piste osoitetaan eri kuvilta, ja kohteen sijainti lasketaan kuvasäteiden leikkauspisteeseen (Kuva 105). Ilma- ja lennökkikuvilta voidaan automaattisesti mitata 3D pisteitä latvuston yläosista. Maanpinta näkyy harvoin usealle kuvalle, joten sieltä ei saada havaintoja. Yleisesti voidaan todeta, että pää- ja lisävaltapuut

näkyvät pääosin ilmakuvilla, mutta iso osa väli- ja aluspuista jää näkymättä.



Kuva 105. Monikuvamittaus. Kun kuvat on orientoitu tarkasti, kohtaavat kuvasäteet melko tarkasti (3D) kohdetilassa. Latvoja paikantaessa, se voidaan jakaa hakuavaruuteen, joka on maanpinnan yläpuolella. Algoritmi etsii latvoja eri kuvilta ja seuraavassa vaiheessa niiden joukosta etsitään uskottavia kombinaatioita, jotka vastaavat latvoja kohdetilassa (latvustossa).



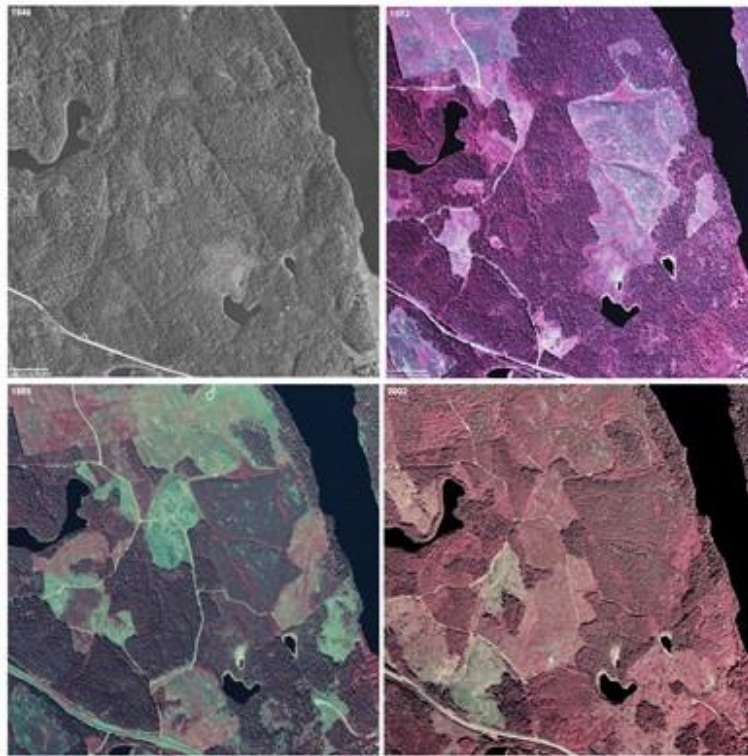
Kuva 106. Monikuvamittaus kohteena yksittäinen metsäkuusi, jonka "runko" (pystysuora vektori latvasta maanpinnalle) on projisoitu kuville, jotka on kuvattu eri korkeuksilta ja eri ajankohtina (1997, 2002 ja 2004). Mikrometri-(um)lukema kuvaa filmin skannausresoluutiota. Nykyisten ilmakuvakameroiden pikselit ovat 5-10 um kooltaan, kun taas kännykkäkameroiden pikselit voivat olla jopa alle 2 um. Kuvien tarkka orientointi on edellytys kuvien yhteensovitukselle, on kyse saman ajankohdan (kuvauksen) kuvista tai eriaikaisten kuvien analyysistä.

Ilmakuvalta voi mitata valta- ja välipuille:

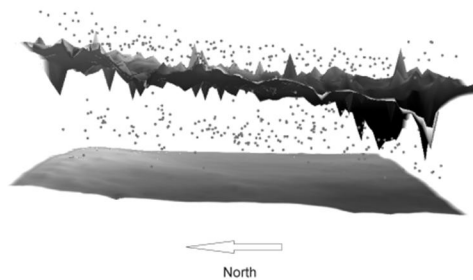
- Latvojen 3D tai latvusten 2D/3D sijainnin
- Latvussegmentin (kuvan nadirin lähellä)
- Latvuksen leveyden/pinta-alan (segmentistä) tai muodon kuviin sovitetusta 3D latvusmallista
- Pikseliarvoja latvuksen eri osista (suorassa valossa oleva latvuksen osa ja varjoon jäävä) – käytetään puulajin estimointiin, kuolleiden puiden paikantamiseen
- Puun pituuden, jos latva paikannettu 3D

Puun rungon läpimitta voidaan estimoida noin 10% tarkkuudella, kun puulle tunnetaan puulaji, pituus ja latvuksen läpimitta, virheettä. Estimointi tapahtuu yksinkertaisilla regressiomalleilla. Tarkkuus tarkoittaa, että 30 cm paksun rungon estimaatti on +/- 3 cm 68% tapauksissa. Kovin täsmällisiin mittauksiin ei siis kyetä ilmakuvien avulla, mutta jos prosessi saadaan automatisoitua, saadaan paljon mittauksia, joiden satunnaiset virheet kumoavat toisensa suuressa määrässä mittauksia.

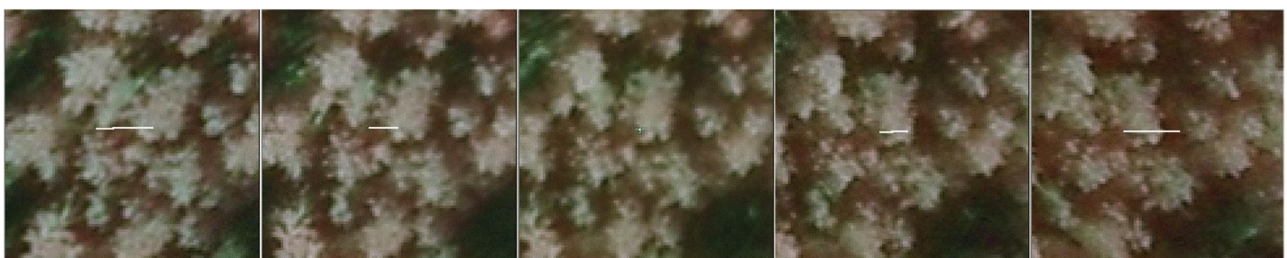
Ilmakuvalta voi mitata aluetunnuksia. 4-6 km korkeudelta otetun ilmakuvan maastoresoluutio on luokkaa 40-60 cm. Kuvalla näkyy teksturi, jonka muodostavat erikokoiset ja eri puulajin latvukset, aluskasvillisuus, kivet, maanmuokkausjäljet jne. Yksittäiset latvukset erottuvat, jos ne ovat tarpeeksi suuria, 2-3 m läpimitaltaan. Jos metsää on käsitelty kuvioitain, on kuviorakenne usein erotettavissa kuvan väreissä ja tekstuurissa. Tätä voi hyödyntää myös automaattisessa ilmakuvan segmentoinnissa kuvioihin. Kuvilta laskettua tekstuuripiirteitä ja sävyarvoja on myös kokeiltu malleissa, joissa niillä selitetään puuston ominaisuuksia, kuten runkotilavuutta, runkojen lukumäärää, keskiläpimittaa ja -pituutta sekä puulajijakaumaa. Värisävyjen (ja tekstuurin) käyttöä vaikeuttaa kuvan alueella vaihteleva aurinko-kamerageometria (ja keskusprojektiio) (Kuva 95), eivätkä varsinkaan puulajitulkintaa koskevat tulokset ole olleet "kehuttavia".



Kuva 107. Erään neliökilometrin metsikkörakenteen kehitys kuvattuna vuosien 1946, 1973, 1985 ja 2002 ortoilmakuvilla. Vuoteen 1946 mennessä alueella ei oltu tehty lainkaan avohakkuuta (== harrastettu metsikkötaloutta).



Kuva 108. Ilmakuvien automaattisella yhteensovituksella (image matching, Structure from Motion) saadaan tuotettua 3D pisteaineisto, josta voi parhaimmillaan erottaa yksittäisiä latvuksia tai laskea ns. korkeusjakaumapiirteitä. Tässä ajatellaan, että on olemassa maanpinnan korkeusmalli, ja jokaiselle pisteelle voidaan laskea korkeus maasta (vrt. laserkeilaus). Esimerkin latvuston korkeusmalli on laskettu ilmakuvarista (v. 2002). Digitaalisten ilmakuvarokameroiden ansiosta filmiä ei enää tarvitse säästää, ja yhteensovituksessa voi olla mukana jopa kymmeniä kuvia (lennokkikuvaus).



Kuva 109. Ilmakuvaus, jossa kuvien peitto on yli 80% ja sama kohde (17-metrinen männyn latvus) näkyy viidellä kuvalla, jotka on otettu lennettäessä yli alueen. Latvaa on klikattu keskimmaisessa kuvassa ja kuville on piirytynyt ko. kuvasäde +/- 5 m syvyydessä oletetusta latvan korkeudesta. Kuvan automaattinen yhteensovitus vastinpisteiden automaattiseen löytymiseen eri kuvaparien kesken, pikseli pikseliltä. Kuvien tarkka keskinäinen orientointi rajaa haun yksilotteiseksi (kuvien viivanpätkät, epipolaarisuorat). Kuvien yhteensovitus onnistuu parhaiten selkeille pinnoilla. Puut ovat "fraktaalisia kohteita", "piikkejä maisemassa" – ja siksi yhteensovitus (image matching) metsässä on haastavaa.

Ukkosenilmalla voimme arvioida "kuinka lähellä ukkonen on". Näköhavainto antaa suunnan salamaan, ja, jos laskemme ajan, joka kuuluu äänen saapumiseen, saamme selville etäisyyden äänen etenemisnopeuteen perusteella. Havaitsemme salaman "napakoordinaatistossa", jonka origossa itse olemme. Ajanmittauksen aloittaa näköhavainto ja lopettaa kuuloaistimus.

Kaikuluotaus ja tutka toimivat samalla periaatteella, joskin näissä tekniikoissa tarvitaan laite, joka tuottaa signaalin tiettyyn suuntaan ja laite joka kuuntelee viivettä, joka signaalilla kestää matkalla. Äänen nopeus on noin 340 m/s, kun taas sähkömagneettinen säteily etenee n. 300,000 km/s. Jos kaiku vastaa kahden sekunnin viipeellä, on kohde noin 340 metrin etäisyydellä. Signaali matkaa edestakaisin.

Kaksi militääriteknologiaa tuli 1990-luvulla siviilien ulottuville. Reaaliaikainen cm-tarkka satelliittipaikannus mahdollisti lentokoneeseen asennetun sensorin tarkan paikannuksen jopa 2 kertaa sekunnissa (2 Hz). Tämä tarkoittaa lentoreitin tarkkaa paikantamista noin 40 metrin välein, jos kone etenee nopeudella 80 m/s. Jos koneen liike on tasaista, voidaan sijainti interpoloida melko tarkasti tuolle 40 metrin välille, josta ei ole GNSS-havaintoa. Toinen mullistava tekniikka liittyi juuri tähän. [Inertiaalimittarit](#) (IMU), jotka havaitsivat kolmiulotteisia kiihtyvyyksiä jopa 200 kertaa sekunnissa auttavat päättämään, missä kone oli GPS-havaintojen välissä, silloinkin kun lentorata ei ole tasainen. Sivutuotteena saadaan koneen kallistukset (lentosuunta (heading), nokan pystykulma (pitch) ja siipien kallistukset (roll)) mikä myös kertoo, mihin suuntaan sensori, esim. kamera, kulloinkin on kalllellaan, varsinkin jos IMU kiinnitetään kameraan, eikä koneen

runkoon (kamera tai laserkeilain kiinnitetään usein jalustaan, joka kompensoi koneen liikkeitä pitäen sensorin halutussa suunnassa). Yhdistämällä GPS ja IMU saadaan aikaiseksi INS (inertial navigation system), jonka avulla saadaan melko tarkka tieto sensorin paikasta ja asennosta ajanhetkellä, jona kuva on otettu tai tutkasignaali vastaanotettu. Parhaat IMU:t antavat roll- ja pitch- kallistukset 40 mikroradiaanin tarkkuudella, mikä vastaa 4 cm virhettä yhden kilometrin etäisyydellä. IMU:t halpenevat jatkuvasti ja pienikokoisia laitteita saadaan lennokkikäyttöön.

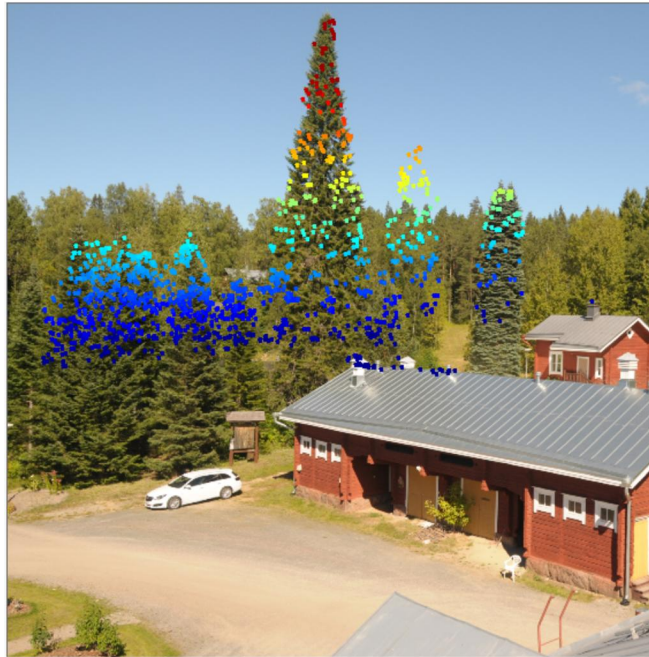
INS-systeemit mahdollistavat lentolaserkeilauksen. Tässä käsitellään vain pulssimuotoista signaalia tulkitsevia keilaimia. On olemassa myös jatkuvan kantoaallon laitteita. Laserkeilain on periaatteessa laseretäisyydmittari, joka pystyy tekemään kymmeniä tai satoja tuhansia mittauksia sekunnissa. Lähetin lähettää valopulssin, jonka pituus on vain muutamia metrejä (alle 10 nanosekuntia) ja pulssi etenee 30 cm/nanosekunti. Pulssin teho nousee muutamassa nanosekunnissa nollasta huippuunsa (kymmeniä kilowatteja) ja laskee taas muutaman nanosekunnin kuluessa nollaan. Lähetysaika laiteaan talteen pikosekuntien tarkkuudella. Sen jälkeen "herätetään" vastaanotin, joka käyttää samaa kelloa. Vastaanotin "katselee" (optiikan läpi) matkalleen lähetetyn hyvin kapean pulssin suuntaan ja tallentaa signaalin, kun se nousee esiin kohinasta. Aikaerosta (joka fotoneilta kului edestakaiseen matkaan) voidaan laskea miltä syvyydeltä (etäisyydeltä) kaiku palasi. Joskus kaiussa on vain yksi selkeä piikki, kun se osuu maahan tai selkeään pintaan, mutta kasvustosta tulee usein monihuippuinen kaiku (**Error! Reference source not found.**).



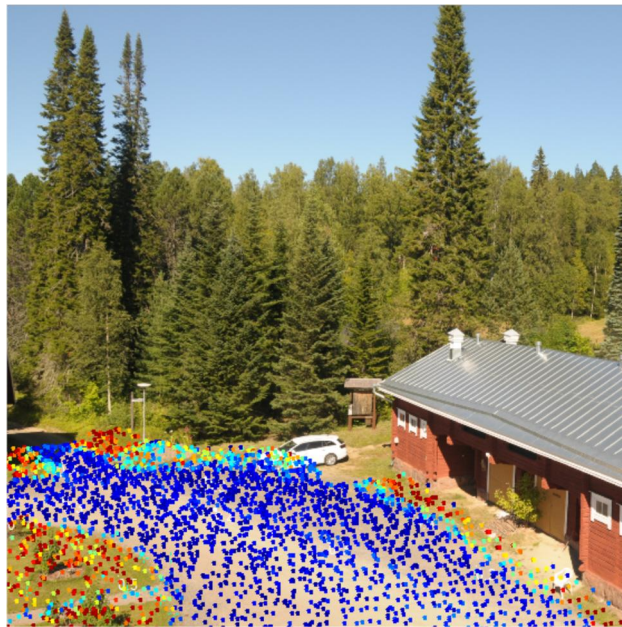
Kuva 110. 4 m korkeaan lyhtytolppaan osuneita laserpulsseja projisoituna maavalokuvalle (Kuva 101). Paluusignaalin amplitudiarvot on vastaanotettu 1 nanosekunnin eli 15 cm etäisyysvälein ja piirretty pisteinä pulssin reitille, jos amplitudi on ylittänyt kohinatason. Jokaisen pulssin 256 amplitudiarvoa on myös tulostettu asteikolle, joka on 38 m syvä (256 nanosekuntia pitkä aika-asteikolla). Tulostetut aaltomuodot on keskistetty ajan suhteen kaiuun, joka saatiin ensimmäisenä, joka "piikkää" noin syvyydessä 4 m (aaltomuodon tallennus käynnistyy 1. kaiusta ja tallennus sisältää puskuriin tallennettuja amplitudiarvoja noin 4 "edeltävän metrin" matkalta). Yksi pulsseista on tuottanut kaksi kaikua, toisen heikon lyhdystä, toisen vahvemman maasta. Lisäksi joukossa on lyhdystä kaiun tuottaneita pulsseja, joista on saatu heikko signaali maasta. Laserkeilauksessa käytettiin maksimissaan 15 asteen keilauskulmaa ja kyseistä maastonkohtaa keilattiin usealta lentolinjalta, mikä näkyy pulssien tulosuuntien vaihteluna.

"Keilain" –sana tulee siitä, että tätä "nopeaa etäisyysmittaria" kuljetetaan lentokoneessa ja lähetyn pulssin suuntaa poikkeutetaan jatkuvasti (esim. peilillä), ja maisema koneen alla

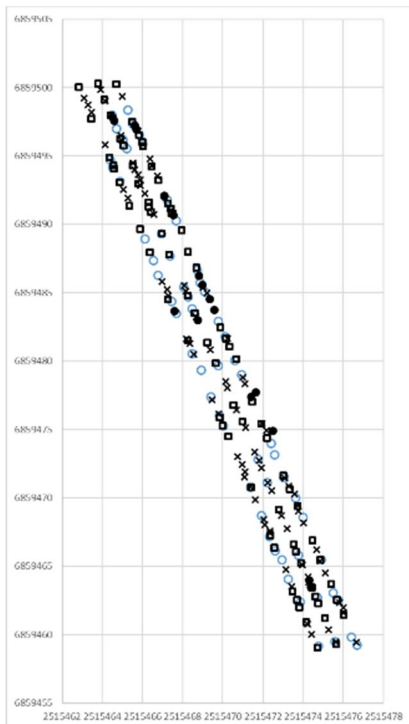
tulee näytteistetyksi yleensä noin 30-40 asteen avautumiskulman leveydeltä lentosuuntaa vastaan. Kolmenkymmenen (+/- 15) asteen avautumiskulmalla keilattu kaista on 482 m leveä yhden km lentokorkeudelta.



Kuva 111. Laserkeilaus tuottaa pistepilven, jossa jokaisella pisteellä korkeus maasta ja tieto heijastuksen voimakkuudesta / muodosta. Tässä on tulostettu pisteitä (pieneltä alueelta), joiden korkeus on yli 6 m maasta. Yksi puu on kaadettu laserkeilauksen ja kuvanoton välisenä aikana.

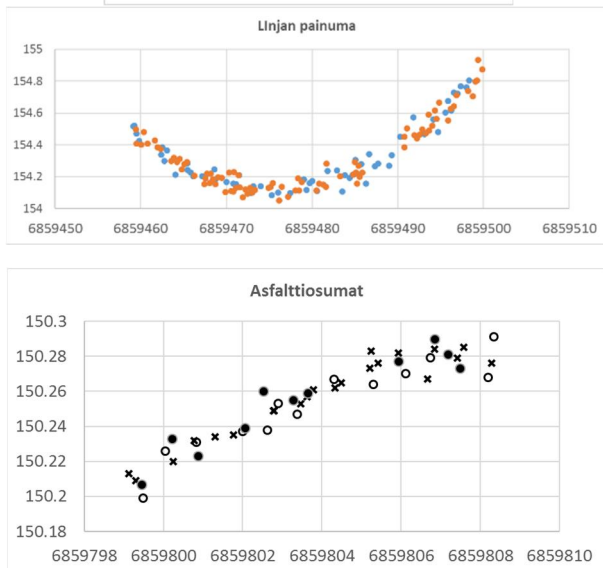


Kuva 112. Kuvaan on tulostettu pisteitä, joiden korkeus pintamallilta on alle 1 m. Väri tulee heijastuksen voimakkuudesta, joka on kasvillisuudessa voimakkaampaa kuin hiekalta.

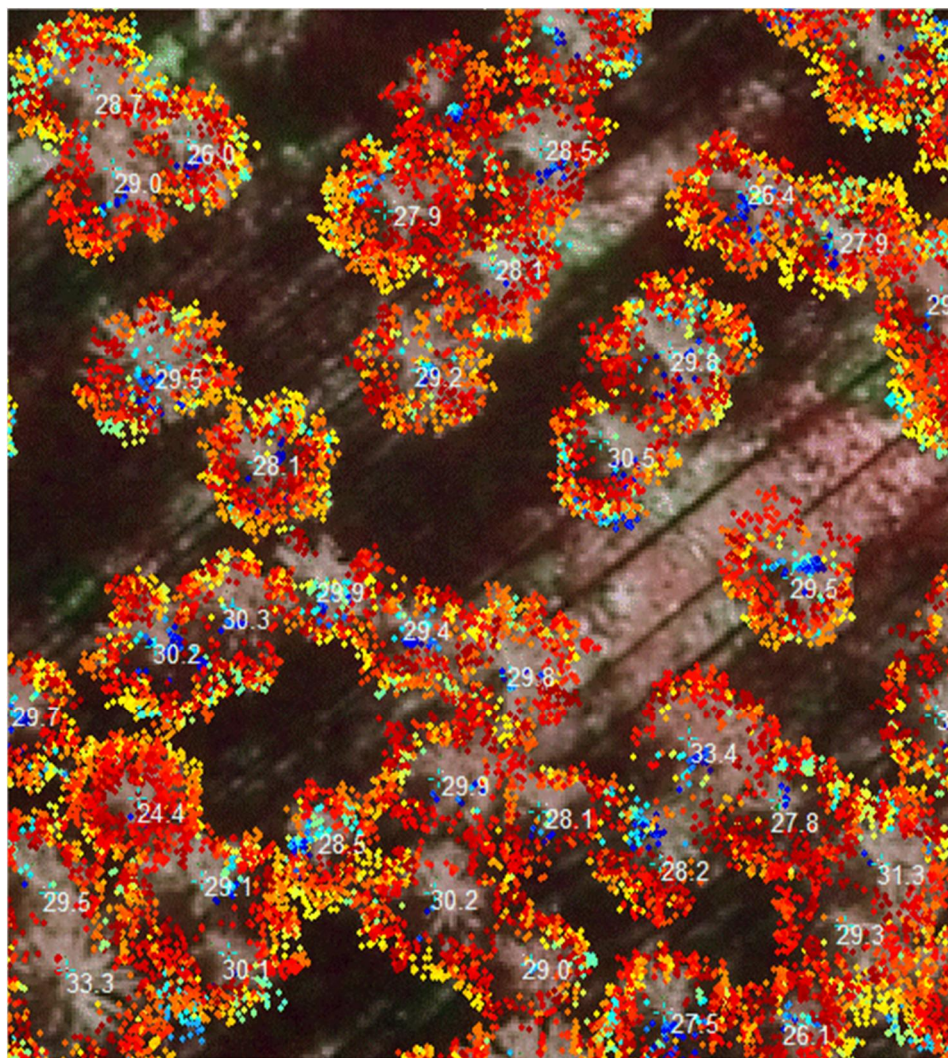


Laserkeilaus mullisti korkeusmallinnuksen, sillä 1-2 km korkeudesta pystytään keilaamaan 500-1000 m leveää kaistaa s.e. yhdelle neliömetrille osuu jopa useita pulsseja – jopa kymmeniä, jos lennetään matalalta. Tiheässäkin metsässä fotoneja päätyy maanpintaan asti s.e. paluukaiku voidaan havaita. Näistä pisteistä pystyy rakentamaan mallin maanpinnan muodoista, myös latvuston alta.

Pistepilveä voidaan analysoida ja siltä voidaan yrittää paikantaa yksittäisiä puita (latvuksia) samaan tapaan kuin ilmakuvilta. Puulajin tunnistaminen voi perustua latvuksen muotoon tai kymmenien latvukseen osuneiden pulssien heijastusominaisuuksien tulkintaan. Puun pituus, latvuksen koko ja puulaji ennustavat rungon läpimittaa, mutta RMSE-tarkkuus on vain 10%, vaikka tunnukset saataisiinkin virheettä. Toisin sanoen 20 cm läpimittaisen (rungon) puun läpimitta-arvio on vain +/- 2 cm oikeasta 68% tapauksista, vaikka kaikki menisi oikein – puulaji, pituus ja latvuksen koko.



Kuva 113. Laserkeilaus 700 m korkeudelta voi olla tarkkaa. Ylemmässä kuvassa neljän lentolinjan osumat voimalinjaan, jossa johdot ovat 1.2 m toisistaan (näkyvä suoraan yläpuolelta). Eri lentolinjojen pisteet on saatu "kohtaamaan samassa paikassa" (linjasovitus, strip matching). Alemmassa kuvassa on kahden lentolinjan osumat "sivuprofilissa". Johtimien z-arvot vaihtelevat noin 10 cm, mitä voi pitää mittauksen korkeussuunnan kohinana, sillä johtimet kulkevat samalla korkeudella. Johtimien painuma on lähes metrin 25 m matkalla. Asfalttipinnalla korkeusarvot vaihtelevat vain muutamien senttimetrin. Laserkeilain mittaa selkeät kohteet tarkasti.

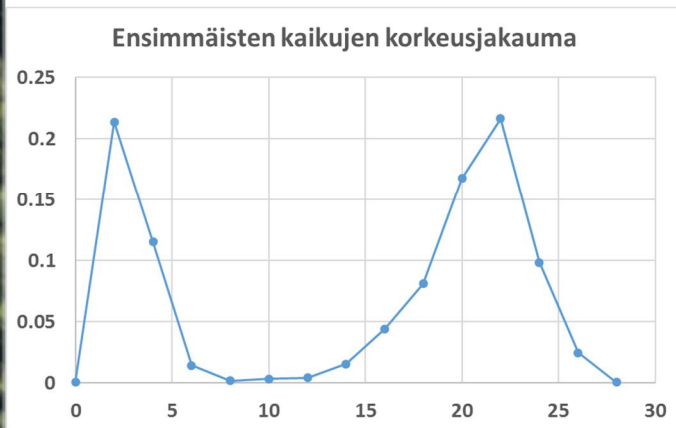
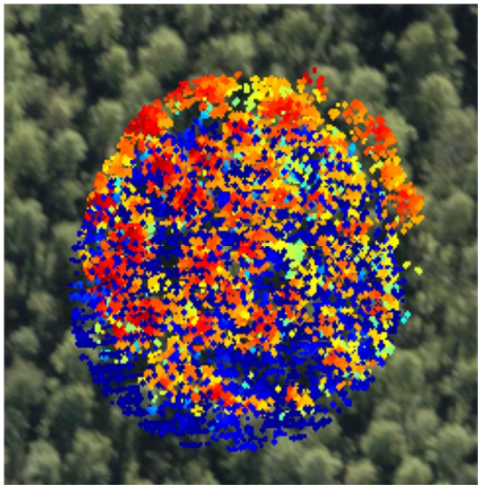
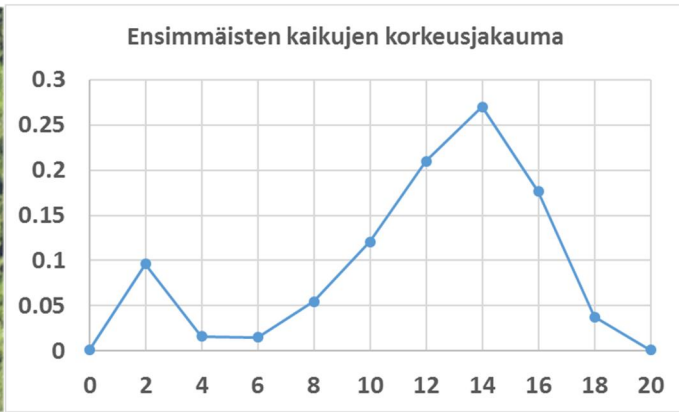
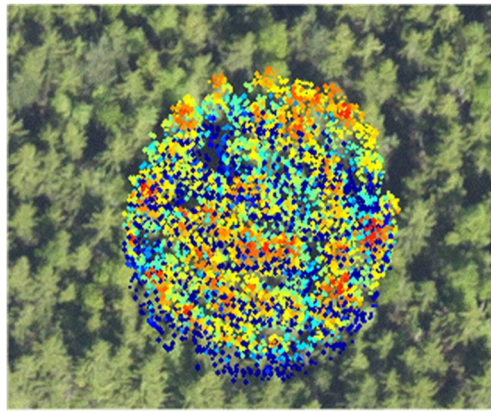


Kuva 114. Väljennetty varttunut kuusikko nadiri-ilmakuvalla, jolla kohteet näkyvät suoraan päältä. Tulostetut pisteet ovat laserosumia korkeusväliltä 5-25 m, muut on jätetty projisoimatta. Suurten kuusten latvat näkyvät siksi "reikinä" pisteiden keskellä. Operaattori on klikannut kuvan perusteella latvoja, ja näin saatu kuvasäde (ilmakuvan pikselistä kameran polttopisteen kautta kohti maata) on pysäytetty siellä missä ensimmäinen laserkeilauspiste on "tullut vastaan" (monoplotting). Tästä pisteestä on laskettu korkeus maahan, ja saatu puulle pituus.

Yksittäisten puiden mittaaminen vaatii suurta pistetiheyttä (keilauksen tiheyttä), mikä taas edellyttää matalalta lentämistä, mikä lisää kustannuksia, kun yksi lentolinja kattaa pienemmän alueen. Ns. **aluepohjaisessa lasertulkinnassa** ei tarkastelun kohteena ole enää puu vaan näyteala, ympyrä tai hilan solu. Siihen osuneista pulsseista analysoidaan korkeusjakaumapiirteitä. Toisin sanoen, jokaisella pistellä on korkeus maasta. Näistä muodostetaan jakauma, josta voidaan laskea esim. kuinka suuri osuus pulsseista painui alle 2 m korkeu-

delle, mikä mittaa latvuston sulkeutuneisuutta. 90% prosenttipisteen korkeus kertoo puuston maksimipituudesta. Maksimikorkeus on karkea estimaatti valtapituudelle jne. Kuva 115 ilmentää tilannetta. Tiheässä rehevällä kasvupaikalla kasvaneessa kuusikossa vain 10% pulsseista läpäisee latvuston ja antaa kaiun 2 m alapuolelta.

Katso myös luku "1.3.4 Puuston mittaus laserkeilaushavainnoista pala metsää kerrallaan".



Kuva 115. Ylempi kuvapari: Tiheään ensiharventamattomaan (42 v) istutuskusikkoon on rajattu 11 metrin säteinen ympyräkoeala. Kuvissa esitetään laserpisteet ilmakuvalla (vasen) ja kunkin pulssin ensimmäisen kaiun korkeusjakauma (oikea). Luokissa alle 0 m ja 18-20 m on muutamia kaikuja. Minimi on -0.11 m ja maksimi 18.3 m. Alemmassa kuvaparissa kyseessä on saman ikäinen istutuskusikko, joka myös on kasvanut harventamatta, ylitiheänä. Koivujen latvat ovat pyöreämpiä -> jakauman yläpää tulee jyrkästi alas. Latvukset ovat lyhyitä, supistuneita ja siksi jakauman ylempi huippu (latvukset) on (suhteellisesti ottaen) kapeampi, kun taas kuusikossa latvukset jatkuvat alas 5-8 m korkeuteen. Koivikossa on 3-6 metrin kuusialikasvos, mikä selittää 12 % osuuden luokassa 2-4 m maasta. Alle 1 m pulsseista päätyi 14% (ei näy kuvasta) eli kuusialikasvos pidatti maaosumia lisää, kun 0-2 m luokan osuus on 22%. Saman ikäiset koivut ovat pidempiä, kuten saattaa odottaa.

Puu ja sen tunnuks



Puiden morfologiasta ja toiminnasta

Puun rakenne on kasvun (toiminnan) tulos, johon ympäristö vaikuttaa. Esimerkiksi avoimen paikan mänty kasvat-
taa laajan latvuksen ja jää lyhyeksi – kasvattaen paksun run-
gon. Puuston tiheys ja latvuston sulkeutuneisuus vaikuttavat
valon (ja lämpöoloihin, lumisuuteen, routaan jne.) määrään
latvustossa ja metsän pohjalla. Elävä latvus ulottuu korkeu-
delle, jossa valoa on vielä riittävästi, ja sydänpuun muodos-
tuminen on yhteydessä elävän latvuksen alarajan korkeuteen
(mantopuun voidaan ajatella ”ruokkivan” eläviä oksia). Ra-
kenne, toiminta ja ympäristö vaikuttavat toisiinsa ja taustalla
on geneettisiä tekijöitä, joita ilmentää mm. puulaji.

Puulajien välillä on eroja – puhutaan valopuista ja varjoa sie-
tävistä puulajeista; nopea- ja hidaskasvuisista puulajeista;
sukcession pioneeri- ja sekundäärilajeista; kosteiden, rehe-
vien tai karujen kasvupaikkojen puulajeista; lahoa kestävästä
ja lahottajille alttiista lyhytikäisistä puulajeista jne.

Puiden kasvutapa vaihtelee. Mänty ja kuusi noudattavat mo-
nopodiaalista kasvutapaa. Kärkisilmu dominoi ja metsäpuilla
on yleensä yksi runko. Kaksihaaraisia runkoja tapaa myös.
Kuusi voi lisääntyä myös kasvullisesti alaoksasta ja joillakin
puulajeilla, kuten haavalla, kasvullinen lisääntyminen on val-
litsevaa. Löydettyäsi yhden lehmuksen tai haavan, seuraava
läheltä löytyvä on todennäköisesti samaa yksilöä. Puutekni-
sesti hyvälaatuisen rungon kasvattaminen on haastavaa mo-
nilla lehtipuilla, joiden kasvutapa on sympodiaalinen (haara-
jatkokainen) ja monirunkoiset tai runsashaaraiset puut ovat
yleisiä.

Latvus, ja sen lehdet tai neulas (haavalla runkokin) muo-
dostavat yhteyttävän koneiston. Elävää hengittävää solukkoa

on rungon mantopuussa, jälsolukossa sekä juuristossa.
Puun rakenne ja toiminta ovat tasapainossa, ja siinä missä
puu voi selvitä neulasia vioittavan pistiäisen yhden kesän tu-
hoista, se ei välttämättä selviä seuraavana keväänä iskeyty-
vistä kaarnakuoriaista, koska energiavarat eivät enää riitä yl-
läpitohengitykseen. Metsäpalo, hyönteis- tai myrskytuho ta-
pahtuvat äkkiä. Monet muut muutokset ympäristön, toimin-
nan ja rakenteen vuorovaikutuksessa ovat hitaita. Esimerkik-
si kuusen neulas (neulasvuosikerta) säilyvät puussa 5-10
vuotta. Puu ei pysty nopeasti uusimaan yhteyttävää koneisto-
aan hyödyntääkseen esim. lisääntyneen kasvutilaa tai lannoi-
tuksen tuomaa kasvupotentiaalia. Lannoituksen tuoma lisä-
kasvu saattaakin siksi tulla useamman vuoden viipeellä. Pui-
den kasvattaminen on pitkäjänteistä toimintaa. Vuonna 2017
uudistettavat puustot ovat syntyneet pääosin ennen 1950-
lukua pois lukien nopeakasvuisimmat harvennuksin hoidetut
istutusmetsät. Nyt hyväkuntoiset puustot on hoidettu vuosi-
kymmeniä aiemmin ja nyt tehty uudistamis- ja hoitotyö näkyy
vuosikymmenten kuluttua. Puiden vuotuinen pituuskasvu on
vaatimatonta, yleensä alle 30 cm vuodessa (keskiarvona). Pi-
tuuskasvu tahtuu 20-30 vuoden iällä ja paksuuskasvu hieman
myöhemmin. Vuosilustot ovat nekin yleensä alle 2 mm levey-
deltään, joskus lustoja on kymmeniä 2 mm matkalla. Taimi-
kon kehityksen 3-metriseksi viidessätoista vuodessa huo-
maa, mutta varttuneen metsän puiden kasvua tuona samana
aikana ei tahdo panna merkille.

Puu tuottaa biomassaa - puuainetta, lehtiä, neulasia, kukin-
toja, siemeniä, kuorta, pihkaa jne. Hyödynnämme puusta run-
kopuuta, selluloosaa, kaarnaa, mahlaa, öljyjä, terpeenejä, niil-
lä eläviä muita organismeja jne. Toisaalta puu on kaunis mai-
semassa, rauhoittaa mieltä, ylläpitää biodiversiteettiä, on
vaan, tmv.

Puutunnukset

Metsänmittaajan puu on helposti mitattavia ja kuvaittavia havaittuja **puutunnuksia** sekä toisaalta mittausten ja mallien avulla selville saatavia johdettuja **puutunnuksia**.

Seuraavassa esimerkkejä

- **Puulaji**

Koodaus yleisesti VMI:n mukainen (1=mä, 2=ku, 3=ra-ko, 4=hi-ko, 5=ha, 6=ha-le, 13=raita) jne.

- **Runkolaji**

- tukkipuu, saa tukin tai useamman
- kuitupuu, ei saa tukkia
- mät, kut, kot, mäk, kuk, kok –lyhenteet
Tukeilla laatuluokitus lisämääränä

- **Latvuserros**

Latvuksen asema lähiympäristössä, puiden pituussuhteiden avulla määrittäminen. Vallitsevat (pää- ja lisävaltapuut (pituus 80-90% päävaltapuista), Vallitut latvuserrokset (väli- (70-80%) ja aluspuut (50-70%). Lisäksi erotetaan ylispuut (40+ vuotta vanhempia) ja alikasvos (nuorempia, pituus alle 50%).

- **Puuluokka (latvusluokka)**

Vajaalatvuksiset, huonorunkoiset, vioittuneet ja sairaat sekä kuolleet (kelot, pötkelöt, maapuut).

- **Rinnankorkeusläpimitta (d) ja pohjapinta-ala (g) (poikkileikkausala).** Mittauskorkeus voidaan määrittää myös muuksikin ja ilmaistaan alaindekseihin, esim. d_k tai d_6 .

- **Rungon ympärysmitta (c).**

- **Puun pituus (h)**

Etäisyys, ei korkeus.

- **Elävän latvuksen pituus (h_l)**

Sääntöjä alarajan määrittämiseksi

- **Kuori (kaarna + jälsi + nila) (b)**

Kuoreton läpimitta $d_u = d - 2b$

- **Ikä**

Biologinen ikä, rinnankorkeusikä jne.

- **Puun muoto**

muotoluku f , muotokorkeus v/g , solakkuusaste $h/d_{1.3}$, muotosuhde d_x/d_y , kapeneminen d_x-d_y , latvussuhde $(h-h_l)/h$, kokonaistilavuus v , kuoren tilavuus, puun biomassa, puutavaralajit, rungon arvo.

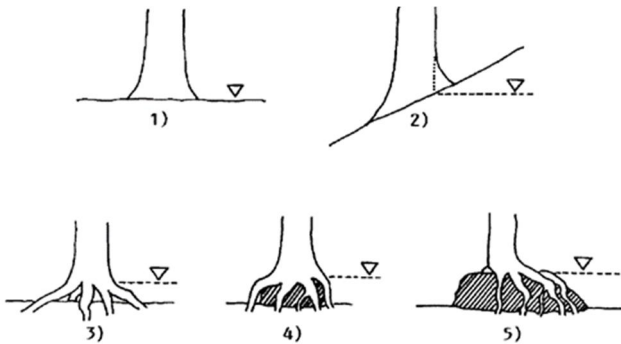
Puutunnusten symboleista

$d, d_{1.3}, DBH$	rungon rinnankorkeusläpimitta
d_x, d_6, d_{1h}	korkeuden x , 6 metrin, 10% läpimitta
d_k, d_{base}	läpimitta kannon korkeudelta
d_{cr}	latvuksen leveys
h, h_c	puun pituus, latvuksen alarajan korkeus
l_{crown}	latvuksen (elävän) pituus
$V, V_{sortiment}$	rungon tai rungonosan tilavuus
g	rungon poikkileikkausala 1.3 m kork.
i_x	puutunnuksen x kasvu (increment)
sp	puulaji
t	ikä
Runkolaji	
Puuluokka	
Harsuuntuneisuus	
Viat ja tuhot	Tapauskohmainen
Syntytapa	Luontainen, kylvö, istutus

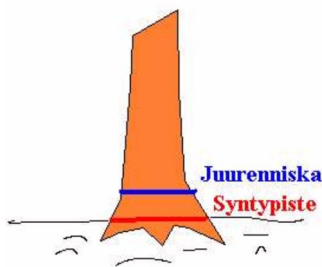
Syntypiste

Juuriston määrä ja biomassa arvioidaan malleilla, joissa niitä yleensä selittävät maanpäällisen rungon dimensioid. Juuriston biomassan mittaaminen on ymmärrettävästi erittäin vaikeaa. Runko alkaa **syntypisteestä**, jonka alapuolella on juuristo (tätä määritelmää pitää "soveltaa" kasvullisesti lisääntyneille puille) ja yläpuolella runko. Kaadetun ja paikalta pois viedyn puun jäljiltä metsään jäävä **kanto** käsittää siis "vaihtelevan mittaisen pätkän runkoa". Lisäksi metsään jää usein latvakappale, puhutaan latvahukkaosasta.

Syntypiste tarvitaan, jotta rungolta voidaan tehdä mittauksia yksikäsitteisessä ja yli ajan samana pysyvässä koordinaatistossa, jolla on origo. Tavallisin mittauskorkeus on "rinnan korkeus", jolla tarkoitetaan (yleisesti) 1.3 m korkeutta syntypisteestä, mikä pysyy samana puun kasvaessa toisin kuin esim. 20% suhteellinen korkeus tai juurenniska.



Kuva 116. Syntypisteen määrittäminen eri tilanteissa.



Kuva 117. "Puun origo" erilaisissa mittauksissa ja malleissa oli aiemmin "juurenniska", joka määrittyi korkeutena, josta puun saattoi pitkällä justeerilla katkaista, eli oli tapauskohtainen. Määritelmästä on luovuttu, mutta mm. 1950-luvulta peräisin olevat Nyyssösen relaskoopipitaulukot (muotokorkeusmallit) perustuvat juurenniskan käyttöön, ja puita tulisikin relaskoopilla tähdätä 10-20 cm rinnankorkeutta ylemmäs, mikäli aikoo relaskoopipitaulukosta määrittää puuston runkotilavuuden.

Pituus, latva, latvus, latvustunnukset

Rungon (puun) pituuden (h) määrittämiseksi "tarvitaan latva", joka sekään ei aina ole helppo määrittää, esimerkkinä laajalatuksiset lehtipuut. Vinon puun pituus ei ole latvan korkeus maasta, vaan syntypisteen ja latvan välinen etäisyys, mikä vaikeuttaa maastomittauksia, jotka yleensä perustuvat oletukseen puun pystysuoruudesta. **Latvan** voi ajatella olevan puun korkein piste, **latvus** taas on 3-ulotteinen volyymi, joka kätkee sisäänsä elävät (elävä latvus) ja kuolleet oksat. Latvukselle voidaan määrittää tunnuksia kuten **maksimileveys** (d_{cr_max}) tai **elävän latvuksen alarajan korkeus** (h_c). **Latvuksen projektiola** on myös yksi puutunnus, vaikka projektiola onkin usein "fraktaalinen", kun yksittäiset oksat ja latvusaukot haittaavat sen täsmällistä määrittämistä. Laserkeilauksella tai ilmakuvia yhteensovittamalla saadusta 3D pistepilvestä voidaan yrittää mitata latvuksen 3D muoto. Latvusta voidaan kuvailla subjektiivisesti arvioimalla sen **harsuuntumisaste**, ylimalkainen "**elinvoimaisuus**" tai latvusta kohdanneita "tuhoja" (hyönteiset, sienitaudit) – onhan latvuksen kunto oleellinen esim. harvennuksen yhteydessä, kun huonokuntoiset puut ovat usein niitä, jotka leimataan. Osa puutunnuksista on selkeästi määritettäviä ja suhde- tai luokka-asteikolla havaittavia, kun taas osa on subjektiivisesti havaittavia tunnuksia. Jälkimmäisiin kuuluvat harsuuntumisen ohella myös **latvuskerrosluokka** (päävalta-, lisävalta-, väli- ja aluspuu) ja **biologinen puuluokka** (latvuskerrosluokka + latvuksen lisämäärä).



Kuva 118. Samassa metsikössä männyn latvukset ovat yleensä selvästi lyhyempiä kuin metsäkuusten latvukset.

Rungon koko, muoto ja laatu ovat tärkeitä puun ominaisuuksia. Koko mitataan yleensä **tilavuutena** (v) paitsi milloin tarvitaan biomass- ja energialaskelmia, jolloin käytetään kuiva- tai tuoremassaa sekä niistä laskettua lämpöarvoa.

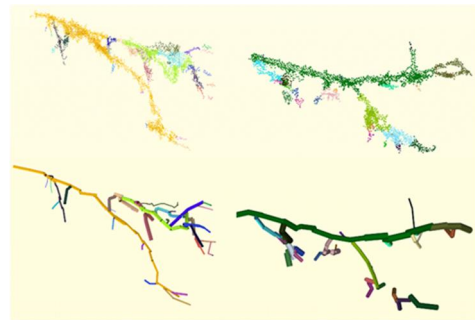
Puun arvonmääritys vaihtelee, mutta Suomessa on vallalla **puutavaralajimenetelmä**, jossa runko katkotaan jo metsässä eri puutavaralajien pölleiksi. Eri puutavaralajien kysyntä (ja hinnat) vaihtelee alueellisesti, ja rungon **kantoraha-arvoon** vaikuttavat lisäksi korjuuolosuhteet (korjuukustannukset). Rungon arvonmäärityksessä käytetäänkin yleensä keskiarvoisia kantoraha-arvoja eri puutavaralajeille. Saha-yrittäjät arvostaisivat oksattomia tasapaksuja ja suorita (ei kapenemista kohti latvaa) runkoja, joiden poikkileikkaus olisi suorakaiteen muotoinen. Tällaisesta puusta sahattu pölli ("palkki") olisi taas melko epäedullinen vaneriviiluja sorvattaessa. Hierresellun valmistaja arvostaisi puuta, jossa olisi vain pitkäkuituista pintapuuta, ja puunostajat eivät yleisesti arvosta tuotantolaitokselle kertyvää **kuorta**, jonka osuus rungon tilavuudesta pienenee iän mukana, ollen noin 10% vanhalla puulla.

Puiden **rungon muoto (runkomuoto)** muuttuu puun kasvaessa ja siihen vaikuttavat kasvuolosuhteet sekä puulaji. Huonolla kasvupaikalla valtapuutkin jäävät lyhyiksi pitkänkin ajan kuluessa. Harvassa kasvaneiden puiden rungot ovat tyvekkäitä, valtapuiden katveeseen jääneet puut ovat solakampia (**solakkuus**), eli niiden rungon paksuuden ja pituuden välinen suhde poikkeaa valtapuista. Taimen rungon tilavuuden voi arvioida karkeasti kartion kaavalla, kun kartion pohjan alaa vastaa rungon poikkileikkausala kannonkorkeudella. Isomman **puun rungon tilavuuden saa karkeasti arvioitua kaavalla** $v = 0.5 \times g_{1.3} \times h$. Kaavassa esiintyvät kolme tulotekijää: **muotoluku**, **poikkileikkausala rinnankorkeudella** ja pituus. Rungon tilavuus on siis noin 50% sellaisen sylinterin tilavuudesta, jonka poikkileikkausala (g) ($\pi/4 \times \text{läpimitta}^2$) ja pituus (h) ovat samat kuin puulla. "Nes-teeksi muutettu runko" siis täyttäisi tällaisesta sylinteristä puolet. Karkea arvio puiden **muotoluvusta** on siis 0.5. Pienillä puilla se on suurempi kuin 0.5 ja vanhoilla puilla alle 0.5. **Runko kapenee** ylöspäin mentäessä. Muutos on nopea heti tyvellä, kun "tyvipaksunnos muuttuu rungoksi", sen jälkeen kapeneminen on melko tasaista kohti latvaa.

Kun puu "katkaistaan nilkasta" (kaadetaan), voidaan tilavuus määrittää luotettavammin kuin pystypuusta. Hakkuukoneen kaatopään anturit lukevat kuorellisia läpimittoja esim. 30 cm välein, samalla kun kaatopää karsii rungon. Koneenkuljettaja saattaa myös merkitä korkeuksia rungolla: "tästä alkaa elävien oksien rungonosa", tai, "tähän korkeuteen on oksatonta tukkia". Hakkuukoneen tietokone käsittelee saamansa (korkeus & läpimitta 30 cm välein ja korkeuksia) -aineiston ja antaa ehdotuksensa katkonnasta. Pölliin tilavuudet saadaan esimerkiksi laskemalla yhteen 30 cm korkeat laskennalliset lieriöt, joista pölli muodostuu, ja joille läpimitat saatiin kaatopään mittauksista. Tulos on hyvin tarkka, vaikka metsänomistajat ja puunostajat ovatkin kiistelleet viime aikoina tyven tilavuuden laskennasta, koska kaatopää ei pysty siellä tarkkoihin mittauksiin. Nila-aikana kuori myös

irtoaa helposti ja metsänomistaja voi hävitä kantoraha-arvossa, kun läpimitat eivät olekaan kuoren päältä ja todelliset kuorelliset tilavuudet aliarvioituvat konemittauksessa. Hakkuukone mittaa paljon ja olettaa vähän. Poikkileikkauksen oletetaan olevan ympyrän muotoinen ja rungon läpimitat 30 cm havaintojen välissä saatetaan interpoloida eri menetelmin.

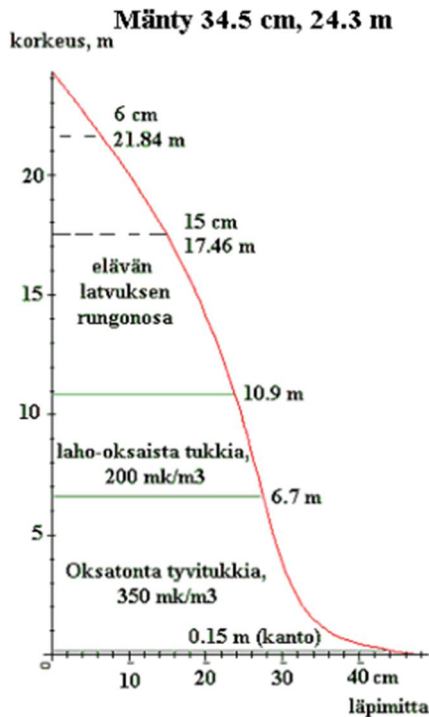
Pystypuun rungon ja rungonosien tilavuuksien määrittäminen ei voi käytännössä perustua esim. 3 dm välein mitattuihin rungon läpimittoihin, paitsi milloin käytössä on maastolaserkeilain tai droneen kiinnitetty laserkeilain, joka nousee rungon sivua ylös. Tällöinkin syntyvä kohinainen pisteilvi on luokitettava rungoksi ja siihen on sovittava geometrinen malli.



Kuva 119. Oksan mallinnus maastolaserpisteistä (Åkerblom, Raumanen & Kaasalainen. TUT Dept. Mathematics)

Pystypuun apteeraus, runkokäyrä

Pystypuun apteeraus ja tilavuuden mitta perustuu Suomessa pitkälti prof. Jouko **Laasasenahon polynomimuotoisiin runkokäyriin (ja tilavuusmalleihin)**, jotka laadittiin 1970-luvulla Valtakunnan Metsien Inventoinnin (VMI) yhteydessä mitatusta kaadettujen ja pystykoepuiden aineistosta. Tuohon aikaan ei ollut juurikaan hakkuukoneita käytössä, joten puut kaadettiin ja mitattiin maassa, tai, puuhun kii-vettiin. VMI tarjosi hyvän otantakehikon, sillä aineisto edustaisi puita tasaisesti eri osissa maata. Laasasenahon malli antaa puun rungon läpimitan (d_x) korkeudella x maasta, ja, malli on jatkuva ja integroitava, jolloin sillä voidaan laskea rungonosan tilavuus mille tahansa korkeusvälille $x = a...b$ pyörähdyskappaleen integraalina. Mallin käyttö kuitenkin edellyttää, että puulle tunnetaan pituus.

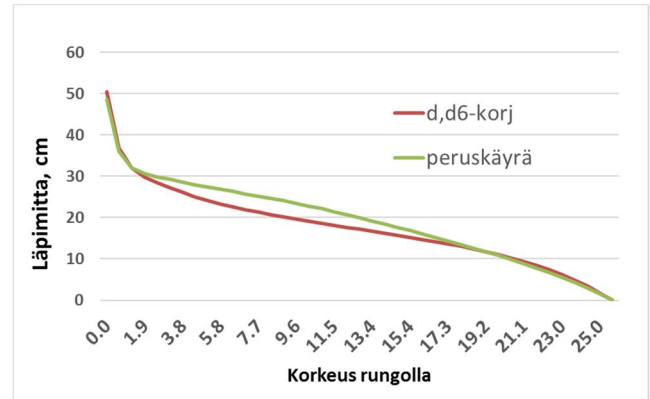


Kuva 120. Jos puusta tunnetaan laho(kuiva)-oksarajan korkeus, elävän latvuksen alarajan korkeus, puulaji, $d_{1.3}$ ja pituus (h), voidaan runkokäyrältä arvioida läpimitat kyseisillä korkeuksilla, sekä korkeudet, joissa läpimitta saavuttaa 15 cm (ostajan asettama tukin minimiläpimitta) ja 6 cm (kuitupölyn minimiläpimitta) sekä laskea tilavuudet eri rungonosille, joiden yksikköhinnat yleensä vaihtelevat.

Laasasenaho oivalsi, että **runkokäyrämalli kannattaa laatia suhteelliselle läpimitalle, suhteellisen korkeuden funktiona**. Y-muuttuja on läpimittasuhde ($dx/d0.8$) ja x-muuttuja suhteellinen korkeus rungolla. Mallien suhteellinen korkeus, jossa läpimittasuhde ($dx/d0.8$) = 1, on 20% korkeus, eli 4 m korkeus puulle, jonka pituus on 20 m. Polynomi on kahdeksan eri x:n potenssin summa kertoimineen. Potenssit noudattavat Fibonacci-sarjaa ja korkein potenssi on 34 (1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34). Latvassa suhteellinen korkeus $x = 0$, jotta läpimitta ja lpm-suhde siellä menisivät nollaan. Syntyisiteessä suhteellinen korkeus $x = 1$, ja rungon suhteellinen läpimitta on sama kuin kahdeksan kertoimen summa, koska luvun (x) 1 kaikki potenssit saavat arvon yksi.

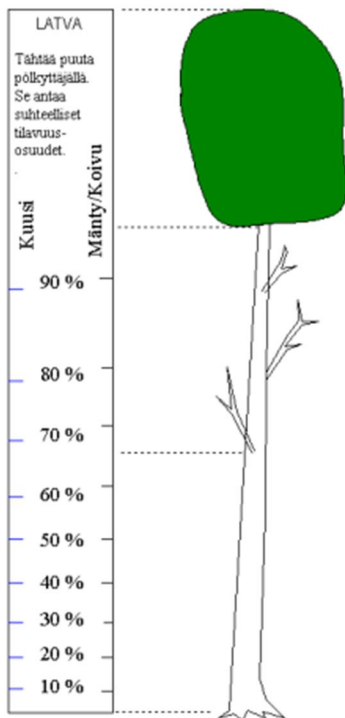
$$\frac{dx}{d.8} = b_1x^1 + b_2x^2 + b_3x^3 \dots + b_8x^{34}$$

Ensin Laasasenaho estimoi regressioanalyysillä keskimääräiset kertoimet $b_1, \dots, b_8$ (peruskäyrät) jokaiselle puulajille käyttäen tuhansia puita aineistona. Tämä malli antaa kullekin puulajille keskimääräisen suhteellisen runkomuodon riippumatta puun pituudesta tai läpimitasta. Sen jälkeen hän rakensi puulajikohtaiset korjausyhtälöt, joilla matala-asteisia peruskäyrien kertoimia b_1, b_2 ja b_3 muutetaan s.e. runkokäyrä kulkee tunnetun 1.3 m läpimitan kautta pituudelle h , tavalla, joka on regressio-estimoitu suuresta puuaineistosta. Toiset korjausyhtälöt estimoititiin tilanteeseen, jossa puusta tunnetaan $d_{1.3}$, d_6 ja h .



Kuva 121. Kuusen runkokäyrät, kun puun $d_{13} = 32$ cm, $d_6 = 23$ cm ja pituus 25.6 m. Yhtälöt korjaavat peruskäyrän kulkemaan annettujen pisteiden kautta.

HISTORIAA: Ennen koneellisen puunkorjuun yleistymistä puukaupat saattoivat monesti perustua **pystymittaukseen** (vaihtoehtona pinomitale ja yksittäisten tukkipölyjen mittaamiselle kuormauspaikalla). Leimikon puut siis mitattiin pystyyn ja tulokset muodostivat puukaupan kohteen ja hinnanmäärityksen. Tarkkuuden piti olla sovituisissa rajoissa, +/- 4%. Jotta puutavaralajien arviointi onnistuisi, **tarvittiin runkokäyrät**, joilla saattoi laskea (arvioida) kullekin puulle rungonosien (tukkien ja kuitupölyjen) tilavuudet. Pystymittaus toteutettiin niin, että kaikki leimikon puut luettiin (ja merkittiin värileimasimella), eli niistä arvioitiin puulaji, läpimitta rinnankorkeudelta ja runkolaji. Runkolaji oli joko normaali (tarkoitti sitä, että puun saattoi apteerata runkokäyrällä) tai poikkeava (puussa vikoja eikä siitä saa tukkeja, tai puussa oli leikko tai muu laatuviika tai -poikkeama). Leimikko jaettiin silmävaraisesti koepuualueisiin, joiden sisällä puusto oli samankaltaista s.e. puille saattoi ennustaa pituuden ja d_6 -läpimitan mittaamalla sen vain osasta puita, ja laatimalla mittauksista pituus- ja d_6 -mallit, joilla saatiin ennusteet pelkän rinnankorkeusläpimitan avulla niille lukuille, joista h ja d_6 tunnuksia ei mitattu. Poikkeaville puille käyttöosan jako puutavaralajeihin tehtiin "apteeraamalla puu pystyyn" Nisulan pölkyttäjällä (Kuva 122), joka on yksinkertainen viivottimen kaltainen mittalaite, jonka asteikko noudattaa keskimääräisen runkokäyrän (puun tilavuuden) integraalia tyveltä latvaan, eli kun pölkyttäjällä tähtäsi puuta, saattoi arvioida, mikä osuus tilavuudesta siirtyi esimerkiksi tukkipuusta leikoksi (hukkaa). Pystymittaryhmä saattoi olla 2- tai 3-henkinen, ja koska koepuiden valinta sekä pituuden ja d_6 -läpimitan mittaaminen veivät helposti muutaman minuutin per koepuu, olivat mittauskustannukset otaksuttavasti useita euroja per kuutiometri nykyrahassa mitattuna. Koneellistettu korjuu yleistyi 90-luvun alussa valtamenetelmäksi, ja pystymittaryhmät katosivat metsistä, mutta hyvät runkokäyrämallit jäivät elämään.



Kuva 122. Puun rungonosien tilavuuden arviointi Nisulan pölkyttäjällä. Viivainta pidetään kädessä pystyssä ja käsi ojennetaan suoraksi, jonka jälkeen haetaan etäisyys, jolla "viivain on puun mittainen". Asteikko kertoo tilavuuden kertymän syntypisteestä latvaan. Tässä esimerkissä kuolleiden oksien rungonosassa on 93-66% tilavuudesta eli 27%, kun taas elävän latvuksen sisällä olevassa rungonosassa on 7% tilavuudesta.

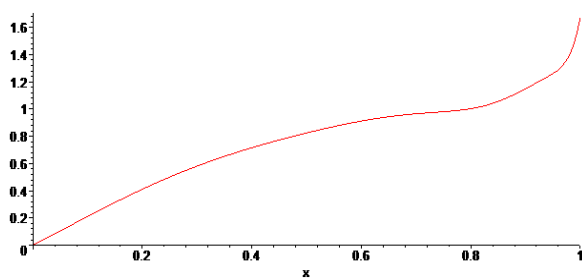
Runkokäyräesimerkki Maple ohjelmalla.

Syötetään ensin polynomi (rk), sitten annetaan kertoimille B1-B8 arvot ja piirretään suhteellisen läpimitan kuvaaja latvasta (x=0) tyvelle (x=1).

```
> rk:=B1*x+B2*x^2+B3*x^3+B4*x^5+B5*x^8+B6*x^13+B7*x^21+B8*x^34;
```

```
> B1:=2.0646;B2:=0.9644;B3:=-5.3643;B4:=8.4354;B5:=-11.1002;B6:=11.8042;B7:=-.8388;B8:=2.7065;
```

```
> plot(rk,x=0..1);
```



Syötetään puun tiedot: pituus ja läpimitta metreissä ja lasketaan 1.3 m vastaava suhteellinen korkeus:

```
> h:=20; d13:=.25; h13:=1-1.3/h;
      h := 20
      d13 := .25
      h13 := .9350000000
```

Puun läpimitta 20% suhteellisella korkeudella (d08; 20.4 cm) saadaan sijoittamalla funktioon rk x:n arvoksi 1.3 metrin suhteellinen korkeus (h13) ja kertomalla saatu suhdeluku rinnankorkeusläpimitalla.

```
> d08:=1/subs(x=h13,rk)*d13;
      .2042123574
```

Lasketaan seuraavaksi 4-metrinen tyvipöllin tilavuus. Pöllin alapää (kanto) on korkeudella 0.1 m ja yläpää 4.1 m syntypisteen yläpuolella. Integroimisrajat suhteellisinä korkeuksina:

```
> alaraja:= 1-0.1/h; ylaraja:=1-4.1/h;
      alaraja := .9950000000
      ylaraja := .7950000000
```

Runkokäyrän integraali, rk*d08 antaa läpimitan (d) kaikilla korkeuksilla. $\pi/4*d^2$ antaa poikkileikkausalan, pituus h skaalaa funktion:

```
vol:=h*Pi/4*int((rk*d08)^2,x=ylaraja..alaraja);
      vol := .05729171715 Pi
```

Jotta symbolinen vastaus muuttuisi reaalityyppiseksi, kutsutaan evalf() funktiota, ja pyydetään vastaus neljällä merkitsevällä luvulla:

```
> evalf(vol,4);
      .1800
```

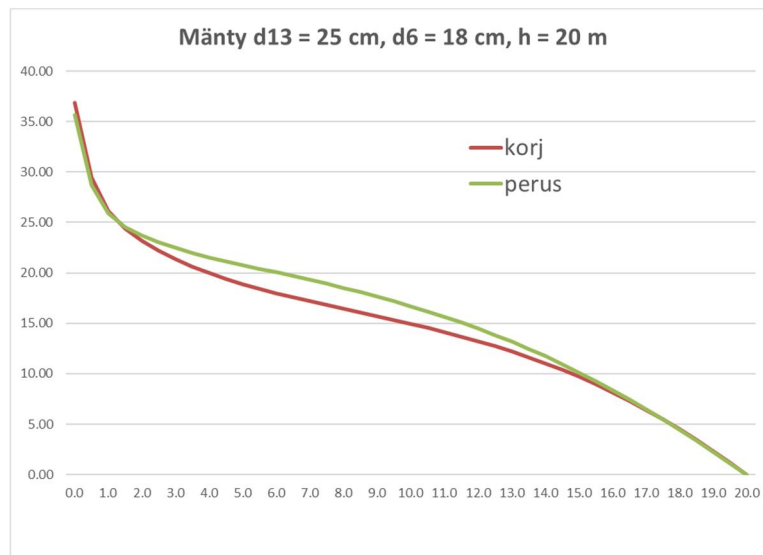
Tyvipöllin tilavuus oli siis 0.18 m³ eli 180 litraa. Koko rungon tilavuus lasketaan välillä 0...1:

```
> vol:=evalf(h*Pi/4*int((rk*d08)^2,x=0..1),4);
      .4474
```

Tilavuus on 447 litraa ja likimääräiskaavalla $v = 0.5 \times g_{1.3} \times h$ saadaan arvioksi 490 litraa. Likimääräiskaavan muotoilu 0.5 on siis yliarvio tässä tapauksessa.

```
> vol:=evalf(0.5*(Pi/4*d13^2)*h,4);
      vol := .4908
```

Runkokäyrien käyttö on suoraviivaista, jos käytetään vain peruskäyrää, kuten edellä olleessa esimerkissä, jossa ei laskettu tarkennuksia kertoimiin b1, b2 ja b3. Excel-työkirjassa Mannyn_apteeraus.xlsx ne on implementoitu:



Kuva 123. Peruskäyrän kulku puulle, jonka $d_{13} = 25$ cm ja pituus 20 m sekä korjattu runkokäyrä. Korjauksessa on hyödynnetty kaikkia kolmea mitattua muuttujaa d_{13} , d_6 ja h . Huomaa, että punainen käyrä asettuu arvoon $d_6 = 18$ cm, eli kulkee mitatun d_6 -havainnon kautta.

Puiden runkomuodosta on hyvä muistaa mm. että

- Puun alin 10% muodostaa 25% koko rungon tilavuudesta.
- Puoliväliin runkoa on kertynyt jo noin 80% tilavuudesta
- Latvaosassa tilavuus on pieni, reilusti alle 1% koko tilavuudesta sijaitsee ylimmässä 10% runkoa.

Lasketaan tilavuuden osuus (24.8%) alimmassa 10% osassa runkoa:

```
vtot:=(h*Pi/4*int((rk*d08)^2,x=1..0));
vtot := -.1423889894 Pi
```

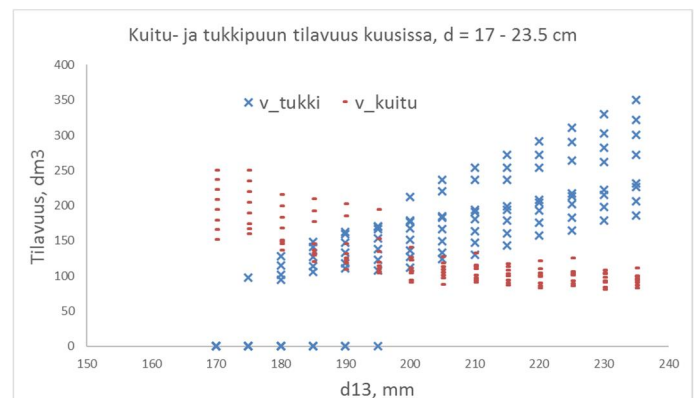
Alin 10% integrointiväli ($x = 1.0..0.9$)

```
vsuht:=evalf(h*Pi/4*int((rk*d08)^2,x=1.0..0.9)/
vtot*100,3);
vsuht := 24.8
```

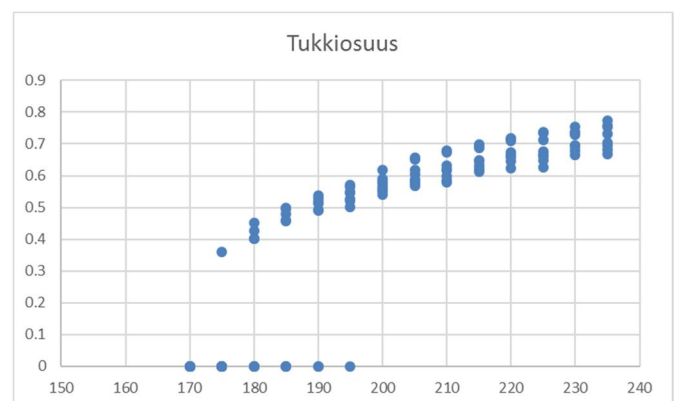
Runkokäyrän avulla voidaan laskea arvioita rungon arvolle, vaikka puutavaralajien mittavaatimukset muuttuisivatkin, käyttäen jotain **pölkkytysalgoritmia**, joka apteeraa matemaattisesti puun runkokäyrän avulla, eli hakee esim. sellaisen sallitun tukki- ja kuitupölkkykombinaation (rungon teoreettisen katkonnan), joka esim. maksimoi rungon arvon. Puutavaralajin mittavaatimukset voivat koskea niin pölkkyjen sallittuja pituuksia kuin läpimittoja. Runkokäyräpolynomilta saa suoraan läpimitan (y -muuttuja) jollekin korkeudelle (x), mutta käänteiseen suuntaan kulku vaatii iteratiivisen ratkaisun, siis kun tarvitsee tietää, millä korkeudella (x) vallitsee tietty läpimitta (y). Jotta tämä taas onnistuu yksikäsitteisesti, on huolehdittava, että käyrä laskee monotonisesti, eikä sama läpimitta voi esiintyä usealla korkeudella.

Kuva 124 näyttää, kuinka runkolaji muuttuu laskennallisesti runkokäyrää ja pölkkytysalgoritmia käyttäen. Puut, joiden läpimitta oli 17 cm ja pituus vaihteli välillä 14–21 m eivät tuottaneet yhtään tukkipölkkyä. Kun d_{13} oli 17.5 cm ja puu oli 21 m pitkä, sai siitä tukin, Kahden tukin runkoja ilmaantuu kun d_{13} on 20 cm ja puu on 21 m pitkä. Läpimitan kasvaessa

tukkiosuus nousee pykälittäin, kun rungosta saa ensin yhden, sitten kaksi jne. tukkipölkkyä. Kuidun osuus laskee nopeasti alle 20% kokonaistilavuudesta suurilla kahden tai useamman tukin puilla.



Kuva 124. Pölkkytysalgoritmitille annettiin d_{13} ja h arvoja, s.e. d_{13} vaihteli 5 mm välein 17 ja 23.5 cm välillä ja pituus sain arvoja 14...21 m. Laskenta tehtiin kuusen runkokäyrillä. Sallittuja tukin pituuksia olivat 37–61 dm, 3 dm välein, ja minimiläpimitta tukille 15 cm ja kuitupölkkyille 7 cm



Kuva 125. Yllä olevan kuvan puiden tukki-osuus d_{13} :n eli rinnankorkeusläpimitan funktiona.

Pystyvuun runkotilavuuden ennustamiseksi on olemassa myös **tilavuussyhtälöitä**. Alla männyn, kuusen ja koivun tilavuussyhtälöt Maple-formaatissa, **kun tunnetaan d13, (d13, h) tai (d13, d6 ja h)**. Läpimitat syötetään sentteissä, pituus metreissä ja tilavuus saadaan litroina. Mitä enemmän käytössä on selittäjiä, sitä tarkempia saadut estimaatit ovat. Suhteelliset RMSE-tarkkuudet ovat noin 17%, 9% ja 4%, kun selittäjät ovat edellä mainitut kolme ryhmää.

Suhteellinen RMSE on mallin "tuoteseloste". Jos yhden selittäjän mallilla saa puun tilavuudeksi 1000 litraa eli 1 m³, on estimaatin 67%:n luottamusväli 830...1170 litraa eli 1000 litraa ± 170 litraa. Jos taas on käyttänyt kahta selittäjää, eli d13 ja h on mitattu tarkasti, on luottamusväli 910...1090 litraa. Edelleen, jos vielä d6 on mitattu, ja malli antaa tulokseksi 1000 litraa, on kyseisen estimaatin luottamusväli 960...1040 litraa.

Restart; d:=20; d6:=16; h=18;

```
v:=exp(-5.22553+ 3.434904*ln(2+1.25*d)-0.03526*d);
v:=exp(-5.39934 + 3.464680*ln(2+1.25*d)-0.0273199*d);
v:=exp(-5.41948 + 3.5763*ln(2+1.25*d)-0.03955855*d);
```

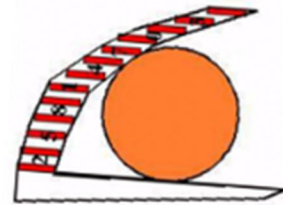
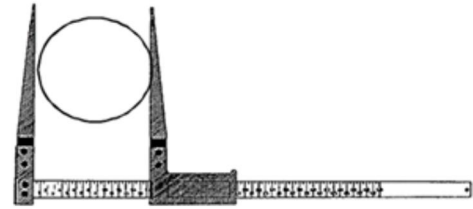
```
v:=.036089*(d^2.01395)*(0.99676^d)*(h^2.07025)*((h-1.3)^(-1.07209));
v:= 0.022927*(d^1.91505)*(0.99146^d)*(h^2.82541)*((h-1.3)^(-1.53547));
v:= 0.011197*(d^2.10253)*(0.986^d)*(h^3.98519)*((h-1.3)^(-2.659));
```

```
v:= 0.268621*d^2 - 0.0145543* d^2*h - 0.0000478628* d^3*h + 0.000334101* d^2 *h^2 + 0.0973148*
(d^2 + d* d6 + d6^2) + 0.0440716* d6^2 *(h-6) ;
v:= 0.208043*d^2-0.000114406*d^3*h +0.000436781*d^2*h^2+ 0.133947*(d^2+d*d6+d6^2)-
0.0149567*d^2*h+0.0374599*d6^2*(h-6);
v:= 0.226547*d^2 - 0.000122258*d^3*h + 0.000438033*d^2*h^2 + 0.099162*(d^2+d*d6+d6^2)-
0.0104691*d^2*h+0.0334836*d6^2*(h-6);
```


Puutunnusten mittaaminen

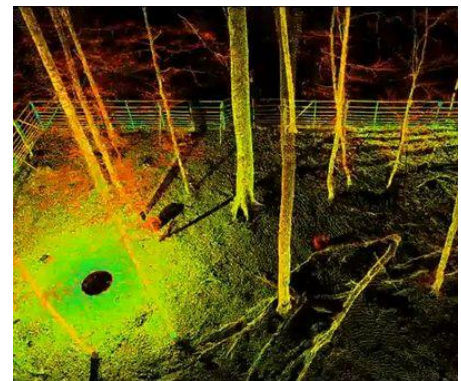
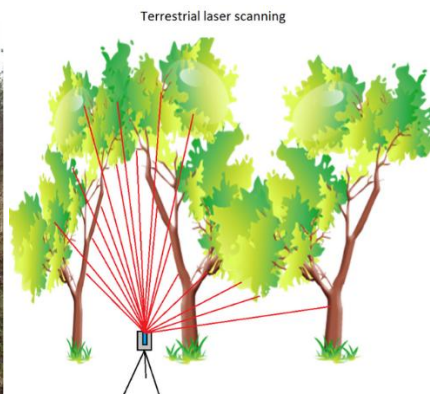
Rungon läpimitta tai ympärysmitta

Rungon läpimitta tai ympärysmitta mitataan aina joltain korkeudelta syntypisteestä katsottuna. **Mittasakset** ovat yksinkertainen mittaväline (Kuva 126). Mitatessa huolehditaan, että ne ovat oikealla korkeudella, kohtisuorassa runkoon nähden, ja oikeassa ilmansuunnassa, mikäli mittaussuunnalla on merkitystä - esim. puu tullaan mittaamaan joskus uudelleen. Mittasaksia on analogisia, ja niissä lukema luetaan mitta-asteikolta sekä digitaalisia, joissa lukema saadaan joko näytölle ja/tai suoraan tiedonkeruulaitteeseen. Lukematakkuus on yleensä millimetri. **Kaulain** (Kuva 126) on nopea mittaväline, kun tyydytään cm-luokan tarkkuuteen, mikä on aivan riittävä, ellei kyseessä ole pysyvä mittapaikka, jossa puiden runkojen kehitystä on tarkoitus seurata pidempään tai muuten ei tarvita mm-tarkkuutta. Kuuden metrin läpimitta (**d6**) mitataan joko tikkaiden avulla tai kiinnittämällä kaulain 5 metrin pituiseen (alumiini)varteeseen (*yläkaulain*). Läpimittaeroa 1.3 m ja 6 m välillä kutsutaan **kapenemiseksi**. **Tallmeter** on mittanauha, jonka cm-asteikkoa on "venytetty piillä kertoen", jolloin mittanauhasta ympärysmitta muuttuu suoraan läpimitaksi senttimetreinä. Läpimitta voidaan tarkkuutta vaativissa töissä mitata useammasta suunnasta, esim. ristiin (ristimitä), kiertäen puuta 90 astetta mittausten välillä. Uudet mittavälineet [kuten käsiskannerit](#) voivat tulla kyseeseen aivan lähitulevaisuudessa.



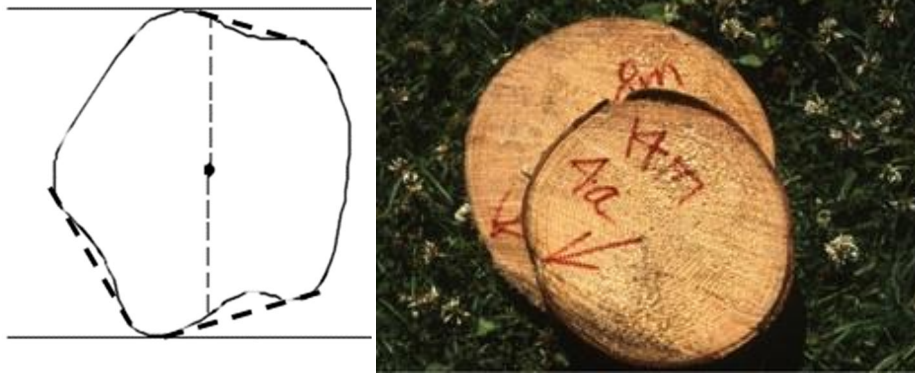
Kuva 126. Mittasakset, kaulain ja läpimitan mittaussaksilla.

Maastolaserkeilaimella voidaan olosuhteisen salliessa (näkyvyys, tyyni sää) tuottaa rungoista pistepilviä ja saada tarkka käsitys rungon muodosta tutkimustarkoituksiin⁶. Tulevaisuudessa voi esim. olla mahdollista, että 1.3 m korkeudella metsässä eteneviin lennokkeihin asennetut laserkeilaimet tuottavat puukartan ja puiden puolaji- ja läpimittatiedot. Nyt jo tehdään kokeiluja mönkijöihin ja reppuihin asennetuilla keilaimilla (Kuva 127).



Kuva 127. Reppulaserkeilain. GNSS-vastaanotin ja inertiaalisensorit huolehtivat karkeasta paikannuksesta, joka jälkilaskennassa tarkentuu, kun reitin eri paikoista näkyneet samat kohteet sovitetaan yhteen korjaamalla reittiä. [Laserscanning.fi](http://wiki.awf.forst.uni-goettingen.de) (CoE in laser scanning reserach, <http://wiki.awf.forst.uni-goettingen.de>)

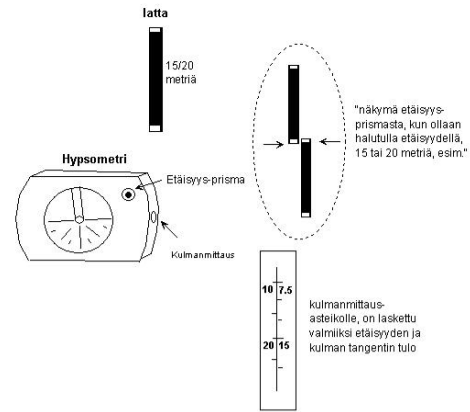
⁶ http://128.197.168.195/wp-content/uploads/2016/07/liang_2011.pdf



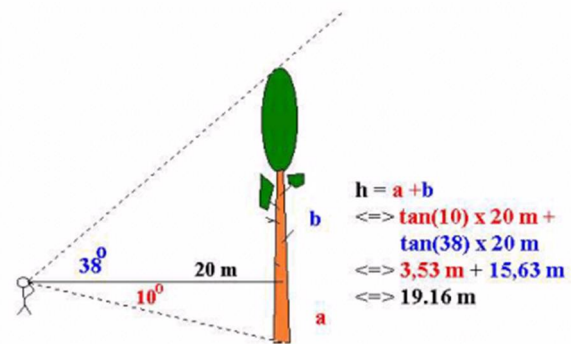
Kuva 128. Vasen: Lämpömittausta kahden samansuuntaisen janan etäisyytenä (mittasakset ja kaulain). Epäpyöreys vaikuttaa tuloksiin, kun mittausasuunta vaihtuu. Ympärysmitta (Tallmeter) mittaa konveksin (kuperan) piirin. Oikea: runkoanalyysiekkoja, jotka on sahattu 8 ja 14 m korkeudelta runkoa (syntypisteestä lähtien).

Puun pituus mitataan (pystyyn) yleensä kulmahavaintojen avulla olettaen, että puu kasvaa pystysuorassa (Kuva 130). Puusta hakeudutaan tarpeeksi kauas paikkaan, josta sekä latva että tyvi näkyvät. Silmä muodostaa kahden suorakulmaisen kolmion yhteisen kulman. Vaakaetäisyys silmästä puun runkoon pitää tuntea, joten se mitataan esim. mittanauhalla tai laseretäisyysmittarilla. Pystykulma-asteikolla tähdätään sekä latvaan että tyveen (syntypisteeseen). Kertomalla etäisyys kulman tangentilla, saadaan vastaisen kateetin pituus. Saadut korkeuslukemat summataan tai vähennetään toisistaan sen mukaan, oliko silmä syntypisteen ylä- vai alapuolella. **Hypsometri** on kulmamittari, jonka asteikolle on laskettu **korkeusero** = $\tan(\text{kulma}) \times \text{vaakaetäisyys}$ -lukuja, yleensä kaksi rinnakkain, toinen 15 m ja toinen 20 m etäisyydelle. Hypsometriin kuuluu ns. **latta**, joka on musta kappale, jonka päissä on valkoiset mittamerkit. Se kiinnitetään runkoon ajatellulle silmäkorkeudelle s.e. se näkyy mittauspisteestä. Hypsometrissä on prisma, josta latvaa tähdätään, ja prisma taivuttaa kuvan latasta erityisellä tavalla, kun etäisyys 15 tai 20 m toteutuu. Toinen vaihtoehto on käyttää esim. 20 metrin metsurinmittaa. Tällöin mittausetäisyyden voi valita vapaammin. Esim. jos jää 10 m etäisyydelle mittaamaan ja käyttää 20 m asteikkoa hypsometrissä, voi saadun pituuden jakaa kahdella. 7.5 m etäisyys 15 m asteikolla tuottaa saman relaation. Jos pituuden laskee vasta "toimistolla", tarvitsee kirjata sekä vapaa mittausetäisyys että saadut lukemat (kulmat) 15 tai 20 m asteikolla. Hypsometrillä on mahdollisuus päästä 0.3-0.7 m RMSE tarkkuuteen isoilla puilla.

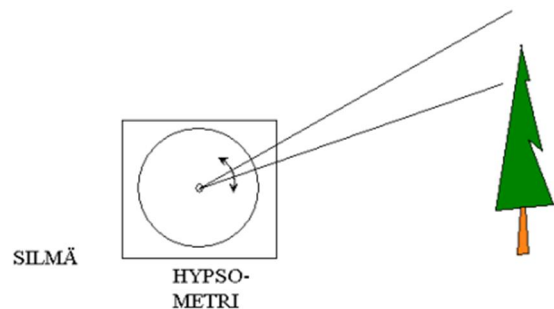
Elektronisissa pituusmittareissa laite mittaa kulman, kun käyttäjä "painaa liipaisinta" latvaa tähdätessään. Etäisyys saadaan joko laserilla tai "ultraäänitutkalla", jossa tapauksessa puuhun kiinnitetään ensin transponderi. Lasermittauksen ongelma on maaston peitteisyys. Lasersäde antaa helposti kaiun oksasta ennen runkoa, jolloin pituuden aliarvioituvat helposti etäisyyden tultua aliarvioituksi. Laserin valaisema piste on myös vaikea havaita kirkkaalla säällä ilman erikoislaseja. Pituus voidaan mitata myös vertailutangolla tai teleskooppisella varrella, jonka sisällä kulkee mittanauha, jonka lukeman mittaaja näkee. Varren pituus voi olla jopa 10 m ja ne ovat erityistä huolellisuutta vaativia voimalinjojen muodostaman vaaran takia. Pituus voi olla vaikea tunnus mitattavaksi, kun latvusto on sulkeutunutta. Puiden ja puuston pituuden mittaaminen on helpottunut ilmalaserkeilauksen myötä, sillä laite antaa pisteitä niin latvustosta kuin maan pinnalta.



Kuva 129. Hypsometrin osat ja toimintaperiaate.



Kuva 130. Pituus saadaan kahdesta kulma- ja yhdestä vaakaetäisyys-havainnosta, kun puu seisoo pystysuorassa. Tässä silmäntaso on tyven yläpuolella.



Kuva 131. Tähdättäessä latvaan ja tyvelle havaitaan pystykulmia, ja koska laite heiluu kädessä syntyy niihin pieniä havaintovirheitä, joiden vaikutus pituusarvioon ei ole symmetrinen.



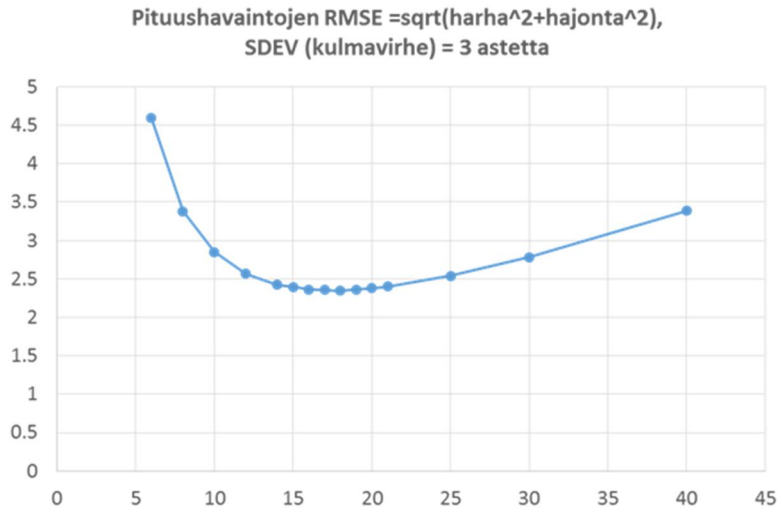
Kuva 132. Pituusmittaus hypsometrillä. Vasen: etäisyys puuhun mitattu metsurinmitalla, tähtäys latvaan käynnissä. Oikea: Etäisyyden mittaus latan avulla, jota tarkastellaan hypsometrin prisman läpi.

Oikea mittausetäisyys hypsometrillä? Hypsometriä käytettäessä hakeudutaan tarvittavalle etäisyydelle, josta sekä latva (tai oksaraja tmv. haluttu korkeus) että tyvi näkyvät. Jos etäisyys mitataan väärin, esim. arvoon 20 m, kun se todellisuudessa latvaan tähdättäessä olisi 19 m, on saatu tulos pituudelle yliarvio. Kulmanmittauksessa tulee aina pieniä virheitä, koska kulma-asteikko heilun käden tärinän mukana, ja tuulikin saattaa heiluttaa latvaa. Pituus saadaan kaavalla h

$= \text{etäisyys} \times \tan(a)$, missä a on hypsometrillä (mittalaitteella) havaittu kulma. Jos kyseessä on 20 m pitkä puu, ja siitä hakeudutaan 20 m etäisyydelle, näkyy latva 45 asteen kulmassa, jos silmä on tyven korkeudella. Pituus kannattaa mitata tarpeeksi kaukaa, muttei kuitenkaan liian kaukaa, koska kulmahavaintojen virheiden vaikutus alkaa jälleen kasvaa tietyn etäisyyden jälkeen, samalla kun mittaamiseen alkaa kulua lisää aikaa (Kuva 133).

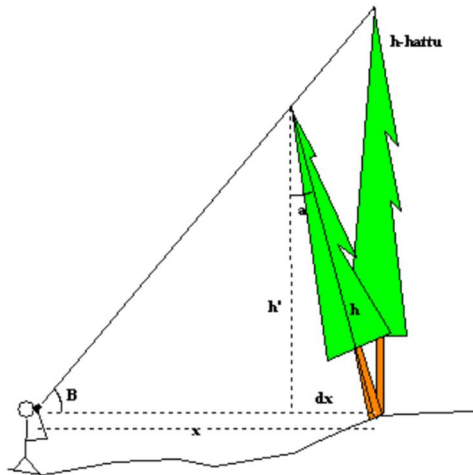


Kuva 133. Tapaus, jossa 20 metristä puuta mitataan hypsometrillä 20 m etäisyydeltä. Jos hypsometri tärisee kädessä s.e. saadut kulmalukemat vaihtelevat oikean arvon, tässä 45 astetta, molemmin puolin tasaisesti (normaalijakauma, 3 asteen keskihajonta), jää tuloksiin aina harhaa (systemaattista virhettä), koska itseisarvoltaan saman suuruisilla negatiivisilla ja positiivisilla kulmavirheillä on erilainen vaikutus $\tan(a)$ arvoon. Harha kasvaa suureksi, jos puuta mitataan kovin läheltä. Kokeile itse, laske $\tan(47^\circ)$ ja $\tan(43^\circ)$ arvot kun $\tan(45^\circ)=1$.



Kuva 134. Tapaus, jossa 20 metristä puuta mitataan hypsometrillä 20 m etäisyydeltä. Harhaa ja hajontaa mittaava RMSE minimoituu, kun 20-metristä puuta tarkastellaan 16-18 m etäisyydeltä. Hyvä peukalosääntö on mitata puu 75-90% etäisyydeltä otaksutusta pituudesta.

Hypsometrillä voi mitata mitä tahansa **korkeuksia rungolta**. Näitä voivat olla esim. **elävän latvuksen alarajan korkeus, kuivaoksaraja, rungon haarautumiskorkeus, linnunpesän korkeus maasta** jne. Hypsometrillä voi tehdä pieniä ja isoja, satunnaisia ja systemaattisia **virheitä**, jotka johtuvat: käden tärinästä, väärin luetusta lukemasta (väärä asteikko 15/20 m hypsometrissa), laskuvirheestä (tyvi- ja latvalukeman yhteenlasku hypsometria käytettäessä), etäisyyden mittausvirheestä, väärän puun latvan havaitsemisesta tai puun vinoudesta (puun korkeus vs. puun pituus). Taustalla oleva kaava **silmän korkeusero = $\tan(\text{kulma}) \times \text{vaaka-etäisyys}$** on syytä muistaa virheiden vaikutuksen ymmärtämiseksi.



pidettäessä putki asettuu aina pystysuoraan. Putken alapäässä on katselauukko, josta näkyy 90 astetta taittavan peilin kautta "maisema putken läpi, suoraan ylös". Putken yläpään lasissa on risti tähtäystä varten. Putkeen voi kiinnittää luotilangan, jolloin putken (ylhäällä olevan kohteen) sijainti maanpinnalla määräytyy paremmin. Putkella voi tarkastella latvuksen ääri viivoja ja hahmotella ja merkitä projektion maanpinnalle mittauksia varten.



Kuva 135. Pihlakuusia, lehtikuusi ja metsäkuusi.

Latvuksen leveys

Latvuksen leveyden voi arvioida Kajanuksen putkella, joka on eräänlainen periskooppi, n. 30 cm pitkä putki, jonka yläpäässä on akseloidut kahvat, jotka ovat kiinni kehässä, joka on akseloitu (kohtisuorassa suunnassa) sisempään kehään, johon itse putki on kiinnitetty. Rakenteen ansiosta, kahvoista

Puun pituuskasvu

Pituuskasvun kertamittaaminen on mahdollista havupuil- la, jos oksakiehkurat ovat selkeitä. Niitä katsellaan kiikareilla (paitsi taimia), joissa on kiinteä avautumiskulma (suurennus- suhde). Mittausperiaate on käytännössä sama kuin hypso- metrillä, mutta kiikareilla havaintaan kulmaeroa nykyisen latvan ja esim. 5 vuotta sitten olleen latvan välillä (viides kie- kura alaspäin). Kiikarista näkyy asteikko, josta kulmaero lue- taan. Kasvukiikareita käytettäessä tarvitaan siksi myös hyp- sometri (kiikareiden korkeusasema tyveen nähden) ja etäi- syysmittaus (kuinka kaukaa puuta katsellaan). **Pituuskasvu** voidaan mitata myös **toistamalla** pituusmittaukset kahtena ajankohtana. Jos puu on kasvanut esim. viidessä vuodessa



Kuva 136. Havupuiden pituuskasvun voi auttavasti pystyä määrittämään kiikareilla, jolloin latvasta hahmotetaan kasvujakson vuosikasvaimet.

Rungon paksuus- ja pohjapinta-alan kasvu

Rungon paksuuskasvu (sädekasvu, läpimitan kasvu, poh- japinta-alan kasvu) voidaan sekin joko kerta- tai toistomita- ta. Puu jättää vuotuisen jäljet vuosilustoihin, joissa erottuvat kevät- ja kesäpuu. Lehtipuilla ne eivät erotu selvästi, ja niitä mitattaessa joudutaan joko käyttämään näkyvöitäviä kemi- kaaleja tai viemään näyte mikroskoipoitavaksi. Puusta voi- daan ottaa vuosilustonäyte erityisellä **kairalla**, joka on ontto putki, jonka kärki on teroitettu (kuten taltassa) ja kärjen ulko- pinnassa on lyhyet kierteet. Kaira painetaan kuoren läpi s.e. kärki ottaa kiinni puuainekseen, jonka jälkeen se kierretään puuhun. Alussa tulee olla huolellinen, jotta putkeen leikkau- tuva pyöreä lastu (vrt. taltta) ei katkea. Kairalla tähdätään kohti rungon poikkileikkauksen keskipistettä (rungon kes- kelle), jotta siitä voi mitata rungon poikkileikkauksen säteen kasvun kairaus suunnassa. Kasvukausi alkaa noin toukokuus- sa ja päättyy elokuussa (vaihtelee puulajeittain, maantieteel- lisesti, sääolojen mukaan), jona aikana viimeisen vuosiluston kehitys on kesken. Kairauksia voi tehdä useammasta suun- nasta tulosten tarkentamiseksi, mutta kairaus lisää riskiä sie- ni-infektioille. On tärkeä huomata, että **kairaamalla** saadaan **kuolettoman läpimitan** puolikkaan (huom. sädekasvu, läpi- mitta on $2 \times$ säde, kun puun poikkileikkaus oletetaan ympyrän muotoiseksi) kasvun. Puun kuoren paksuus lisääntyy yleensä

metrin pituutta (20 m ... 21 m), voivat saadut arviot pituus- kasvusta vaihdella melko paljon, sillä pituusmittausten vir- heiden keskihajonta on yleensä vähintään 0.3 m. Eli todelliset pituudet 20 m ja 21 m saadaan 68% tapauksissa ± 0.3 m oikeasta tuloksesta eri ajankohtina. Pituushavaintojen ero- tuksena saatu kasvulukeman hajonta lasketaan esim. kahden riippumattoman satunnaisluvun summan (tai erotuksen) keskihajonnan kaavalla neliöjuuri $(0.3^2 + 0.3^2) = 0.42$ m. Täl- löin tulokset pituuskasvulle vaihtelevat käytännössä vaihte- levat välillä 0–2 m, ja 68% estimaateista mahtuu välille 0.58–1.42 m ja 95% välille 0.1–1.84 m (95% luottamusväli on noin kaksi keskihajontaa). Pituuskasvun johtaminen pituus- mittausten erotuksena ei siis ole kovin tarkkaa lyhyelle kasvujaksolle.

puun vanhetessa, joten todellinen **kuoren päällinen lpm- kasvu** voidaan mitata vain **toistomittamalla** puu eli mita- taan puu kerran ja palataan mittaamaan se uudelleen. Ongel- maksi muodostu tällöin mittaussuunnan ja mittauskorkeu- den vakioiminen eri ajankohtien välillä. Sama puukin pitäisi vielä löytää, kun paikalle palataan uudelleen. Rungot voivat joskus olla varsin epäpyöreitä, jolloin pienikin poikkeama mittaussuunnassa voi pilata lyhyen ajanjakson millimetrita- son lpm-kasvun mittausten. Tutkimusmetsissä maalataankin tästä syystä runkoihin pienet merkit (jos mahdollista, ei silloin, kun kyseessä on seurantakoeala, joka halutaan pitää omistajalta salassa, esim. Valtakunnan metsien inventoinnis- sa), jotka kertovat 1.3 m korkeuden ja mittaussuunnan. Jos- kus puihin maalataan myös numerot, ellei puun löytyminen uudelleen perustu puukarttaan. Jos aikaa on kulunut 5 vuotta ja todellinen läpimita on kasvanut 1 cm arvosta 20 cm ar- voon 21 cm, on vuotuinen sädekasvu (i_r) = 1 mm/a ja vuotui- nen läpimitan kasvu (i_d) = 2 mm/a. Pohjapinta-alan kasvu (i_g) viidelle vuodelle lasketaan kaavalla

$$i_g = \frac{\pi}{4} (21^2 - 20^2) = 32 \text{ cm}^2$$

Samoin kuin pituuskasvun toistomittauksissa huomattiin, voi toistomittausten tuloksen erotuksena saatu lpm-kasvu ”peit- tyä” eri ajankohtien lpm-havaintojen mittausrvirheisiin.

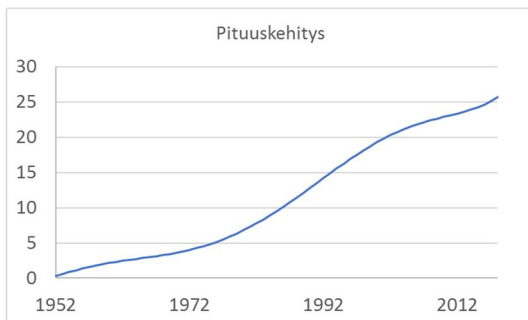
Runkoanalyysi

Jos **rungon kehitys** halutaan selvittää mahdollisimman tarkasti, ja puun kaataminen on mahdollista (destruktiivinen näytteenotto), voidaan vuosilustonäytteet ottaa täydellisinä, "tallennettuina" kiekkoihin, joita sahataan puusta halutuilta korkeuksilta. Jos kiekkoja sahataan paljon, pystytään puun historiallinen kehitys rekonstruoimaan tarkasti, joskin jälleen vain "kuorettoman rungon" osalta. Kyseessä on tällöin

runkoanalyysi. Jokaisesta kiekosta voidaan laskea vuosilustot ajassa taaksepäin, ja sisimmäinen lusto kertoo vuoden, jolloin puun latvakasvain oli tällä korkeudella (joku sen osa, oletus = kasvaimen keskikohta). Metriä ylempää sahattu kiekko antaa ajankohdan (kasvukauden, vuoden), jossa "latvakasvain huiteli", kun ollaan metriä korkeammalla. Näin voidaan rekonstruoida (interpoloida) puun pituuskehitys noin puolet vuotuisesta pituuskasvusta - tarkkuudella.

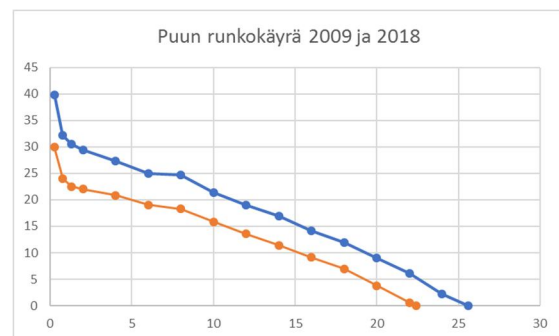


Kuva 137. Runkoanalyysiekkoja. Kuusen kiekosta erottuu sydän- ja mantopuun raja selvänä.



Kuva 138. Erään v. 2018 kaadettaessa 67-vuotiaan metsäkuusen pituuskasvukehitys ratkaistuna vuosilustojen lukumäärästä eri korkeuksilta otetusta puukiekoista.

Rungon kuorettomat läpimitat tiettyssä mittaussuunnassa (kiekkoihin merkitään suunta, kun se katkaistaan rungosta, epäpyöreiden aiheuttaminen erojen eliminoimiseksi) voidaan määrittää mittaamalla lustoista puun vuotuinen (tai 5 vuoden välein) läpimitta esim. elektronisella työntömitalla tai mikroskoopilla. Samalla voidaan määrittää sydänpuun läpimitat mittaushetkellä. Näin saadaan havaintoja puun (kuoreton, kuoren alla) runkokäyrästä eri ajankohtille ja voidaan laskea runkoa koskevia tunnuksia eri ajankohtiin kuten läpimitan ja pohjapinta-alan kasvu, tilavuus ja muotoluku (Kuva 139). Nykyhetkelle voidaan laskea sydänpuun tilavuus (runkokäyrä) sekä kuorellisen puun tunnuksien ja runkokäyrä, onhan kuori mukana sahatuissa kiekkoissa.



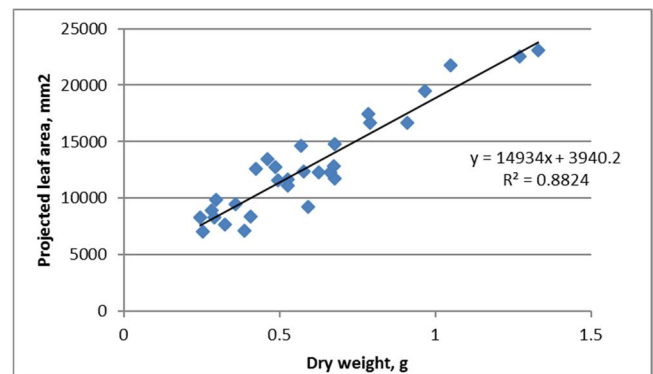
Kuva 139. Erään mittaushetkellä 67-vuotiaan kuusen kuorettomat runkokäyrät mittaushetkellä ja 9 kasvukautta aiemmin. Kiekkoja on sahattu 0,22, 0,75, 1,3, 2, 4,6, 9,..., 22 ja 24 metrin korkeudelta. Vuoden 2009 lustoa ei enää näkynyt 24 metrin kiekossa.

Kuori

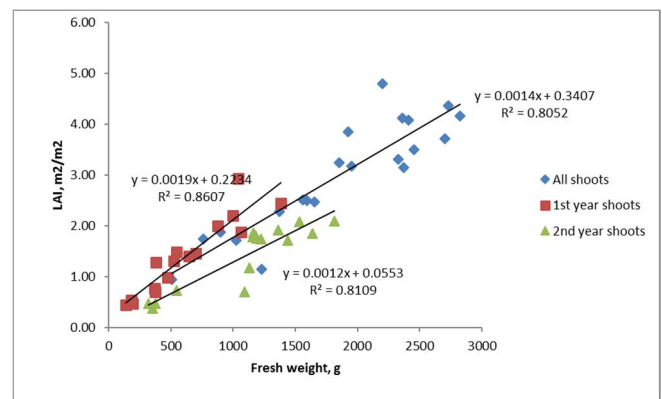
Kuoren paksuuden mittausta pystyvuusta perustuu siihen, että kuori ja nila ovat puuainetta pehmeämpi, jolloin puuhun voi iskeä erityisen ”taltan”, joka pysähtyy tälle rajalle, ja työnymästä voi arvioida kuoren paksuuden, joka vaihtelee muutamista millimetreistä useisiin senttimetreihin (vanhat männyt, lehtikuuset). Kuori ei yleensä jää ehjäksi kairatessa, joten kairanlastusta sitä ei varmuudella pysty mittaamaan. Kuoren paksuus (B), on tarpeen, kun määritetään puun pohjapinta-alan ja tilavuuden kasvua kairaamalla saadusta kuorettoman läpimitan kasvusta. Tällöin saatetaan otaksua, että kuoren paksuus aiempaan ajankohtana oli sama kuin mittaushetkellä tai, että kuorettoman ja kuorellisen läpimitan suhde pysyi vakiona. Kuoren osuus puun runkotilavuudesta voi olla merkittävä. Yksinkertaistaen: jos mänty on läpimitaltaan 30 cm ja pituus on 25 m, voidaan karkeasti ajatella, että kuoreton runko on läpimitaltaan 28 cm paksu, sillä männyn kuoren paksuus on usein 10 mm tai enemmän tämän kokoisilla puilla. Tutulla kaavalla $v = fgh$ saadaan tilavuudeksi 883 ja 769 litraa ja kuoren osuudeksi 13% kuorellisesta tilavuudesta. Pienillä puilla suhde voi olla jopa 30%. Näitä osuuksia on mallinnettu ja on olemassa taulukoita, joilta arvon voi määrittää eri kokoisille eri puulajin puille. Aivan kuten sädekasvumittauksissa, tulee kuoren paksuutta mitattaessa huomioida, että saatu arvo tulee laskea kaksinkertaisena, kun lasketaan kuorettoman puun läpimittaa.

Lehtimassa ja -ala

Neulasmassa tai neulas/lehtiala on työläs mitata, mutta apuna voi käyttää otantaa. Puusta valitaan systemaattisesti koeoksia, joiden neulaset nypitään, tai annetaan kuivua ja ravistellaan. Tuore- ja kuivamassan suhde pitää kuitenkin selvittää samoin kuin neulasalan ja massan välinen suhde. Esimeräissä tutkimuksessa haluttiin selvittää vadelmakasvuston lehtialan vaikutusta laserkeilaimen mittaamaan valon takaisinsirontaan. Ensimmäin selvitetään lehtien tuoremassan ja lehti-alan välinen suhde (m^2/kg) näytteestä lehtiä, jotka skannattiin ja pinta-alat mitattiin saaduista kuvista. Sama lehtierä oli punnittu hyvin tarkasti. Sen jälkeen maastossa mitattiin 1 m^2 näytealoja, jonka kasvustot katkaistiin ja niistä riivittiin tuoreena lehdet punnitusta varten. Näytealojen sijainnit mitattiin cm-tarkalla GNSS-laitteella, ja näin saatiin luotua yhteys laserkeilaimen havaintojen ja toisaalta lehtialanäytteiden välille. Puiden kohdalla tämä on työlästä ja siksi tarvitaan otantaa, koeoksia ja versoja.



Kuva 140. vadelman lehden pinta-alan ja kuivamassa välinen suhde sekä 1. että 2. vuoden versoissa. Aineiston on mitannut MMT Aarne Hovi. 10000 mm^2 vastaa 100 cm^2 eli 10 x 10 cm pinta-alaa.



Kuva 141. Kun 1 m^2 näytealan vadelman versot riivittiin, saatiin lehtien tuoremassat erikseen 1. ja 2. vuoden versoille (lehdet ovat rakenteeltaan erilaisia), ja pystyttiin yhdistämään kaukokartoituksella arvioitu (kasvustotunnus) lehtiala-indeksiruudusta riivittyjen lehtien tuoremassaan.

Puun ikä

Puun ikä on helppo määrittää ikäkairan lustonäytteestä. Biologisen iän määrittämiseen tarvitaan kairaus puun tyveltä. Rinnankorkeusikä kairataan 1.3 metrin korkeudelta. On olemassa taulukoita (malleja), joista voi arvioida 1.3 m korkeuden saavuttamiseen kuluneen ajan (ikälisäystaulukot). Viljelymetsissä ei ole ikävaihtelua paitsi luontaisesti syntyneiden puiden osalta. Havupuun taimen ikä saadaan oksakiehkuroista, mutta lehtipuiden iäksi oletetaan usein sama kuin havupuilla, sillä lehtipuiden kairaamista yleensä halutaan välttää lahottajien takia. Ikä kertoo puun ja puuston kehitysvaiheesta alaharvennuksin käsitellyissä metsiköissä, joiden uudistamisessa pyritään tasaikäiseen uuteen puusukupolveen. Esimerkiksi pituuskasvukehitys hidastuu merkittävästi yleensä n. 100 vuoden iällä, vaikka riippuen puulajista, puut (rungot) saattavatkin saavuttaa satojen vuosien kokonaisuuden. Puiden rungot jatkavat kasvuaan, koska niiden on pakko, mutta puuston kasvu voi muuttua negatiiviseksi puiden vanhetessa, koska puita alkaa kuolla ja tämä ns. luonnonpoistuma lasketaan usein negatiiviseksi kasvuksi.

Biomassamittaukset

Biomassamittauksissa hankitaan siis tietoa runkopuun, kuoren, oksien, oksien kuoren, neulasten ja lehtien, epifyyttien jne. kuiva- ja tuoremassasta. Näitä ei useinkaan voi mitata suoraan puuta tuhoamatta. Välineitä ovat vaa'at ja kuivauskaapit.



Kuva 142. Männyn oksien tuoremassa punnistusta Hyytiälässä 2001 (kuva Markus Holopainen)

Puutunnusten johtaminen malleilla

Kaikkia (useimpia) puutunnuksia ei voi mitata suoraan, kuten edellä olevasta on käynyt ilmi, vaan tarvitaan malleja. **Pohjapinta-alan (g) johtamiseksi tarvittu malli** otaksui poikileikkausalan olevan ympyrä, jolloin $g = \pi/4 \times d^2$. Estimointiin tarvitaan läpimita, d .

Runkokäyrät ja tilavuusyhtälöt, jotka jo esiteltiin, ovat puutunnusten (läpimittoja, korkeuksia, tilavuuksia) estimointimalleja. Niissä tarvitaan tietoa puulajista, läpimitoista ja/tai puun pituudesta. Yksinkertaisin tilavuusyhtälö on $v = 0.5 \times g \times h$.

Ikälisäystaulukot, joilla korjataan rinnankorkeusikää ja välitetään kairaaminen ovat myös puutunnusmalleja. Niissä tarvitaan tietoa puulajista ja kasvupaikasta sekä maantieteellisestä sijainnista. **Kuoren tilavuusosuutta** ennustetaan malleilla, joissa selittäjiä ovat puulaji ja puun kokoa ilmaisevat puutunnukset.

Pituusmallit ovat yhtälöitä, joilla voi ennustaa puulle pituuden. Niitä on yleisiä ja metsikkökohtaisia. Yleisiä malleja käytettäessä tarvitaan tietoa (selittäjät) esim. kasvupaikan ominaisuuksista, puun läpimitasta, puuston iästä ja tiheydestä. Mallilla saa puille pituudet mittamatta yhdestäkään puusta pituutta. Taustalla on isoja aineistoja, joista mallien parametrit on estimoitu. Metsikkökohtaiset mallit laaditaan läpimita-

pituus -havainnoista, joita kerätään metsikön puista koepuiden avulla. Näslundin pituuskäyrä on eräs esimerkki.

Puutunnusten kasvu (kasvuun liittyvät käsitteet)

Absoluuttinen kasvu. Jos puun pituus on 18 m, on sen pituuden kokonaiskasvu 18 m. Samaisen puun maanpäällisen biomassan **kokonais(brutto)kasvu** ei voi mitata kaatamalla puuta, koska saadusta tuloksesta jää uupumaan poistuma (oksa, ja neulaskariker). Voimme havaita vain **kokonaisnettokasvun**.

Jos puu on viimeisten 5 v aikana kasvanut pituutta 0.8 m, on se **menneen jakson** pituuskasvu. Jos puu on 50-vuotias, on **keskimääräinen vuotuinen pituuskasvu** $18/50 = 36$ cm. **Keskimääräinen vuotuinen jakson pituuskasvu** on $0.8/5 = 16$ cm/v.

Suhteellinen kasvu (%). Suhteelliseen kasvuun tarvitaan vertailusuure. Jakson kasvu-% arvioitaessa jakajassa voi olla tunnuksen alku- (rabatti-%) tai loppuarvo (diskontto-%) tai näiden keskiarvo (keski-%).

$$p = \frac{100}{n} \frac{h_t - h_{t-n}}{h_{t-n}}$$

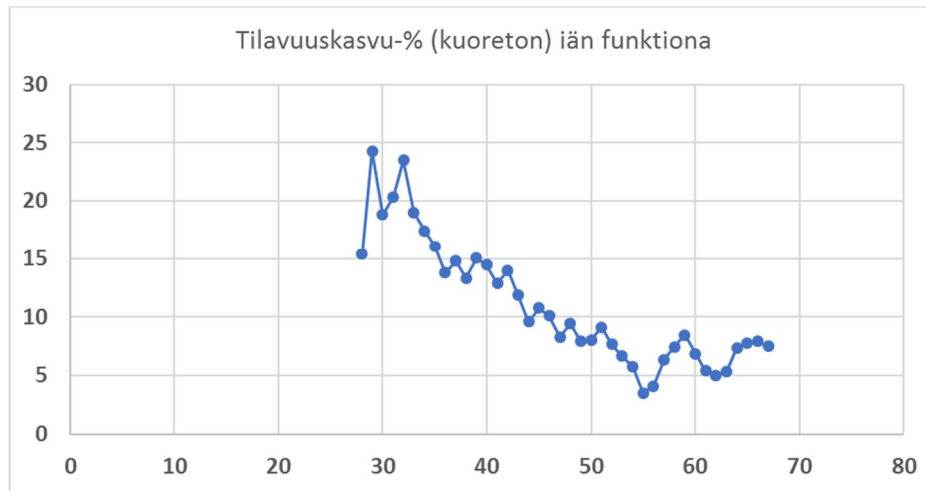
$$p = \frac{100}{n} \frac{h_t - h_{t-n}}{h_t}$$

$$p = \frac{200}{n} \frac{h_t - h_{t-n}}{h_t + h_{t-n}}$$

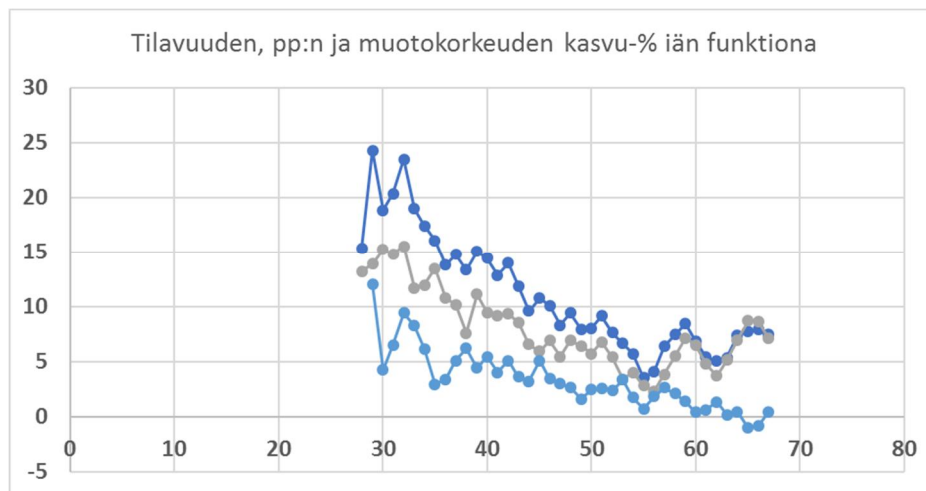
Korkoa korolle-%: $p = 100 \times \left(\sqrt[n]{\frac{h_t}{h_{t-n}}} - 1 \right)$;

$$h_t = (p)^n \times h_{t-n}$$

Edellä käsiteltiin sädekasvun (ir), läpimitan kasvun (id) ja pituuskasvun (ih) mittaamista (i = increment). Muotoluvun kasvu on yleensä negatiivinen eli muotoluku pienenee. Muotokorkeuden (fh) kasvu on positiivista, mutta pienenee vanhoilla puilla lähelle nollaa, kun pituuskasvu tyrehtyy ja muotoluku (f) pienenee. Tilavuuskasvu (iv) voidaan arvioida kaavalla $p_v = p_g + p_{fh}$, missä termit ovat (rabatti) kasvuprosentteja (Kuva 144). Pystypuulle pohjapinta-alan kasvuprosentti (p_g) saadaan kairaamalla ja muotokorkeuden kasvu-% (p_{fh}) vanhoista taulukoista (Ilvessalo, Pystypuiden kuuti- oimis- ja kasvunlaskentataulukot, Tapio, 1948) puulajin, pituuskasvun, ja puun kapenemisen perusteella (ellei puuta kaadeta ja tehdä runkoanalyysiä). Kaavalla saatu luku p_v on tilavuuskasvuprosentti. Toinen vaihtoehto määrittää tilavuuskasvu (iv) on mitata puu tarkasti kahtena ajankohdana. On hyvä muistaa, että kun puusta mitataan d , d_6 ja h , antavat mallit tilavuuden noin 4% tarkkuudella, jota tarkempaan arvioon on pystypuun kohdalla vaikea päästä.



Kuva 143. Erään 67-vuotiaan kuusen vuotuisen tilavuuskasvun perusteella laskettu (rabatti) kasvuprosentti. Puuta on lannoitettu viime vuosina ja se on saanut kasvutilaa, jolloin kasvuprosentin luontainen iän mukaan laskeva kehitys on pysähtynyt. 8 % kasvuprosentti on erityisen suuri 67-vuotiaalle puulle. Puusta on tehty runkoanalyysi, jossa läpimitta on laskettu jokaisena vuotena. Kasvua ei siis ole laskettu mallilla.



Kuva 144. Saman 67-vuotiaan kuusen (runkoanalyysi tehty, lustot mitattu jokaisen vuotena) kasvuprosentit: p_v , p_g ja p_h eli tilavuuden, pohjapinta-alan ja muutokorkeuden kasvuprosentit. Lannoitus ja harvennus ovat vaikuttaneet runkomuotoon s.e. tyvi on kasvanut voimakkaasti ja puun muotoluku pienennyt, mistä johtuen muutokorkeuden kasvu on ollut negatiivista viime vuosina.

Puustotunnukset

Puustotunnuskuin kuvaillaan yksittäistä puuta. **Puustotunnukset kuvaavat jonkun puujoukon puustotunnusten jakaumapiirteitä.** Puujoukko voi olla esim. pihapuut, leimatut rungot, metsikön kaikki tai jonkun puulajit puut tai alikasvoksen muodostavat puut, leimikon markkinakelpoiset puut, metsäkiinteistön puut tai koko Suomen puut.

Seuraavassa ajatellaan metsikköä ja sen puustotunnuksia.

- **Puujakso:** ainoa (vallitseva) tai ylempi ja alempi. Kaksijaksoisessa metsässä ajatellaan, että jokin toimenpide tehdään jommankumman jakson hyväksi tai takia. Esim. "Ylemmän jakson pääpuulaji on mänty", "alempaan jakson muodostavat kuusi ja hieskoivu", "alempi jakso raivataan ennen hakkuuta"
- **Metsikköluokka** liittyy edelliseen ja metsikkö on joko yksi- tai kaksijaksoinen. Eri-ikäisrakenteisuus voidaan ilmaista metsikköluokkana.
- **Vallitseva puulaji.** Esim. tilavuudeltaan nyt tai harvennuksen/taimikonhoidon jälkeen. Ajatellaan puulajin merkitystä metsänkasvatuksessa.
- **Kehitysluokka.** Tasaikäisessä metsässä. Kuvaava kehitysvaihetta. Ei standardimääritelmiä. Aukea, taimikkovaihe, kasvatusvaihe, uudistamisvaihe, uudistamistapa. Metsiköiden kehitysluokkakajakauma kuvaava metsälön puustojen tilaa.
- **Runkoluku (N), puiden keskietäisyys, pohjapinta-ala (G),** Puuston rakenne (runkolukusarja, puutavaralajijakauma), **keskiläpimitat (Dg DgM), keskipituudet (Hg, HgM), keskipuu, valtapituus (Hdom), runkotilavuus (V), rungon keskitilavuus,** puutavaralajirakenne, **ikä (T),** poistumat.

Puustotunnusten symboleja

D_{gM}, D_g	PPA-mediaani ja ppa-painotettu keskilm
H_{gM}, H_g	PPA-mediaani ja ppa-painotettu keskipituus
H_{dom}	Valtapituus
G, G_x	Pohjapinta-ala (PPA, m ² /ha), koko puujoukossa tai osajoukossa x
V, V_x	Runkotilavuus (m ³ /ha), koko puujoukossa tai osajoukossa x
T	Ikä

Hg ja Dg ovat painotettuja keskiarvoja. Painoina on g, eli kun puun pohjapinta-ala. DgM ja HgM ovat pohjapinta-alan suhteen mediaanipuun mitat. Eli laskettaessa puut laitetaan suuruusjärjestykseen ja lasketaan ppa:n kertymää, ja mediaani on puu jota pienemmissä ja suuremmissa on noin 50% pohjapinta-alasta. Relaskooppikoealalla läpimitaltaan keskimäinen puu edustaa mediaanipuuta, kun pyritään

nopeisiin mittauksiin ja tarvitaan arvot muuttujille DgM ja HgM.

Puustotunnusten kasvu

Valtapituuden kasvu noudattaa iänmukaista puulajille ja kasvupaikalle ominaista kehitystä. Jos metsää harvennetaan ylhäältä tai harsitaan, valtapituus pienenee. Jatkuvan kasvatuksen metsätaloudessa valtapituus on lähinnä tekninen tunnus.

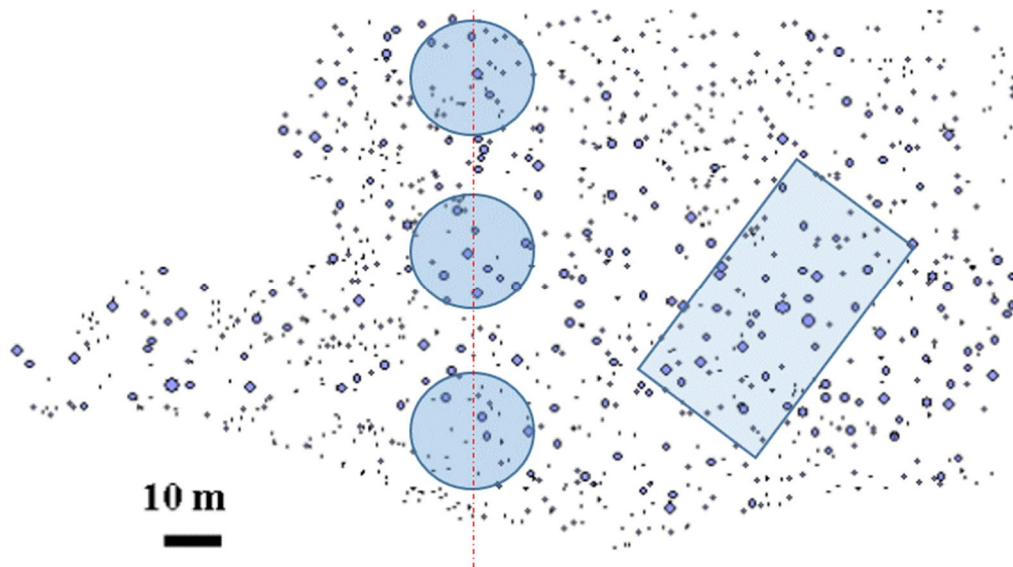
Keskiläpimita ja -pituus kasvavat puuston järeytyessä, mutta harvennukset, jotka kohdistuvat systemaattisesti joko pieniin tai suuriin puihin, voivat muuttaa niin keskiläpimitaa kuin keskipituutta. **Runkolukusarja muuttuu**, kun isot puut järeytyvät ja "pienemmät tulevat perässä", riippuen kasvupaikasta, tiheydestä ja puulajista. Runkolukusarjaa (puiden läpimitajakaumaa) muutetaan harvennuksissa ja siihen vaikuttaa luonnonpoistuma sekä uusien puiden syntyminen ja kasvu.

Pohjapinta-ala alkaa kertyä, kun puusto saavuttaa rinnan korkeuden. Pohjapinta-ala kuvaava tiheyttä ja eri puulajin puustot tulevat ns. itseharvennemisrajalle tietyllä pohjapinta-alalla. Esim. kuusikoissa tiheys alkaa vaivata (puita kuolee), kun PPA on 35 m²/ha tai yli. Pohjapinta-ala putoaa harvennuksissa.

Tilavuuskasvu. Luonnontilainen metsä: Elävät puut kasvavat tilavuutta. Tilavuuden kokonaiskasvu on elävien puiden tilavuus jaettuna puuston iällä. Bruttokasvuun (tuotokseen) kuuluu lisäksi kuolleiden puiden runkopuun tilavuus, luonnonpoistuma. Jakson tilavuuskasvuun kuuluu jakson aikana tapahtunut kasvu, josta osa voi olla luonnonpoistumaa, joka ei ole jakson nettokasvu. Hakkuin käsitelty metsä: Jos metsää harvennetaan, syntyy hakkuupoistumaa. Jos mittauksesta on kulunut esim. 3 vuotta, jonka jälkeen puusto harvennetaan, ja mitataan jälleen 2 vuoden kuluttua (mittausjakso on viisi vuotta) on tuona ajanjaksona puita voinut kuolla, harvennetut (poistetut) puut kasvaneet jne. Puhutaan jakson loppuun säilyvän puuston kasvusta, jakson aikana poistuvan puuston kasvusta jne. Tuotosta (m³, kg) laskeudessa tulee olla tarkkana.

Kokonaistuotos sisältää kaiken kasvun johonkin ajankohtaan mennessä, siis myös poistuma lasketaan mukaan. Keskituotos on kokonaistuotos jaettuna puuston iällä ja voi suurimmillaan olla 7-8 m³/ha/a Suomessa, kun juokseva (jakson, "hetkittäinen") kasvu voi olla parhaimmillaan jopa 15 m³/ha/a hyväkasvuisissa puustoissa rehevillä kasvupaikoilla. Kokonaispoistumaan kuuluvat luonnonpoistuma (kuolleet puut) ja hakkuupoistuma.

Kun metsikköä seurataan pysyvällä näytealalla, jossa puut on kartoitettu tai muuten yksilöity, voidaan puiden syntymistä, luonnonpoistumaa ja hakkuupoistumaa seurata puutasolla. Mittausajankohtien välillä tapahtuneet muutokset saadaan kiinni, kunhan puustoa mitataan riittävän tiheään. Kertakoealalla harvennuspoistumaa voi yrittää mitata kannoista, ja mallintamalla "kantojen päälle rungot sellaisina kuin ne olivat hakattaessa".



Kuva 145. Määrälaisia näytteitä (koealoja) puukartalla.

Puustotunnukset voi mitata

a) koealalla, josta **mitataan** luku- ja koepuita ja sovelletaan **puutunnusmalleja**, ja lasketaan **puustotunnukset saatujen puutunnusten summina ja keskitunnuksina**.

Toinen vaihtoehto **b)** on pyrkiä **mittaamaan** joitakin **puustotunnuksia suoraan** ja **mallintaa loput puustotunnusmalleilla**.

Vaihtoehto a) – Puustotunnukset puutunnuksin

Ensin päätetään, mitataanko alueen/puupopulaation kaikki puut vai valitaanko näyte (otos) puita (pinta-alaa) edustamaan puujoukkoa. Jälkimmäisessä tapauksessa hyväksytään tuloksiin otantavirhettä, koska kaikkia alueen puita ei sisällytetä mittauksiin. Näytettä kutsutaan koealaksi, ja niitä on kahta tyyppiä: määrälaiset ja muuttuva-alaiset koealat. Esim. metsikköön rajattu ympyrä tai suorakaide on määräläinen koeala. Koko metsikön rajausta näytteeseen on sekin periaatteessa määräläinen koeala, jolla on koko alueen pinta-ala.

Koeala voi olla myös osa koejärjestelyä, esim. lannoituskokeen ruutu, jolloin kyse on ruutujen (käsittelyjen) välisestä vertailusta puustotunnusten osalta. Ruutujen koossa voi olla eroja, ja siksi vertailun kannalta on hyvä, jos saadut tulokset normeerataan vertailukelpoisiksi. Summatunnusten osalta esim. hehtaarikohtaisiksi arvoiksi.

a.1. Tavoitteena kantoraha-arvo: Mitataan kaikki puut ja tarvittavat tunnuksat määrälaisista koealasta käyttäen.

Otaksutaan, että 3 hehtaarin metsikköön sijoitetaan 50 x 50 m koeala. Seuraavassa vaiheessa rajataan puujoukkoa.

Kun tavoitteena on selvittää puuston kantoraha-arvo, asetetaan mitattavien puiden läpimitalle (d13) alaraja, sillä

pieniä runkoja ei voi myydä. Se voi olla esim. 86 mm. Sen jälkeen **voidaan jokainen 86 mm rajan ylittävä puu mitata**, ja havaita niistä puulaji, d13, d6, h ja mahdolliset rungon arvoon vaikuttavat viat. Jokaiselle puulle voidaan sen jälkeen laskea tilavuus tilavuusyhtälöillä ja/tai runkokäyrillä. Runkokäyriä soveltaen (pölkkytysalgoritmileillä) saadaan puutaralajien (saha- ja kuitupuun) tilavuudet per puu. Sen jälkeen kaikille puille on saatu

- puulaji,
- d13,
- d6,
- h,
- viat,
- tilavuus (m³/puu),
- tukkipuun tilavuus (m³/puu) ja
- kuitupuun tilavuus (m³/puu)

Nämä ovat puutunnuksia, joista osa on havaittu ja osa johdettu.

Puusta tehdyt vikaisuutta koskevat havainnot vähentävät esim. runkokäyräarviota tukkitilavuudelle. Kustakin puusta on esim. voitu arvioida oksattoman tyvitukin korkeus, joka on huomioitu runkokäyrällä puuta pölkkytettäessä (Kuva 120).

Nyt puustotunnuksia voidaan laskea seuraavasti:

Runkoluku eli puiden lukumäärä hehtaarilla, r/ha, saadaan laskemalla (Runkoja koealalla × (10000 m²/ha / 2500 m²)). Tässä 2500 m² on koealan pinta-ala (50 x 50 m) ja 10000 m² on hehtaari ilmaistuna neliömetreinä. Kerrointa (10000 m²/ha / 2500 m²) tai × (10000 m²/ha / koealan pinta-ala m²) voidaan kutsua muutokertoimeksi, jolla tulokset saadaan normeerattua hehtaarikohtaisiksi vertailuja helpottamaan.

Kokonaistilavuus, V, m³/ha saadaan laskemalla yhteen puukohtaiset tilavuudet, ja saatu summa jaetaan koealan koolla. (Tilavuuksien summa × (10000 m²/ha / 2500 m²).

Keskiläpimitta, Dg. Jokasen puun läpimitta kerrotaan painolla, joka on puun poikkileikkausala (g). Tämä summa jaetaan painojen summalla eli puiden pohjapinta-alojen (g) summalla.

Kantoraha-arvo, lasketaan summaamalla ensin puittaiset tukki- ja kuitupuun tilavuudet samaan tapaan kuin kokonaistilavuus. Sen jälkeen sovelletaan kantohintoja (€/m³) kullekin puulajille (mäntytukki, kuusitukki, mäntykuitu, jne.) ja saadaan kerto- ja yhteenlaskujen summana kokonaisarvo € puutavaralajien summana. Jos se halutaan ilmaista hehtaarikohtaisena, tehdään kertolasku muuntokertoimella.

Esimerkki (kts. Taulukot alla). Mitataan säteeltään 7.98 m ympyrä vanhassa kuusikossa. Koealan pinta-ala on 200 m² (pi×7.98×7.98). Puita on yhdeksän, ja runkoluku on siten 10000/200 × 9 = 450 r/ha. Karkealla likiarvokaavalla 0.5 × g × h saadaan puille tilavuusestimaatit 320–855 litraa. Tilavuuksien summa 5.56 m³ vastaa hehtaarilla arvoa 10000 / 200 × 5.56 = 278 m³/ha, mikä on puuston kokonaistilavuuden (V) estimaatti. Jokaiselle puulle lasketaan pohjapinta-ala, g. Näiden summa on 0.46 m², mikä on hehtaarikohtaisena 10000 / 200 × 0.46 = 23 m²/ha. PPA-painotettujen keskitunnuksien Dg ja Hg laskennassa tarvittavat apusummat on laskettu omiin sarakkeisiin.

$Dg = \text{summa}(g \cdot d) / \text{summa}(g)$.

$Hg = \text{summa}(g \cdot h) / \text{summa}(g)$.

Taulukko 3: Puustotunnusten laskenta 7.98 m säteisellä ympyrä-koealalla.

n	sp	d13	H, m	Tilavuus	g*d	g*h	g
1	2	23	19	0.395	9555.9	7894.0	415.5
2	2	21	18.5	0.320	7273.6	6407.7	346.4
3	2	26	24.5	0.650	13804.2	13007.8	530.9
4	2	28	26.2	0.807	17241.1	16132.7	615.8
5	2	25	26	0.638	12271.8	12762.7	490.9
6	2	28	26.2	0.807	17241.1	16132.7	615.8
7	2	23	22.1	0.459	9555.9	9182.0	415.5
8	2	26	23.8	0.632	13804.2	12636.1	530.9
9	2	29	25.9	0.855	19155.1	17107.5	660.5
			Summa	5.563	119902.8	111263.2	4622.1
			Dg, cm	25.9			
			Hg, m	24.1			

Huomaa, että esimerkissä puista ei mitattu muuttujaa d₆, ainoastaan d₁₃ ja h. Lisäksi oletetaan, että kaikki puut ovat virheettömiä, ja runkokäyrällä saadaan puutavaralajit oikein.

Kun puille laskee runkokäyrää soveltavalla pölkytysalgoritmilla puutavaralajien tilavuudet, saadaan:

Taulukko 4. Puustotunnusten Vtukki ja Vkuitu laskenta määrälaisella ympyrä-koealalla, kun yksittäisten runkojen tukki- ja kuituosan tilavuudet ratkaistaan runkokäyrää soveltavalla pölkytysalgoritmilla.

ID	plaji	d13	h	tukki	kuitu	hukka	Kok
1	2	230	19	282.2	98.1	4.5	384.8
2	2	210	18.5	192.3	122	4.8	319.1
3	2	260	24.5	545.8	99.2	4.5	649.4
4	2	280	26.2	697.7	94.9	4.3	796.9
5	2	250	26	541.5	106.3	4.9	652.7
6	2	280	26.2	697.7	94.9	4.3	796.9
7	2	230	22.1	357.6	103.1	4.7	465.5
8	2	260	23.8	523.6	98.7	4.4	626.7
9	2	290	25.9	735.8	92.4	4.2	832.4
			summat	4574.2	909.6	40.6	5524.4

(kts. 3_laskarit_rk_pölkytys_mod_Turunen.xlsm Excel makro)

Nyt tukkia on 4.574 m³ × 50 = 228.7 m³/ha ja kuitua 0.9096 × 50 = 45.5 m³/ha. Runkokäyriä käyttäen kokonaistilavuus on 5.524 × 50 = 276.2 m³/ha, kun se likimääräiskaavalla oli 278 m³/ha. Jos yksikköhinnat ovat 60 ja 20 euroa/m³, on puuston arvo yhteensä 14632 euroa.

Esimerkki jatkuu - Kasvun arviointi. Jos olemme kiinnostuneita puuston (puhdas kuusikko, josta 9 puuta koealalla) kasvusta, tarvitaan kasvua koskevia mittauksia. Jos halutaan suurta tarkkuutta, kaadetaan jokainen puu ja tehdään puille runkoanalyysi, jolloin saadaan selville jokaisen puun kuoreton tilavuuskasvu-% esim. viimeisten viiden vuoden aikana. Sen jälkeen voidaan otaksua suhteellisen kasvutason (%) pysyvän samana ja laskea jokaiselle puulle seuraavan vuoden kasvu (m³/puu) ja summina (m³/koeala) ja (m³/ha).

Jos puita ei voida kaataa, mutta niistä voidaan kairata sädekasvunäyte ja mitata pituuskasvu kiikareilla, saadaan jokaiselle puulle arvio siitä, kuinka suuri se oli esim. 5 vuotta aiemmin eli mitkä olivat sen d₁₃ ja h tuolloin. Sen jälkeen voidaan jokaisen puun tilavuus laskea tilavuusyhtälöllä tai runkokäyrällä kumpanakin ajankohtana, ja saadaan tilavuuskasvu (iv) m³/5a ja suhteellisenä (pv) (%). Sen jälkeen koealan kasvu on puiden kasvun summa (esim. otaksuen kasvu-% säilyvän samalla tasolla), joka voidaan muuntokertoimella muuntaa hehtaarikohtaiseksi.

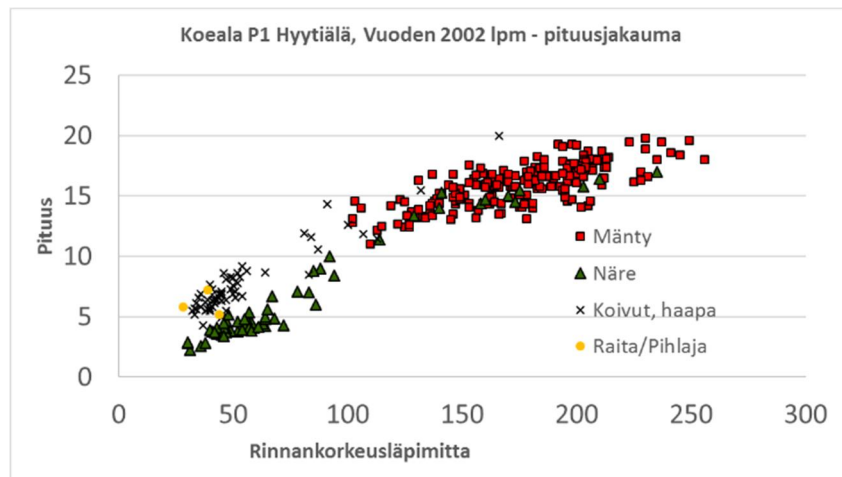
Taulukko 5. Kasvunlaskenta 9 puun koealalla. Tässä oletetaan mittaus tehdyn 5 vuotta myöhemmin toistomittauksena, jolloin samoille puille on saatu uudet arvot muututuille d13 ja h. Samalla logiikalla voidaan ajatella että vanhat arvot saadaan kairaamalla puu ja arvioimalla pituuskasvu. Kokonaistilavuudet on laskettu puille runkokäyrillä. Koska koealan säde on 7.98 m on muuntokerroin 50. Vuotiuiseksi kasvuksi saadaan 6.4 m3/ha/a kun 5 vuoden kasvu oli 31.8 m3/ha/5a.

id	plaji	d13	h	v_kok	d13	h	v_kok
1	2	230	19.0	384.8	239	19.7	429.6
2	2	210	18.5	319.1	215	19.1	345.8
3	2	260	24.5	649.4	272	25.1	721
4	2	280	26.2	796.9	295	28.0	940.7
5	2	250	26.0	652.7	262	26.8	732.7
6	2	280	26.2	796.9	289	26.6	855.0
7	2	230	22.1	465.5	234	22.9	500.7
8	2	260	23.8	626.7	275	24.0	694.6
9	2	290	25.9	832.4	303	27.0	940.4
			summat	5524.4			6160.5
			Tilavuus	276.2	m3/ha		308.0
			Kasvu	31.8	m3/ha/a		
				6.4	m3/ha/a		

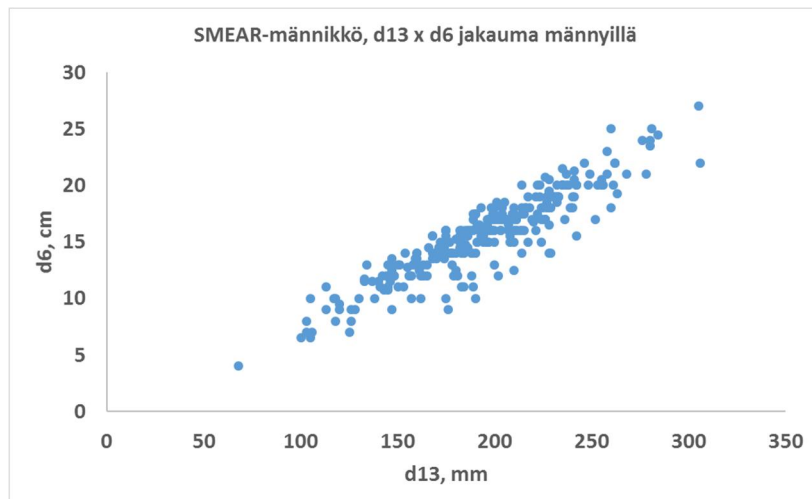
a2. Tavoitteena kantoraha-arvo: Mitataan tarkentavia puutunnuksia vain osasta puita

Tämä vaihtoehto poikkeaa edellisestä siinä, että koealan jokainen puu kyllä luetaan eli mitataan puulaji ja d13 sekä runkolaji, mutta aikaa vievät mittaukset tehdään vain osasta puita, hyödyntäen riippuvuuksia d13 ja aikaa vievien muuttujien välillä.

Kurssilla esitellyt runkokäyrät edellyttävät, että puusta tunnetaan vähintään puulaji, d13 ja h, mutta jos puusta tunnetaan myös d6, tarkentuvat runkokäyrät (kuten tilavuusyhtälötkin). Muuttujat d6 ja h korreloivat yhdessä metsikössä rinnankorkeusläpimitan kanssa. (Kuva 146, Kuva 147)



Kuva 146. Rinnankorkeusläpimitan ja pituuden yhteisjakauma puulajeittain Hyytiälän P1 koealalla.



Kuva 147. Rinnankorkeusläpimitan ja kuuden metrin läpimitan yhteisjakauma vuoden 2018 mittauksissa Hyytiälän SMEAR-männikössä.

Nyt voidaan säästää muuttujien d6 ja h mittauksissa, jos osalle puita nämä tunnuksat estimoidaan yhtälöillä, jotka estimoidaan hyödyntäen riippuvuuksia (korrelaatiota).

Tällöin mittaus etenee s.e. osa puista valitaan jollain logiikalla koepuiksi ja näistä joko h tai h ja $d6$. Näistä mittauksista laaditaan yhtälöt, jotka puulajin ja d13 avulla selittävät muuttujia d6 ja h, jolloin ne saadaan estimoiduiksi kaikille puille. Sen jälkeen laskenta etenee kuten edellä: puut pölkytetään runkokäyrillä ja saadaan jokaisen puun tilavuus ja puutavaralajien tilavuudet. Puustotunnukset ovat puutunnusten summia ja keskitunnuksia. Arvo saadaan tukki- ja kuitupuun määrän (m3) ja yksikköhintojen (€/m3) avulla.

Sama logiikka pätee kasvun arviontiin. Koepuut kairataan ja niistä mitataan pituuskasvu, jolloin saadaan kullekin koepuulle koepuutunnuksena tilavuuskasvu-%, joka yleistetään kaikille puille d13 muuttujan avulla. Kasvu-% korreloi yleensä d13:n kanssa, ollen isoilla puilla pienempi kuin metsikön pienemmillä puilla, ja d13 ja pv välille voidaan rakentaa yhtälö.

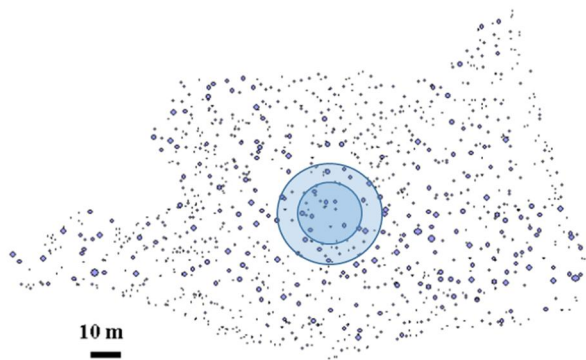
Se, kuinka koepuiden valinta kannattaa tehdä eli miten ja puut valitaan, ja paljonko niitä valitaan, ja kuinka koepuiden avulla lasketaan malli, jolla d6 tai h ennustetaan, käsitellään myöhemmin.

Koealatyyppit: määräläinen ja muuttuvalainen

Edellä metsikköön sijoitettiin suuri 50 x 50 m² koeala, jollaisella voi olla useita satoja puita, jos metsä on nuorta – jopa tuhansia.

Koeala oli **määräläinen**, 2500 m² kooltaan ja saadut summatunnukset muutetaan hehtaarikohtaisiksi jakolaskulla 10000/A, missä A on koealan pinta-ala neliömetreissä. Kaikilla 86 mm paksummilla puilla oli sama todennäköisyys $p=1$ tulla mitatuksi, kun taas 86 mm pienemmillä se oli kaikilla nolla.

Keskitunnuksia (D_g ja H_g) laskettaessa koealan pinta-alaa ja muuntokerrointa ei tarvinnut huomioida, koska kaikilla puilla oli sama todennäköisyys kuulua koealaan, kunhan läpimitta ylitti mittausrajan.



Kuva 148. Vaihtuva-alainen kahden ympyrän koeala.

Koeala voi olla myös **ympyrän** muotoinen, ja paljon pienempi, kuten esimerkki edellä osoitti (Taulukko 3).

Esimerkissä läpimittaraja (86 mm) painotti mittausta. Rajaa pienempien puiden otantatodennäköisyys oli nolla. Ne eivät kuuluneet mielenkiinnon kohteena olevaan populaatioon. Yhtä lailla raja voisi koskea elävää ja kuollutta puustoa, maatai pystypuita jne.

Mikäli mittauksessa halutaan painottaa erilaisia osajoukkoja, voidaan niiden **otentatodennäköisyyteen vaikuttaa koealakoona** avulla. Esim. mäntyjen koeala voi olla ympyrä, jonka säde on 10 m ja kuusten 20 m. Tällöin kuusten puustotunnukset ovat tarkemmat, koska niitä mitataan enemmän – otantatodennäköisyys on nelinkertainen (pinta-alasuhte). Joskus rajoja on useita: esim. pintakasvillisuudelle, alikasvokselle, alle 10 cm ja yli 30 cm puille, jos arvokkaiden puiden osalta halutaan tarkempaa tietoa, mutta samalla arvio alikasvoksesta ja pinta-kasvillisuudesta. Tällöin puustotunnuksia laskettaessa tarvitsee huomioida painot eli koealojen pinta-alasuhteet. Yksi puu edustaa 10000/A puuta, kun se on luettu ympyrältä, jonka pinta-ala on A.

Esimerkki. Puut luettiin säteeltään 7.98 ja 11.28 m ympyröiltä s.e. läpimittaa 10 cm pienemmät luettiin 7.98 m ympyrältä ja tätä suuremmat 11.28 m säteiseltä. Alle 10 cm puita oli 7 kpl ja yli 10 cm puita 8 kpl. Runkoluku on $50 \times 7 + 25 \times 8 = 550$ runkoa hehtaarilta. Alle 10 cm puiden yhteenlas-

kettu tilavuus oli 1.2 m³ ja yli 10 cm puiden 3.2 m³. Kokonaistilavuus on siten $50 \times 1.2 + 25 \times 3.2 = 140$ m³/ha. Luvut 50 ja 25 vastaavat 200 m² ja 400 m² määräläisten koealojen muuntokertoimia hehtaarikohtaisten summatunnusten laske-
miseksi.

Relaskooppi on mittaväline, jolla puut valitaan otokseen, jos niiden runkojen poikkileikkausalan peittämä kulma on suurempi, kuin relaskoopin avauskulma, joka vastaa suuretta jota kutsutaan **relaskooppikertoimeksi**. Jokainen puu, joka tulee näin valituksi edustaa samaa pohjapinta-alaa (m²/ha), eli relaskoopilla voi mitata suoraan puustotunnusta pohjapinta-ala (G), joka on puuston tiheyden mitta (mitataan täysi ympyrä ja luetaan rungot).

Avauskulma voidaan valita siten, että kunkin luetun puun edustama pohjapinta-ala on esim. 0.5, 1, 2 tai 4 m²/ha.

Ajattele hehtaarin ympyrä. Sellaisen säde on noin 56.4 m. Ajattele puu, jonka rungon poikkileikkausala on 1 m² tällöisen ympyrän kaarelle. Rungon läpimitan 1.13 m ja 56.4 m välinen suhde antaa avauskulman relaskoopille, jonka kerroin on 1 m²/puu.

Jos kulma on pieni, tulee puita valituksi paljon. Jos puu on pieni, ei se täytä kulmavaatimusta kuin aivan läheltä. Kaksi saman paksuista puuta tulee valituksi vielä yhtä kaukaa mittaajasta. Jos kahden puun välillä on pienikin läpimittaero, on se (raja)etäisyys erilainen, jolla ne täsmällisesti täyttävät avauskulman.

Jos runko on epäpyöreä, tulee se näytteeseen hieman eri todennäköisyydellä, riippuen siitä, mistä suunnasta relaskoopilla (avauskulmalla) sitä satutaan tähdätään. Relaskoopilla mitatessa mitataankin ääretön määrä ympyräkoaloja samasta pisteestä ja se antaa otantatodennäköisyyden, joka riippuu puun koosta ja suosii isoja puita, koska tn on pohjapinta-alasta riippuva.

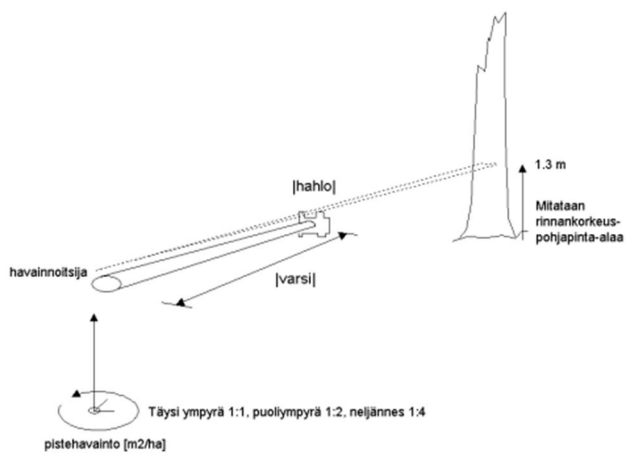
Koska puiden oletetaan olevan poikkileikkaukselta ympyrän muotoisia, voidaan laskea se etäisyys, jolla puu (läpimitta d) vielä tulee otokseen, kun relaskoopikerroin on q (m²/puu):

$$\text{rajaetäisyys}, r = \frac{50 \times d}{\sqrt{q}}$$

Tällöin jokainen puu luetaan ympyrältä A, jonka pinta-ala on

$$A = \pi r^2$$

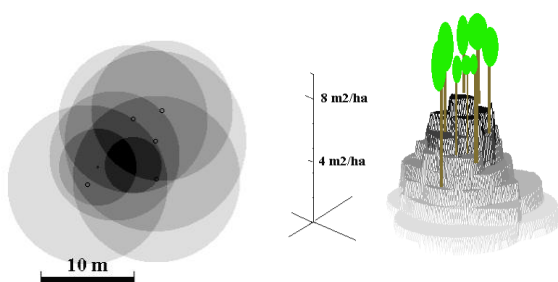
Jokaisen puun edustama puumäärä hehtaarikohtaisena saadaan kaavalla 10000/A, mutta siinä missä määräläisellä koealalla kaavoja (A:n arvoja) on yksi, usean ympyräkoalan systeemissä on useita, on relaskoopilla puita valittaessa kaavoja yhtä monta kuin on puita, koska jokaisella on oma läpimitta (d).



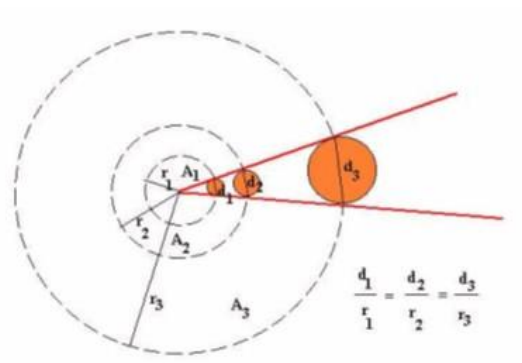
Kuva 149. Nimestään huolimatta relaskooppi on yksinkertainen. Varsirelaskoopin varren pituus ja hahlon leveys määräävät vaakakulman, jossa puita tarkastellaan, joka puolestaan määrää relaskooppikertoimen.



Kuva 150. Tiheän alikasvoksen vallitessa on relaskooppilla mittaaminen vaikeaa ja altista virheille.



Kuva 151. Ajatusleikki: Kun relaskooppikerroin valitaan, muodostuu puiden ympärille otantatodennäköisyys- tai pohjapinta-alakenttä. Kussakin kentän pisteessä tietyt puut täyttävät relaskoopin avautumiskulman, ja pisteeseen saadaan sen mukainen estimaatti pohjapinta-alaksi eli ko. puut kuuluvat koealaan/otokseen.



Kuva 152. Relaskoopin periaate: puun läpimitan ja rajaetäisyyden suhde pysyy vakiona (puun koon vaihtuessa), samoin puun poikileikkausalan ja ympyrän pinta-alan välinen suhde.

Vaihtoehto b) - puustotunnukset puustotunnuksin ja puustotunnusmallein

Puustunnusmalleilla tarkoitetaan malleja, joissa Y-muuttuja on puustotunnus ja X-muuttujat puusto- tai kasvupaikkatunnuksia. Puustotunnusmalleilla puustotunnuksia mitattaessa tehdään vähemmän mittauksia kuin edellä esitettyssä vaihtoehdossa a) (Puustotunnukset puiden summina ja keskiarvoina) ja mallitkin ovat erilaisia. Kts. Kuva 153 ja Kuva 154.

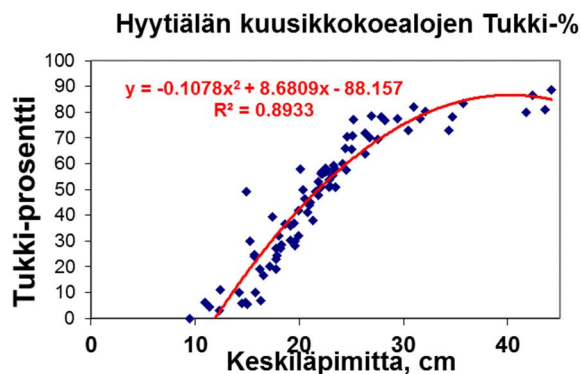
Puutunnusmalleilla laskettaessa jokainen runko kuutioitiin runkokäyrällä tai tilavuusmalleilla. Relaskooppitaulukko taas antaa suoraan puuston kokonaistilavuuden (V, m³/ha) pohjapinta-alan (G, m²/ha) ja keskipituuden (Hg, m) avulla. Taustalla ovat muotokorkeusmallit (Nyyssönen). Puun muotokorkeus fh liittyy tilavuuden määrittämiseen kaavalla $v = fgh$, jossa f on muotoluku. Muotokorkeus (FH) ja keskimääräinen muotoluku (F) voidaan määrittellä myös puustolle ja ajatella tilavuus kaavalla $V = FGH$ tai pikemmin $V = FH(H)G$, mikä on taustalla relaskooppitaulukossa. FH(H) on muotokorkeusmalli, jossa keskipituus selittää puuston muotokorkeutta.

Puutunnusmalleilla puutavaralajeja laskettaessa kukin runko pölkytettiin runkokäyrällä, mutta tukkipuuston tilavuusosuus -mallit antavat suoraan tukki-%-arvion puulajin ja keskiläpimitan (Kuva 153) tai puulajin, keskiläpimitan ja keskipituuden avulla (esimerkiksi), ja, saadulla tukkiosuuden arviolla voidaan kertoa relaskooppitaulukosta saatu kokonaistilavuus ja saada näin estimaatti tukkipuuston tilavuudelle.

Metsikkötason kasvumallit ennustavat puuston juoksevaa kasvua esimerkiksi lämpösumman, metsätyypin ja puulajin avulla. Puutunnuksin ja puutunnusmalleilla (vaihtoehto a)) kasvu voidaan selvittää kairaamalla koepuita ja mitattu kasvu-% yleistetään muille puille ja kasvu saadaan kaikkien puiden summana, mistä oli esimerkki edellä.

Metsikössä voidaan menetellä seuraavasti vaihtoehdossa b). Mitataan eri kohdista metsää relaskooppikoealoja ja niiltä relaskoopilla pohjapinta-ala G_{puulaji} puulajeittain sekä valitaan keskipuut puulajeittain, ja niistä mitataan estimaatit muuttujille keskiläpimita (DgM_{puulaji}) ja keskipituus (HgM_{puulaji}). Kunkin koealan puulajeittaisista G, DgM, HgM tietoja hyödyntäen voidaan malleilla ennustaa tilavuus ja tukkipuuston tilavuus puulajeittain. Koealojen keskiarvona saadaan metsikölle ko. tunnuksia. Pohja-pinta-alahavainnoista voidaan myös ensin laskea metsikkökohtaiset keskiarvot, kuten myös keskipituudesta ja keskiläpimitasta, ja soveltaa näitä keskiarvoja puustotunnusmalleihin. Puuston kasvu voidaan arvioida metsätyypin, puuston tilavuuden ja kairatun tai muuten tunnetun iän avulla, kasvumallista (taulukosta/mallista).

Vaihtoehto b) ei lähtökohtaisesti ole yhtä tarkka kuin a), mutta kummankin tarkkuus riippuu siitä, paljonko mitataan eli kuinka suuri osa puusta vaihtoehdossa a) mitattiin ja toisaalta siitä, kuinka monta (G, DgM, HgM)-koealaa metsiköstä vaihtoehdossa b) mitattiin. Niin puutunnus- kuin puustotunnusmallit sisältävät lisäksi oman epävarmuutensa ("relaskooppitaulukko ei istu metsikköön" tai "runkomuodot metsikössä ovat runkokäyrän ennustamasta poikkeavia").



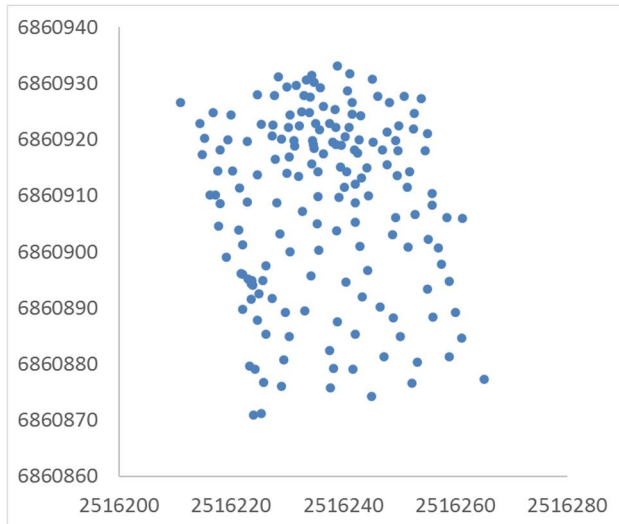
Kuva 153. Yksinkertainen puustotunnusmalli, jolla ennustetaan puuston tukki-%:a (Y) keskiläpimitan (X) funktiona. Aineistona on forstien 1975-1995 mittamat metsikkökoealat Juupajoen Hyytiälässä. Malli kertoo, että keskiläpimitan saavuttaessa 12 cm, alkaa puustosta löytyä yksittäisiä tukkirunkoja, ja että maksimissaan tukkiosuus on noin 90 järeissä puustoissa

Til/ka	35	45	55	65	75	85	95	105	115	125	135	145
40	3.6	3.3	3.0									
60	5.0	4.5	4.1									
80	6.3	5.7	5.1	4.7								
100	7.5	6.7	6.0	5.5								
120	8.7	7.7	6.9	6.2	5.7							
140	9.8	8.6	7.7	6.9	6.2							
160	10.8	9.5	8.4	7.5	6.8	6.1						
180	11.8	10.3	9.1	8.1	7.3	6.5						
200	12.8	11.1	9.8	8.7	7.7	6.9	6.2					
220	13.7	11.9	10.4	9.2	8.2	7.3	6.4					
240	14.6	12.6	11.0	9.7	8.6	7.6	6.7	5.9				
260	15.5	13.3	11.6	10.1	8.9	7.8	6.9	6.0	5.3	4.5		
280	16.3	14.0	12.1	10.6	9.3	8.1	7.1	6.2	5.3	4.5	3.8	
300	17.1	14.6	12.6	11.0	9.6	8.3	7.2	6.2	5.3	4.5	3.8	3.1
320	17.9	15.3	13.1	11.4	9.9	8.6	7.4	6.3	5.4	4.5	3.7	2.9
340	18.7	15.9	13.6	11.8	10.1	8.7	7.5	6.4	5.3	4.4	3.6	2.7
360	19.5	16.5	14.1	12.1	10.4	8.9	7.6	6.4	5.3	4.3	3.4	2.6
380		17.0	14.5	12.4	10.6	9.1	7.7	6.4	5.3	4.2	3.3	2.4
400		17.6	14.9	12.7	10.9	9.2	7.7	6.4	5.2	4.1	3.1	2.2
420		18.1	15.4	13.0	11.1	9.3	7.8	6.4	5.1	4.0	2.9	1.9
440		18.7	15.7	13.3	11.2	9.4	7.8	6.4	5.0	3.8	2.7	1.7
460		19.2	16.1	13.6	11.4	9.5	7.8	6.3	4.9	3.7	2.5	1.4
480			16.5	13.8	11.6	9.6	7.8	6.2	4.8	3.5	2.3	1.1
500			16.8	14.1	11.7	9.6	7.8	6.2	4.7	3.3	2.0	0.8

Kuva 154. Samasta kuusikkökoealojen datasta laskettu kasvumalli. Puuston ikä esitetään sarakkeissa ja runkotilavuus riveillä. 300 m³/ha 75-vuotias kuusikko kasvaa 9.6 m³/ha/a mallin mukaan. Koska aineisto oli suppea, ei malli ole kovin luotettava, erityisesti vanhoissa puustoissa.

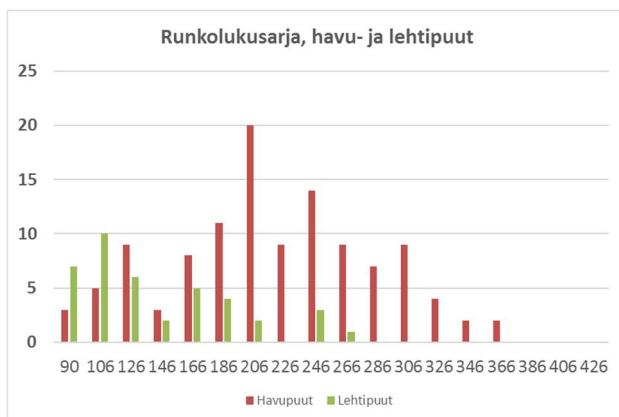
Lisäesimerkki puustotunnusten määrittämisestä puutunnuksin eli vaihtoehto a)

Kesällä 2017 mitattiin Hyytiälässä opiskelijavoimin suurkoeala "Texas", joka oli jaettu kahteentoista 3160 m² ruutuun, tai, suorakaidekoealaan. Yksi niistä oli Texas_02. Koealan puut (latvat) oli paikannettu ilmalaserkeilausaineistosta pois lukien pienet puut, jotka paikannettiin maastossa käyttäen jo paikannettuja puita tukipisteinä.



Kuva 155. Koealan Texas_02 puustokartta. Kasvupaikka oli soistunutta puolukka/mustikkatyypin kangasta / kangaskorpea. Koealan pohjoispäässä oli harventamaton soistunut laikku, joka kasvoi tiheää hieskoivikkoa ja kuusta sekapuuna. Muuten koeala oli kuusivaltainen. Koordinaatisto on vanha KJ-2, ja luvut ovat metrejä.

Saatuun aikaiseksi puukartan, jossa jokaisella puulla on oma numeronsa, mittausrayhmä luki kaikista puista (lpm yli 65 mm) puulajin, d13 ja runkolajin.



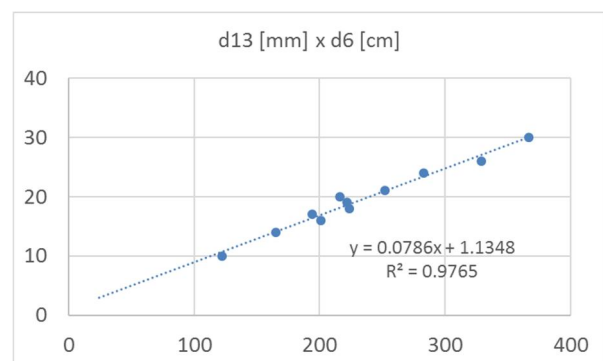
Kuva 156. Puidenlukutiedoista saattoi piirtää elävien puiden (151 kpl) runkolukusarjat 20 mm luokissa. Kuvaaja paljastaa, kuinka hieskoivut ovat pienempiä kuin havupuut.



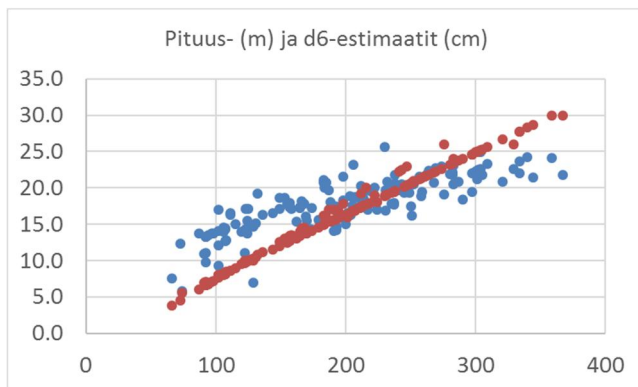
Kuva 157. Puiden paikantaminen bussolilla käynnissä koealan pohjoislaidalla, jossa puusto oli tiheää ja pienempää, ja kasvupaikka kangas-mustikkakorpea.

Runkolukusarjasta (Kuva 156) näkee, että koealalla on sekä tukki- että kuiturunkoja, puiden koon puolesta, jos ajatellaan, että puusta saa tukin, kun läpimitta ylittää n. 18 cm (vrt. Kuva 124 ja Kuva 125).

Seuraavassa vaiheessa valittiin koepuita, joista tulitisiin mitaamaan d6 ja h, eli koepuutunnukset. Muuttujien d6 ja d13 välinen relaatio oli lineaarinen ja voimakas (Kuva 158). Saadun suoran avulla estimoitii d6 kaikille puille. Koska puut oli mitattu laserkeilauksella (poikkeuksellista, yleensä pituuksista ei ole tietoa), oli suurille puille pituusarviot olemassa. Ne olivat lieviä aliarvioita koepuuaineistossa. Niinpä puiden pituudet saatiin joko maastomittauksena, laserkeilauksesta pienellä harhakorjauksella, tai pituusmallilta, joka laadittiin maastomittauksista (Kuva 159).

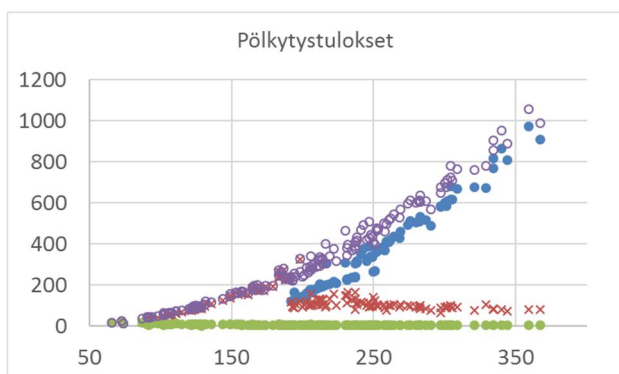


Kuva 158. d6 havukoepuita mitattiin vain 11 kpl, mutta riippuvuus oli vahva ja suoraviivainen rinnankorkeusläpimitan ja kuuden metrin läpimitan kesken.



Kuva 159. Puiden d13 (mm), d6 (cm) ja h-estimaatit (m). Koska pituuksia oli mitattu paljon laserkeilauksella, eivät havainnot noudata puulajikohtaisia käyriä, kuten d6 tapauksessa, jossa erottuvat koivun ja kuusen mallit "pistesuorina".

Kun jokaisella puulla oli joko maastossa tai kaukokartoituksella mitattu tai mallinnettu arvo muuttujille puulaji, d13, d6 ja h, voitiin tiedot syöttää pölkytysalgoritmiin, joka runkokäyriä ja sallittuja puutavaralajien mittoja käyttäen pölkkytti runkot (Kuva 160).



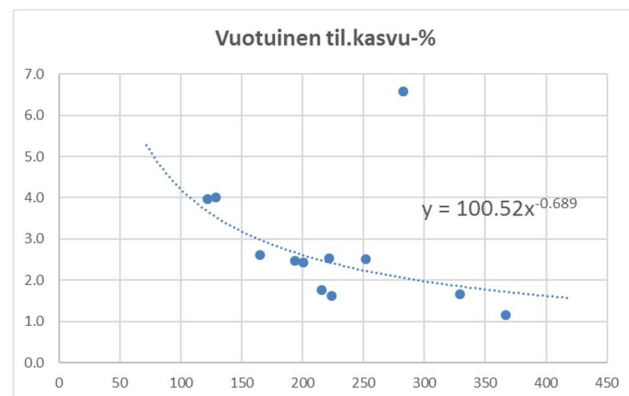
Kuva 160. Puiden pölkkytystulokset. X-akselilla on läpimitta (mm) ja y-akselilla (kokonais, tukkiosan, kuituosa, hukkaosan) tilavuus litroina. Kuvaaja paljastaa, että läpimittaan 25 cm asti esiintyy yhden tukin runkoja. Suurimmat kuuset olivat 1 m³ puita – siihen tarvittiin 37 cm läpimitta ja 25 m pituus.

Koko puuston tilavuus oli 50.7 m³ koealalla eli 10000/3160 kertaisena 157 m³/ha. 3160 m² on koealan pinta-ala, kun 10000 m² on hehtaarin pinta-ala. Puustoa oli harvennettu ja kasvupaikka oli soistunut, joten tilavuus 157 m³/ha vaikuttaa järkevältä. Tukkipuuta oli koealalla yhteensä 33 m³ eli 104 m³/ha (67%). Kuitupuuta puolestaan oli 16.6 m³ eli 52 m³/ha. Puuston arvo oli noin 5800€, kun arvo laskettiin ajankohdan hinnoilla, noin 46 €/m³ ja 16€/m³, tukki- ja kuitupu.

Pohjapinta-alalla punnitut keskitunnukset olivat (Dg) 24.9 cm ja (Hg) 19.7 m. Valtapituudeksi saatiin 22 m. Valtapituus oli 32 paksuimman puun keskipituus, koska koealan pinta-ala oli 31.6 aaria.

Puiden kasvua arvioitiin mittaamalla koeuista pituuskasvu viimeisen 5 vuoden aikana sekä kairaamalla vuosilustonäyte, josta mitattiin kuoreton läpimitan kasvu samalta ajanjaksolta. Otaksuen, että kuoren suhteellinen osuus läpimitasta ei ole

muuttunut, voitiin laskea koeuiden läpimitta 5 vuotta aiemmin. Vähentämällä pituudesta pituuskasvu, saatiin vastavasti pituus 5 vuotta aiemmin. Näin pystyttiin laskemaan koeuiden tilavuudet molempina ajankohtina ja laskemaan vuotuinen tilavuuskasvu-% koeuille sekä sovittamaan siihen malli (Kuva 161).



Kuva 161. Kasvukoeuista laskettu muuttujien d13 ja tilavuuskasvuprosentti välinen riippuvuus. Koeuiksi oli osunut yksi tienlaidan hyvin kasvanut metsäkuusi. Kun jokaisen lukupuun tilavuus kerrottiin käyrän antamalla kasvuprosentilla saatiin tilavuuskasvuksi koealalla 23 m³/ha/5v eli 4.6 m³/ha/a eli puuston kasvu on noin 2.5%. Puuston arvokasvu on tn. hieman tätä suurempaa, koska puissa tapahtuu siirtymää kuitupuusta tukkipuiksi. Toisaalta, koealalla oli paljon kuolleita ja kuolevia puita, eli luonnonpoistuma vähentää nettokasvua.

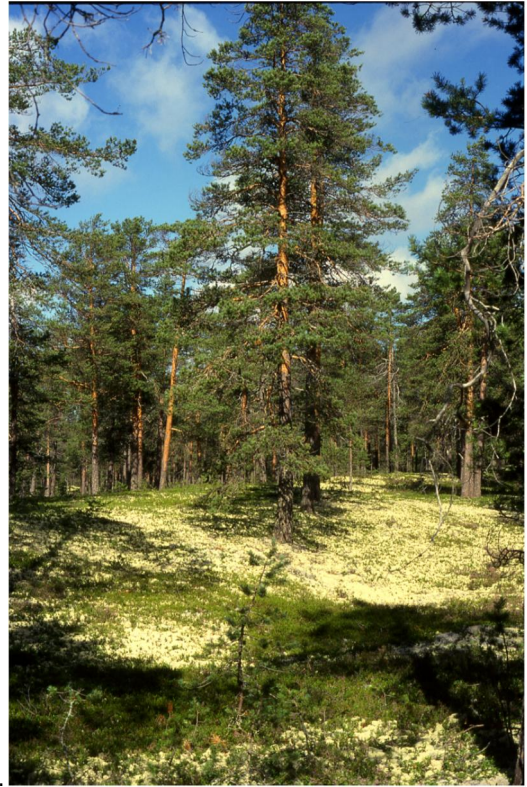
Huomioitavaa oli, että koealan nuorin koeuu oli 51-vuotias, kun vanhin kairattu kangaskorven valtapuu (kuusi) oli 175-vuotias. Ikävaihtelun selittää luonnontilaisen karun korven hidas kasvu sekä se, että soistunut kuvion osa on todennäköisesti jätetty uudistamatta huonojen korjuuolosuhteiden takia.

Kasvupaikan kuvaus ja boniteetti

Kasvupaikan kuvaus liittyy usein puuston kehityksen ennustamiseen (kasvupaikan puuntuotoskyky) tai metsänhoidollisen toimenpiteen arviointiin (luontainen uudistuminen, taimikon kehittyminen jne.). Kasvupaikalla tarkoitetaan laajassa mielessä pienalueen topografiaa, maaperää ja pintakasvillisuutta. Kasvupaikkatyyppejä ovat mm. vuorenaluslehto, jäkäläkangas, lyhytkorsineva tai kalkkikallio. Kuvausta voi täsmentää arvioimalla kivisyyttä (onko puilla tilaa kasvaa), kallioisuutta (humuksen tai kivennäismaakerroksen paksuus kallion päällä), rinteiden kaltevuutta ja suuntaa (ekspositio), maalajia (lajittunut, moreeni, päälajite), humuksen paksuutta jne. Kasvupaikka voi ominaisuuksiensa takia olla harvinainen ja suojeltava.



Kuva 162. Tummarauniainen kielii 'paremmasta' (kalkki) kivilajista, kun taas ##### on lähteisyyden indikaattori.



Kuva 163. Jäkäläkangasta Hailuodossa.



Kuva 164. Maalaji ja humuskerroksen ominaisuudet selvitetään lapion avulla. Hietamoreenia.

Suomessa metsää kasvaa lähes kaikissa olosuhteissa. Poikkeuksen muodostava märät ja karut avosuot, pohjoisen puurajan taakse jäävät alueet, kivirakat, rantavyöhykkeet ja laajat avokallioalueet, jotka nekin yleensä metsittyvät ajan kanssa.

Kasvupaikka ei ole pysyvä ominaisuus. Metsäojitus ja -lannoitus sekä maanmuokkaustoimenpiteet pyrkivät "parantamaan" kasvupaikkaa (ehdollinen kasvupaikan puuntuotoskyky). Luonnontilaiset suot muuttuvat "turvekankaiksi" ojituksen seurauksena, kulotettu taimikko on lämpimämpi kuin kullottamaton, mätästys luo taimille parempia "minikasvupaikkoja", ja ojitetun suon ennallistaminen saa aikaiseksi soistumisprosessin, jolla pyritään palauttamaan ojitusta edeltänyt tila.

Tärkeitä kasvupaikkaa kuvaavia ominaisuuksia ovat lisäksi kasvukauden (ilmasto) lämpöoloja kuvaavat **lämpösumma** ja kasvukauden pituus. Lämpösummaa kertyy, kun vrk:n keskilämpötila ylittää 5 astetta. Jos lämpötilat viitenä kevään päivänä ovat 6, 10, 12, 10 ja 7 astetta, kertyy lämpösummaa $1+5+7+5+2 = 19$ dd-yksikköä. Etelässä lämpösumma voi olla 1300 dd ja kasvukauden pituus 200 vrk, kun taas käsivarren Lapissa jäädään 500 dd ja 125 vrk:een. Sääolot vaihtelevat, ja tästä syystä mm. puiden paksuuskasvussa näkyy vuosittaisia poikkeamia.

Suomessa on hyvä tuntee

- Metsätalouden metsätyypit (kangasmaille) lisämääreineen (kivisyys, maalaji, soistuneisuus).
- Metsätalouden suo- ja turvekangastyypit (suppeampi luokitus verrattuna biologisiin ja kasvitieteellisiin luokituksiin)
- Pituusbonitointi. Tasaikäisessä metsässä voidaan puulajiin, valtapituuteen ja ikään perustuen määrittää puuntuotoskyky H100 tai H50-arvona, joka vastaa valtapituutta referenssiällä 100 tai 50 vuotta. Esim. käen-kääli-mustikkatyyppin (OMT) kuusikon H100 on noin 27 metriä, Etelä-Suomessa. Menetelmää ei voi käyttää, jos puustoa on harvennettu kaatamalla valtapuita. Ruotsissa on käytössä myös ns. välikasvumenetelmä, jossa tartapuiden kasvunopeutta. Tämä soveltuu nuoriin puustoihin.

Metsä- ja suotyypit perustuvat kasviyhdyksuntiin eli pintakasvillisuuden lajeihin ja niiden runsaussuhteisiin. Luokiteltaessa on huomioitava puuston kehitysvaihe (sukessio), sillä taimikkovaiheen lajisto poikkeaa sulkeutuneen puuston alla vallitsevasta lajistosta. Kangasmaiden metsätyypeille on joukko opaskasveja, jotka esiintyvät tiettyä boniteettia paremmilla kasvupaikoilla, mutta eivät tätä huonommilla. Metsätyyppien kasviyhdyksuntien kuvaus on yli 100 vuotta vanha, ja maankäytön muutosten (laidunnus, metsikkötalousjärjestelmän käyttöönotto, maanmuokkaus, ojitus) takia yleisten metsäkasvien runsaussuhteet ovat muuttuneet, mistä aiheutuu tiettyä päänvaivaa metsätyypittäjälle. Esimerkkinä olkoon mustikkatyyppi (MT). Sen opaskasvit metsämansikka, metsäkurjenpolvi ja metsäimarre ovat harvinaistuneet ja mustikkatyyppi tunnistetaan esim. metsälauhan runsaudesta tai vadelman esiintymisestä – sääntöjä, joita ei ollut alkupe-
räisessä metsätyyppiteoriassa. ”Hyvin ojitetuilla” soilla (turvekankailla) kasvillisuus muuttuu ja muistuttaa kangasmaiden kasviyhdyksuntia. Luonnontilaisilla soilla luokittaja kiinnittää huomiota puulajin, mätäs-painanne vaihteluun, rämevarpujen esiintymiseen, sekä saroihin ja suosammaleihin, jotka kukin kertovat kasvupaikan eko-hydrologiasta ja määräävät suotyyppejä.



Kuva 165. Soilla kasvava villapääluikka kielii märkyydestä (painennevälipintalaji) ja kohtalaisesta ravinteisuudesta (meso-eutrofi). Sitä tapaa ruohoisilla nevoilla ja avoimilla letoilla.

FAO:n määritelmä metsälle:

According to the FAO, forest is defined as

“land with tree crown cover (or equivalent stocking level) of more than 10 percent and an area of more than 0.5 hectares (ha).

The trees should be able to reach a minimum height of 5 meters (m) at maturity in situ.

May consist either of closed forest formations where trees of various storey and undergrowth cover a high proportion of the ground or open forest formations with a continuous vegetation cover in which tree crown cover exceeds 10 percent.

Young natural stands and all plantations established for forestry purposes which have yet to reach a crown density of 10 percent or tree height of 5 m are included under forest,

as are areas normally forming part of the forest area which are temporarily unstocked as a result of human intervention or natural causes but which are expected to revert to forest.”

Metsätalouden maa jaetaan Suomessa kolmeen luokkaan puuntuotoskyvyn eli boniteetin perusteella. Siinä ajatellaan kasvupaikalle puusto, jota kasvatetaan kiertoaika, jonka kuluessa keskimääräinen runkopuun tuotos (boniteetti) on 0-0.1, 0.1-1 tai yli 1 m³/ha/a (kuutiometriä hehtaarilla vuotta kohden). Luokat ovat joutomaa, kitumaa ja metsämaa. Lisäksi määritellään muu metsätalouden maa, johon kuuluvat mm. varastot ja metsätiet. Metsätalousmaahan kuuluu siis metsämaa, kitumaa, joutomaa ja muu metsätalouden maa. Aiemmin, kun metsän tuottoa verotettiin pinta-alaperusteisesti, verottaja luokitti kaiken maan näihin luokkiin, ja metsämaan vielä neljään alaluokkaan I, II, III ja IV. Verotus perustui tähän tuotoskykyyn ja paikkakunnalla vallitsevaan puutavarankysyntään ja hintoihin. Joutomaata ovat avosuot (nevat ja avoletot) ja kalliot, joilla kasvaa vain kituvia yksittäisiä puita. Kitumaata ovat karut rämeet (mm. rahkaräme, tupasvilläräme, kallioset metsät) ja metsämaalle on tyypillistä se, että puusto saavuttaa lopulta vähintään 15-17 m valtapituuden. Ravinteisia jouto- ja kitumaan soita on muutettu paljolti metsämaaksi ojituksen (metsänparannus) keinoin. Jäljelle jääneet on suojeltu. Etelä-Suomen boniteetiltaan parhaat

metsämaat tuottavat noin 7-8 m³/ha/a (keskikasvua) korkeimpaan metsänkasvuun johtavaa kiertoaikaa käytettäessä. Vertailuksi voidaan todeta, että puuston vuotoinen kasvu on viime vuosina ollut Suomessa noin 5 m³/ha/a.



Kuva 166. Juupajoen Hyytiälän Muistokuusikko on vuodesta 1932 tuottanut runkokuuta yli 600 m³ eli 7 m³/ha/a. Kasvupaikka on OMT, ekspositio lounaaseen viettävässä rinteessä. Synty tapa istutus. Maalaji hietamoreeni.

Kasvupaikat voidaan kuvata myös suppeammalla luokituksella: Kangas, korpi, räme, neva, letto.

Soista voidaan mm. todeta ovatko ne luonnontilaisia, ojikoita, muuttumia vai turvekankaita.

Metsäalueen tunnuks

Metsälöä, joka koostuu tyypillisesti useista metsiköistä voi kuvata esim. jakaumin, keskitunnuksin, kartoin jne.

Esim. pinta-alan jakautuminen

- Kasvupaikkaluokkiin
- Ikäluokkiin, kehitysluokkiin
- Maaluokkiin (Metsätalousmaa, maatalouden maa, rakennettu maa, liikenteen ja voimalinjojen maa, sisävesi ja merivesi)

Esim. puuston jakautuminen

- järeysluokkiin puulajeittain

Esim. kasvua ja boniteettia koskien

- puuston tämänhetkinen keskikasvu, m³/ha/a
- kuvioiden boniteetin keskiarvo, m³/ha/a

Kartat laaditaan sen mukaan, onko metsätieto kerätty kuvioittain vai kenties systemaattisella koealaverkolla.

Inventointimenetelmät

Monisteen alkuosan esimerkeissä käsiteltiin metsän inventointia. Inventointimenetelmät voidaan karkeasti jakaa sen mukaan, halutaan tietoa paikallistaa alueen sisälle (esim. kuvioittainen arviointi tai hilaan tuotettu laserkeilausinventointi), vai ollaanko kiinnostuneita yksinomaan alueen kokonaistuloksista.

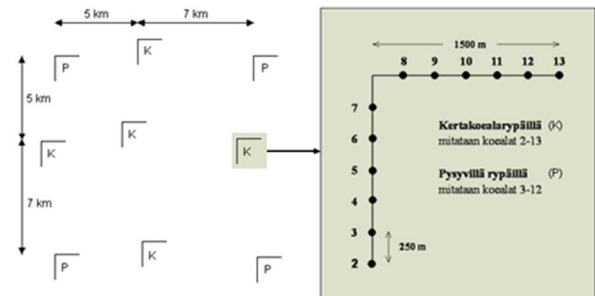
Suomen VMI, Valtakunnan metsien inventointi

VMI on inventointisovellus (Suomessa), jossa koko maahan on sijoitettu koealaverkko, ja tuloksia voidaan laskea (paikallistaa) ainakin maakuntatasolle. Yksittäisiin kuntiin ei aina välttämättä sijoitu riittävän suurta koealamäärää, jotta tulokset olisivat riittävän luotettavat yleisölle ja päättäjille esitettäväksi.

VMI on esimerkki inventoinnista, joka nojaa yksinomaan maastokoealoihin, vaikka tuloksia yleistetäänkin satelliittikuvien ja kuvatulkintamallien avulla välialueille, joista koealatieta ei ole. VMI:ssä koko maan kattaa systemaattinen koealojen verkko, jossa kukin koeala sijaitsee lisäksi rypäessä. Yhdessä rypäessä on sellainen lukumäärä koealoja, jonka mittausryhmä pystyy hoitamaan yhden päivän aikana, mikä vähentää siirtymisten määrää eli kustannuksia. VMI:n ryvä on L-kirjaimen muotoinen, eli koealat sijaitsevat määrävälein kahdella linjalla. Koealojen välillä on riittävä etäisyys, jotta ne eivät "mittaisi samaa metsää", vaan olisivat riippumattomia havaintoja – eri metsikössä – kenties eri maanomistajankin maalla. Ilman ryvästystä koealoja olisi tasaisesti, jolloin kulumatkat koealta toiselle muodostuisivat suuriksi, mistä inventoinnin tehokkuus kärsisi. Osa VMI-koealoista on pysyviä. Pysyvien koealojen avulla saadaan paremmin selville metsässä tapahtuvat muutokset ja niiden syyt. Pysyvä koeala mitataan aina uudelleen ja pidetään salassa maanomistajalta. Jos rypäitä on 6 x 6 km hilassa ja kussakin on 13 koealaa,

saadaan 20 miljoonalle metsätalousmaan hehtaarille koealamääräksi 72000 koealaa ja 5500 ryvästä eli mittaryhmän maastotyöpäivää. Kaikkia rypäitä ei kuitenkaan mitata jokaisena kesänä. VMI tarjoaa poikkeuksellisen otanta-kehikon, kun tutkitaan suomalaista metsäluontoa. VMI:n yhteydessä onkin tehty monenlaisia lisäselvityksiä.

VMI:ssä sovelletaan **systemaattista ryväotantaa**.



Kuva 167. VMI:n otanta-asetelma, systemaattisesti sijoitetut rypäät ja rypäällä sijaitsevat maastokoealat.

VMI:n tulokset 1964-2003 (VMI 5- VMI 9) kertovat mm., että puuston kasvu on noussut arvosta 2.9 m³/ha/a tasolle 4.2 m³/ha/a. Puuston keskitilavuus on lisääntynyt ollen 77 m³/ha VMI5:ssä ja 107 m³/ha VMI10:ssä. Puustoisin metsäkeskus oli Rannikko (Etelärannikko), jossa keskitilavuus oli 168 m³/ha, kun metsämaan keskitilavuus Lapin metsäkeskuksen alueella oli vain 66 m³/ha (VMI 10, 2004-2008). Nä-mä luvut on saatu metsämaan koealojen keskiarvoina.

Lukijaa kehoitetaan tutustumaan tuoreimpiin VMI:n tuloksiin LUKE:n sivujen kautta.

Aluepohjainen laserkeilausinventointi

vrt. (1.3.4 Puuston mittaus laserkeilaushavainnoista pala metsää kerrallaan).

Tässä inventointimenetelmässä puustotiedot "paikallistetaan" ja ne tuotetaan kattavasti koko alueelle eli väliin ei jää tyhjiä alueita.

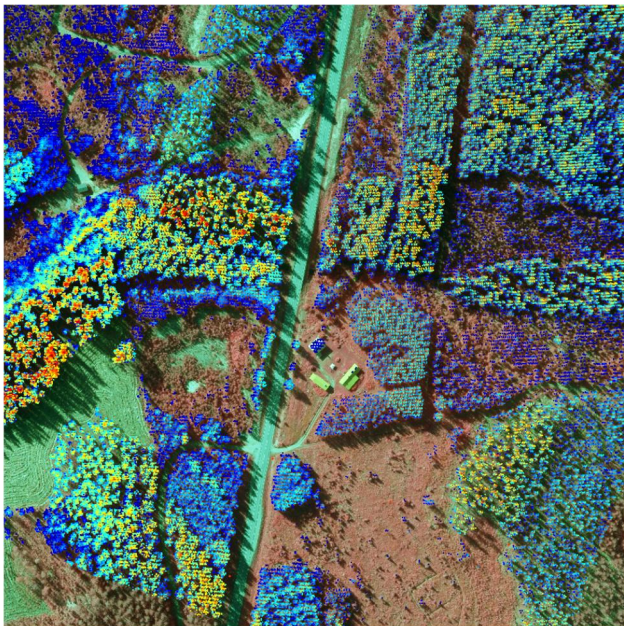
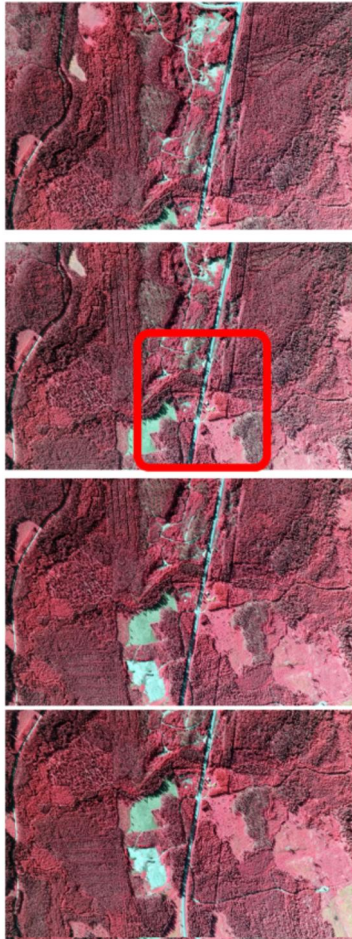
Tietolähteet (havainnot) ovat

- Ilmalaserkeilaus
- Ilmakuvaus
- Paikannettuja maastokoealoja, opetusdataa

Ilmalaserkeilaus maksaa noin 40-50€/km² eli 0.5€/ha, mikäli kerrallaan voidaan keilata suuria alueita (>400 km²). Tällöin keilaus tapahtuu noin 1.5–2 km korkeudelta ja pulsseja osuu 1–2 neliömetrille. Ilmakuvaus maksaa myös noin 0.5 €/ha (3000€/lentotunti), sillä sitä ja laserkeilausta ei yleensä pystytä tekemään samanaikaisesti, koska ilmakuvaus tapahtuu pilvettömän taivaan vallitessa (aurinko yli 30 asteen korkeudella), kun taas laserkeilaus onnistuu yölläkin kunhan pilviä tai usvaa ei ole.

Ilmakuvaus tehdään s.e. sama puu/metsä/hilaruutu näkyy usealla kuvalla, joita saadaan, kun kamera lentää kohteen yli,

ja joskus viereiseltä kuvauslinjaltakin (Kuva 168). Ilmakuvat orientoidaan tarkasti, jolloin mikä tahansa XYZ-piste voidaan kuvata tarkasti (löytää sitä vastaava pikseli) ilmakuvalle. Laserkeilausdata on sekin sijaintitarkkuudeltaan hyvää, pisteiden koordinaatit ovat yleensä alle 20 cm oikeasta.



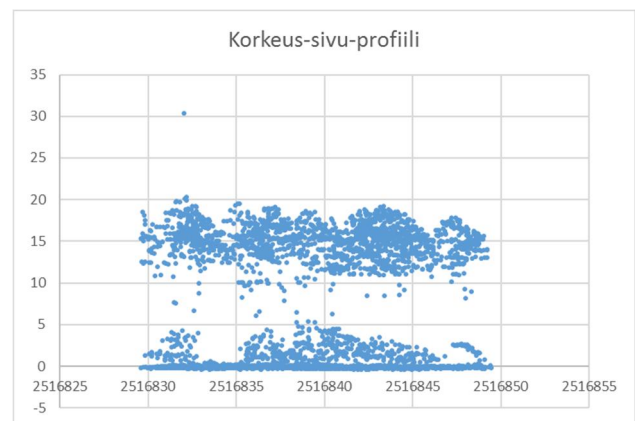
Kuva 168. Ilmakuvajono 80% pituuspeitolla (lentosuunta etelään) sekä suurennos, johon on tulostettu laserkeilauspisteet, joiden korkeus maasta on yli 5 m. Vähä-Aitua, Juupajoki.

Monissa sovelluksissa metsäalue jaetaan ruutuihin, joiden koko on 200-600 m². Näille ruuduille estimoidaan puustotunnukset.



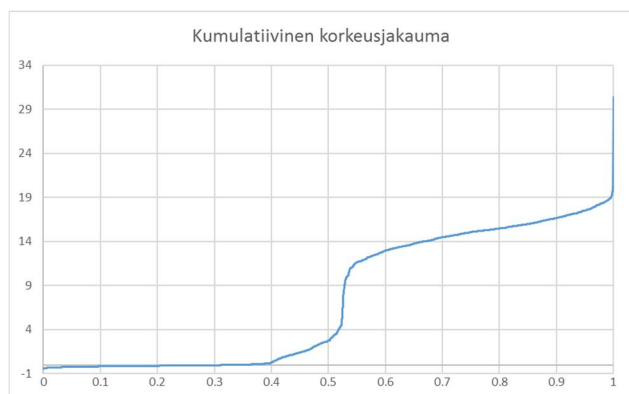
Maastokoealoja mitataan inventoitavalta alueelta, jotta saadaan **opetusaineistoa**, jonka avulla voidaan tutkia, millaiset riippuvuudet vallitsevat metsän ominaisuuksien ja toisaalta laser- ja kuvasignaalien välillä. Kun riippuvuus on muutettu malliksi, voidaan metsän ominaisuudet ennustaa mihin tahansa ruutuun metsäalueella (imputation, koealatietojen yleistys). Tämä on yleinen lähestymistapa kaukokartoitusta sovellettaessa.

Kaukokartoituspiireiden irrotus. Ruudun (esim. 20 x 20 m) alueelta kerätään kaikki **laserkaiut (pisteet)**. Näitä voi olla satoja tai tuhansia, riippuen laserkeilauksen pulssitiheydestä, joka on tyypillisesti vähintään 0.5 pulssia neliömetrille (5000 hehtaarille). Teknisesti tämä toteutetaan lukemalla spatiaalisesti sortteerattua pistetiedostoa. Jokaiselle ruutuun kuuluvalla pisteelle saadaan korkeus, vertaamalla pisteen xy-sijainnissa pisteen z-koordinaattia maanpinnan korkeusmallin (omassa tiedostossaan) antamaan maanpinnan z-arvoon. Esim. $z = 150.5$ ja $z_{\text{maa}} = 145.5$ kertoo, että piste on noin 5.0 m maanpinnan yläpuolella. Näin tehdään kaikille pisteille ja saadaan pisteiden korkeusjakauma, jonka korkein havainto kertoo puuston valtapituudesta (tai kohteen yllä lentäneestä linnusta). Maahan asti yltäneiden pulslien osuus kertoo latvuston tiheydestä. Korkeimpien pisteiden voidaan katsoa kuvaavan latvusten yläosien geometriaa.

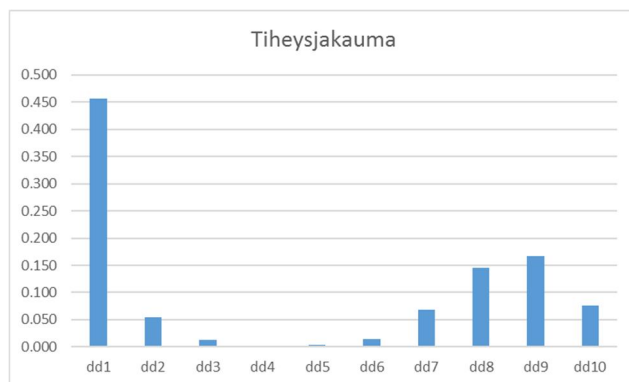


Kuva 169. Pistepilvi eräässä rämemännikössä. Maastoruudun pisteet esitetään kuvassa kuin niitä katseltaisiin XZ-tasossa. Laserpisteitä on

tullut runsaasti 15-20 metristen mäntyjen lqtvoista. Osassa ruutua on alikasvosta. Yksittäinen kaiku 30 metrin korkeudelta on todennäköisesti lintu.



Kuva 170. Saman ruudun pisteiden kumulatiivinen korkeusjakauma. Kuvasta voi lukea mm. että maahan on tullut 40% pulsseista, korkeusvälillä 1..9 metriä on noin 12% pisteistä (0.52-0.4), kun taas korkeusvälillä 14..19 m on 40% pisteistä. Pisteitä on hyvin vähän välillä 4..12 m, jossa kumulatiivinen käyrä kulkee pystysuoraan. Sama näkyi sivuprofiilista (Kuva 169).



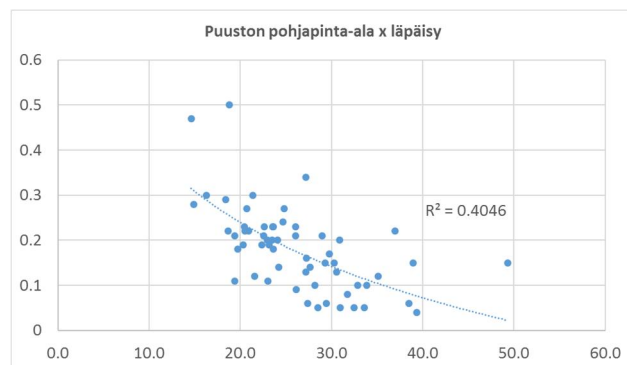
Kuva 171. Saman koealan tiheyspiirteitä. Koealan maksimikorkeus (lintuosuma poistaen) on noin 19 m. Korkeusväli voidaan jakaa tasaisesti kymmeneen osaan, joista alin dd1 on 0-1.9 m ja korkein dd10 on 17.1-19 m. dd# piirteet kertovat, mikä osuus pisteistä on kullakin korkeusvälillä.



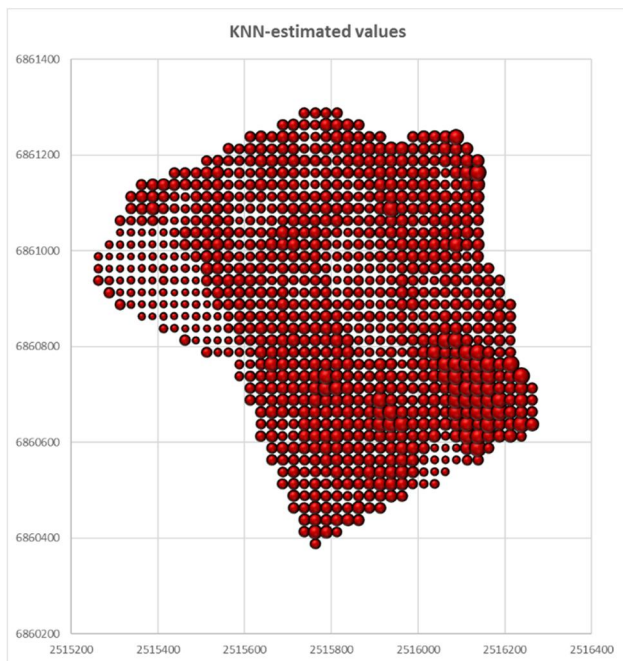
Kuva 172. Valokuva Hyytiälän vuorijärvensuolta vuonna 2009. Alikasvoksen muodostaa hieskoivu.

Korkealle osuneet pisteet voidaan projisoida ilmakuville, ja niille voidaan hakea ilmakuvan sävyarvot. Ilmakuvan (kameran) tyypistä riippuen saadaan erilaisia pikselihavaintoja (kameran / kuvan kanavat). Voimakas infrapuna-alueen heijastus implikoi yleensä lehtipuustoa. Kuvalta voidaan myös laskea 20 x 20 m alueelta erilaisia tekstuuripiirteitä, jotka kertovat kuvan rakenteesta, latvusten koosta, ryhmittäisyydestä tai lukumäärästä. Ilmakuvien käyttöä rajoittaa se, että kuville näkyvät vain pää- ja lisävaltapuut, ja sama kohde "näyttää melko erilaiselta" riippuen, kuinka kaukana kuvan keskipisteestä ollaan, ja mistä suunnasta kohdetta kamera katsoo suhteessa aurinkoon. Laserkeilain sen sijaan näkee jonkin verran latvuston sisään ja läpi ja antaa informaatiota puuston/latvuston korkeusjakaumasta. Kaukokartoitushavainnoista saadaan laser- ja kuvamuutuja, joiden toivotaan korreloivan metsän todellisten (halutujen) ominaisuuksien kanssa.

Maastokoealat ja tunnusten estimointi ruuduille. Maastokoealoja mitataan edustavasti, sillä yleisesti estimaatit, joita ruuduille lasketaan, riippuvat siitä vaihtelusta, jota maastokoealat edustavat. Jos maastokoealaksi ei osu yhtään tervaleppämetsikköä, ei estimointikaan todennäköisesti sellaista millekään ruudulle ennusta. Yleinen estimointitekniikka on lähimmän naapurin menetelmä ja sen variantit (myös regressiomalleja voi soveltaa). Kaikille maastokoealoille lasketaan myös laser- ja kuvapiirteet, eli selittävät X-muuttujat. Selitettäviä tai ennustettavia Y-muuttujia ovat puustotunnukset kuten tilavuus, keskiläpimitta jne., ja ne on myös laskettu maastokoealoille. Jos tiedetään (maastokoealojen avulla tehdystä korrelaatioanalyysistä, Kuva 173), että maahan asti päässeiden laserpulssien osuus sekä laserpisteiden korkeusjakauman yläkvartiili selittävät puuston tilavuutta, voidaan näitä X-muuttujia (ja muita vastaavia) käyttäen laskea aina kullekin ruudulle (jolle halutaan tietää tilavuus) tilavuusestimaatti. Lähimmän naapurin menetelmässä etsitään X-muuttujien avaruudessa (kahdella kuva- ja lasermuuttujalla kaksiulotteinen) ruutua vastaava (lähellä oleva) opetusaineiston koeala. Läheisyys tarkoittaa sitä, että ruudun ja maastokoealan laser- ja kuvapiirteet vastaavat toisiaan. Läheisyys ei tarkoita maantieteellistä etäisyyttä.



Kuva 173. Opetusaineistossa laserpulssien läpäisyn (osuus pulsseista, jota pääsee mahan asti) ja koealan puuston pohjapinta-alan (m²/ha) välinen riippuvuus 59 koealan aineistossa.



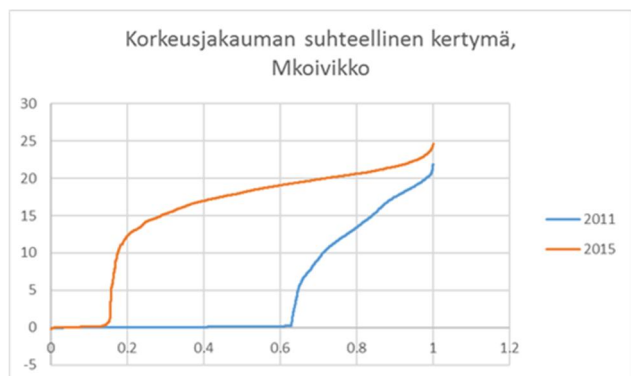
Kuva 174. Eri puustomuuttujista saadaan jokaiselle ruudulle estimaatti. Tässä keskipituuden Hg kartta 57 hehtaarin metsälössä.

Aluepohjaisen menetelmän hyviä puolia ovat:

- Latvuston tiheydestä ja sulkeutuneisuudesta ja niiden vaihtelusta metsikön sisällä saadaan selkeä kuva.
- Puuston valta- ja keskipituuden vaihtelu tulevat esitoiduiksi luotettavasti ja kartat ovat tarkkoja.
- Maanpinnan korkeusvaihtelu, mikäli korkeusmallin estimointiin on tarve (sitä ei vielä ole), saadaan luotettavasti.

Aluepohjaisen menetelmän heikkouksia ovat.

- Puuston puulajisuhteiden arvio ovat melko epätarkkoja.
- Puuston kokojakauman estimointi on epätarkkaa (runkojen läpimittajakauman muoto).



Kuva 175. Havainnollistava esimerkki siitä, kuinka sama kohde näyttää niin kuvissa kuin laserkeilausaineistossa erilaiselta johtuen vuodesta. Hyytiälän Muistokoivikko on pienialainen kuvio, joka kuvattiin ja keilaattiin marraskuussa 2011 ja uudelleen elokuussa 2015 samoilla instrumenteilla, samasta lentokorkeudesta.

Kuvioittainen arviointi

Eräässä mielessä tässä menetelmässä sovelletaan ositettua otantaa, koska ennen maastotöitä metsäalue jaetaan pien-alueisiin, kuvioihin, yleensä karttojen, ilmakuvien, laserkeilausaineistojen ja vanhojen metsävaratietojen avulla. Kartalta saadaan tieto turvemaista, jotka voidaan rajata omiksi ennakkokuvioiksi. Ilmakuvaa ja laserpistepilveä tulkitsemalla voidaan muodostaa puustotunnusiltaan yhtenäisiä ennakkokuvioita. Maastossa rajat tarkastetaan, niitä korjailaan, ja kuvioille hankitaan tarvittavat puusto- ja kasvupaikkatiedot. Yleensä ei käytetä systemaattista otantaa, koska koealaverkon perustaminen kuhunkin kuvioon veisi liikaa aikaa. Sen sijaan tyydytään subjektiiviseen otantaan. Maastomittaja päättää itse mistä osista kuviota hän mittaa koealoja, joiden keskiarvona kuviotunnukset saadaan.



Jos koealan puusto ja kasvupaikkatunnukset ovat tasaiset (vaihtelu on vähäistä), tarvitaan vähemmän havaintoja. Mittaaja käyttääkin paljon harkintaa. Tulosten tarkkuudesta ei pystytä sanomaan varmaa, sillä otosyksiköiden sijoittelu ei ole satunnaista. Mittaaja on saattanut vältellä tiheää tai vaikeakulkuista metsää, jolloin tulokset eivät päde. Mittaaja saattaa myös tyytyä silmävaraiseen, kokemusperäiseen mittaukseen / arviointiin, jolloin systemaattiset virheet ovat mahdollisia. Puustotunnukset voidaan mitata yksittäisten puiden ja puumallien avulla, tai, suoraan puustotunnusmalleilla (keskipuumenetelmä).

Täysluku

Kun tulosten tarkkuus on ratkaisevassa asemassa, voidaan mittauksiin käyttää paljonkin resursseja. Näin voi olla esim. perinnönjaon yhteydessä. Täysluvussa kaikki puut luetaan ja alueelta mitataan paljon pituus- ja d6-koepuita, tai, tunnukset mitataan kaikista puista.

Systemaattinen koeala-arviointi

Edellä esitelty VMI soveltaa ryvästettyä systemaattista otantaa. Jos koealat sijoitetaan linjoille (hilaan) puhutaan systemaattisesta koeala-arvioinnista. Linja- ja koealaväli voivat olla esim. 100 m ja 50 m. Tällöin yksi koeala edustaa 0.5 hehtaaria. Pienempi koealaväli säästää kävelyä, mutta väliä pienennettäessä otetaan riski, sillä lähekkäin toisiaan olevat koealat eivät tuo samaa lisäarvoa spatiaalisen autokorrelaation takia.

Otannassa voi soveltaa ositusta. Koealaverkko voi olla alkuvaiheessa tiheä, esim. 25 x 25 m, mutta verkon lopullinen tiheys määräytyy esim. osa-alueittain. Esim., jos jokin osa aluetta on puustoisempi kuin toinen, ja puuston määrä halutaan saada selville tarkasti, voidaan alue jakaa ositteisiin,

joissa toisessa linja- ja koealaväli on 100 x 100 m ja toisessa (puustoisemmassa ositteessa) 100 x 50 m. Lisäksi koealatyyppejä voidaan vaihtaa sen mukaan, millaisesta puustosta on kyse. Pienille puille voidaan virittää pienet koealat ja suurille puille isommat.

Jos alueella on N koealaa, ja koealojen tuloksista laskettu muuttujan keskihajonta on s, on 68% luottamusväli lasketavissa kaavalla $s/\sqrt{N}$, kuten satunnaisotannassa. Systemaattinen otanta on kuitenkin tehokkaampaa kuin satunnaisotanta, ja kaavalla saatu luottamusväli on yliarvio, kun sitä sovelletaan systemaattisessa otannassa. Muuta kaavaa ei ole.

Metsäsuunnittelu

Metsää koskeva päätöksenteko on vakaammalla pohjalla, jos päätöksentekijällä on tiedossaan metsän historia, nykytila ja tieto siitä, millaiseksi eri vaihtoehtoja toteutettaessa metsä muuttuu ajan myötä, jotta vaihtoehtojen väliltä osataan valita oikein ja perustellusti. Metsäsuunnittelu on tätä. Siin käytettävät työkalut kehittyvät koko ajan. Niihin kuuluvat metsätiedon keruun menetelmät, metsänomistajan tavoitteiden kartoitus (palvelu), puita ja puustoa kuvaavat staattiset ja dynaamiset mallit sekä laskentamenetelmät, joilla tulevaisuuden vaihtoehtoja tuotetaan ja niiden joukosta etsitään tavoitteet toteuttavia skenaarioita kuten myös erilaiset visuaalisointi- ja interaktiiviset työkalut (metsätietojärjestelmät), joilla päätöksentekoprosessia edistetään (joskus työkalujen yksinkertaistaminen johtaa prosessien yksinkertaistamiseen – valmiiksi pureskeltuihin ratkaisuihin). Pienen yksityisomistuksessa olevan metsälön metsäsuunnittelu poikkeaa Metsähallituksen vastaavasta, koska intressitahoja on jälkimmäisessä enemmän, kuten pinta-alaa ja metsäkäsittelyn vaihtoehtoja, mm.

Suomessa yhteiskunta on perinteisesti kannustanut ja tukenut yksityismetsien metsäsuunnittelua kansantaloudellisin perustein. Tällä on ollut positiivisia seurauksia, mutta myös negatiivisia vaikutuksia ajatellen toiminnan markkinalähtöisyyttä ja innovaatioiden käyttöönottoa. Yksityismetsien omistajarakenne on kuitenkin erittäin haastava, ja yhteiskunnan tuki yhteistoimintaan on tärkeä kannustin (esim. kaukokartoituksen järjestäminen on mielekäästä vain isoille alueilla).

Historia näkyy metsässä ja siitä voi olla kirjanpitolietoa. Valistunut metsänomistaja kirjaa hakkuut ja metsänhoitotyöt, jotta kokemuksista voidaan oppia. Näin on kuitenkin harvoin, sillä historiatiedon mukana pitäminen tietojärjestelmissä ja omistajalta toiselle on haastavaa. Valtakunnan metsien kirjanpitoliedot löytyvät 1920-luvulta lähtien systemaattisesti arvioituina. VMI-tuloksista ja kansallisesta kirjanpidosta nähdään puuston kehitys, puulajisuhteiden kehitys, metsänhoitotöiden määrät, metsäsektorin merkitys kansantaloudessa, jne. VMI-tiedot luovat pohjaa strategiselle suuraluetason metsäsuunnittelulle, jonka varassa mm. tehdään investointipäätöksiä ja ohjataan metsäpolitiikkaa.

Metsälötasolla metsäsuunnittelu on erityisesti hakkuiden ja hoitotoimenpiteiden suunnittelua. Siihen kuuluu myös ties-tön ja ojitusalueiden (investoinnit) kunnossapito ja hoito, tai yhtä lailla, metsäluonnonhoito, riistanhoito ja suojelu. Metsä-suunnittelua voi lähestyä aluksi normaalimetsän käsitteen avulla. Siinä ajatellaan, että metsäalue jakautuu tasaisesti kaikkiin ikäluokkiin. Kiertoaika määräytyy taloudellisesti, esim. siten että puustot uudistetaan, kun (iän myötä laskeva) juokseva nettokasvu ja tuotto jäävät alle 2%. Tällöin omistajalla on koneisto, jossa toimenpiteet seuraavat samanlaisina yli koko kiertoajan. Hakkuut voidaan tehdä esim. kerran kymmenessä vuodessa (harvennukset, uudistaminen), jolloin taimikonhoitotyötkin ajoittuvat samoihin ajankohtiin ja ojitusalueet voidaan kunnostaa vaikka 20 vuoden välein. Tiestöä tarkastellaan aina hakkuiden yhteydessä. 100 hehtaarin metsälön keskikasvu (100 vuoden optimaalinen kiertoaika) voidaan pitää näin menetellen tasaisena esim. tasolla 5 m3/ha/a (tähän tasoon vaikuttavat mm. metsämaiden laatu ja ilmastotekijät), jolloin hakkuukertymät ovat aina 5000 m3/10 v otaksuen, että luonnonpoistumaa ei ole. Koneisto antaa tasaisesti tuloja noin 150000€ joka kymmenes vuosi. Menoja kertyy uudistamisesta ja hoitotoimista sekä investoinneista. Käytännössä metsälöt poikkeavat aina jollakin tavalla, merkittävästikin, normaalimetsästä ja metsänomistajien tavoitteet eivät välttämättä liity tasaisiin maksimaalisiin nettotuloihin. Tästä avautuu metsäsuunnittelun kiehtova maailma, joka eri mittakaavatasoillaan yhdistää niin käyttäytymis- kuin taloustieteet, metsäekologian ja luonnonsuojelun, sekä puuntuotannon ja -korjuun kysymykset. ”Metsäsuunnittelussa ajatellaan” siis monitavoitteista metsänomistajaa, kaupunkimetsän problematiikka, kansantaloutta, metsän kehitystä muuttuvissa olosuhteissa ja toimenpiteiden seurauksena, luonnonarvoja sekä perinteistä metsätaloutta, ym..

Luvussa (1.3.2 Metsätalouden suunnitteluinventointi) oli esimerkki metsäsuunnitelman laatimisesta yksityismetsänomistajalle vuonna 1999.

Metsäsuunnittelu voi perustua jatkuvaan metsävaratiedon keruuseen, joka on mahdollistunut digitaalisten metsätietojärjestelmien käyttöönoton myötä. Paperiset metsäsuunnitelmat (10-vuotis) ovat korvautuneet paikkatietojärjestelmäpohjaisilla ajantasaisuuteen tähtäävillä työkaluilla. Metsätietoa päivitetään aina, kun metsässä tehdään toimenpiteitä. Tällaisessa tilanteessa yhden kuvion mittaustieto voi olla kymmenen vuotta toista vanhempaa, ja kuvion puuston nykytila ennustetaan kasvu-, kuolemis- ja syntymismalleilla. On selvää, että malleilla ennustettaessa ei aina päästä tarkkaan tilannekuvaan, ja toisaalta, jos N vuotta vanhat mittaustiedot ovat heikkolaatuisia, eivät ne yleensä parane malleilla tulevaisuuteen päivitettäessä. Toisaalta, ei ole tavatonta, että metsävaratiedot päivitetään aik’ajoin läpi metsälön suoritettavalla kertainventoinnilla. Mikäli inventointi maksaa esim. 20€/ha, tulee tarkkaa harkittavaksi, kuinka usein sen suorittaminen kannattaa, ja millaisiin metsiin mittausrasurssi ja kulu erityisesti kannattaa sijoittaa. Inventointi on panos, jonka tulisi johtaa tuottoon, jonka hyödyn vieläpä metsänomistajaa saa, eikä esim. puunkorjuun suoritettava taho.

Yksityismetsien metsäsuunnittelussa kuutiomäärät eivät usein olekaan yhtä tärkeitä kuin toimenpidetarpeen arviointi. Missä ja milloin pitää nuoria puustoja hoitaa, tai missä tilalla

ovat yläharvennuskohteet, ovatko aiemmin näin harsitut metsät uudistuneet (jatkuva kasvatus), tai milloin jonkin hakkuukypsän kohteen arvokasvu alkaa pudota alle raja-arvon, esim. se 2% tuotto.

Hyvä metsäsuunnittelujärjestelmä, johon metsävaratieto syötetään, vastaa kysymyksiin:

- Pystynkö hakkaamaan 1000 m3 vuodessa ilman että metsälön (suunnittelualueen) puuston tuottoarvo kymmenen vuoden kuluttua on nykyistä pienempi?

- Jos säästän (mustikka ja puolukka, marjastusmahdollisuudet) kuviot #, # ja #, pystynkö edelleen samaan?

- Jos luovun harvennuksista ja uudistan 5 ha vuosittain, paljonko luonnonpoistuma lisääntyy ja kymmenvuotiskauden nettotulojen nykyarvo muuttuu (verrattuna harvennuksiin), korkokannalla 3%?

- Mitä jos siirryn kokonaan harsintametsätalouteen (jatkuva kasvatus) tai voimakkaisiin harvennuksiin? Miltä metsän kuva näyttää 20 v kuluttua?

- Jos investoin 10000€ lannoitukseen (kunnostusojitukseen) niin mitkä kuviot käsittelemällä saan parhaan tuoton (€), jonka haluan realisoida kolmessa, viidessä tai seitsemässä vuodessa?

- Missä on metsälön laiska pääomat?

- Kuinka luotettavia tulokset ovat? Minkä riskin päätökseni sisältää?

- Miltä metsäni näyttää maisemavisualisoituna eri vaihtoehdoissa?

VMI-aineistosta, joka kattaa tuhansia koealoja koko Suomen alueelta, voidaan kysyä mm.

- Jos paikkakunnalle A sijoitetaan 1 milj. m3 vuodessa männytukkaa sahaava yksikkö, riittääkö sille raaka-ainetta seuraavan 30 vuoden ajan, 50 km, 100 km säteellä?

- Mikä on ollut ojitusalueiden kasvunlisäys, hakkuut ja toisaalta yhteiskunnan tuki metsäojitukseen viim. 50 vuoden aikana. Kuinka kannattava kansantaloudellinen investointi metsänparannustoiminta on ollut?

- Ilmasto-olojen muuttuessa, kuinka korjuukelpoisuus muuttuu Etelä-Suomessa? Toimiiko puuhuolto?

Metsäsuunnittelujärjestelmä pähkinänkuoressa

Metsäsuunnittelujärjestelmässä metsävaratieto esitetään laskentayksiköille. Yleensä se on metsikkökuvio, jolle toisaalta on olemassa karttarajaus (kuviorajat, karttamonikulmio). Laskentayksikkö voi myös olla koeala (esim. VMI-laskelmissa koeala edustaa tiettyä pinta-alaosuutta Suomen metsistä, koealalla on sijainto) tai hilaruutu (aluepohjainen inventointi). Laskentayksiköille ennustetaan tulevaisuus (kasvu, toimenpiteet, poistumatiedot) ja alueelle ennustetut tulokset ovat laskentayksiköiden summa – yleensä jonkinlainen optimoitu summa. Alue voi olla esim. metsälö, joka koostuu

yhdestä tai useammasta saman omistajan kiinteistöstä. Oletetaan seuraavassa, että laskentayksiköt ovat metsikkökuvioita.

Kuviolta kerätään puu- ja/tai puusto-, ja kasvupaikkatietoa. Suomessa on yleistä, että laskentayksikön puusto esitetään puulistana, jossa tietueet ovat muotoa (puulaji, läpimitta, pituus, runkoa/ha). Jos maastossa on kerätty (puumittauksia) tietoa, joka voidaan suoraan muuntaa puulistaksi, ei tarvita puujoukkojen muodostamista mallien avulla. Malleihin turvaudutaan, jos tieto on kerätty keskipuumenetelmällä, jossa siis kutakin puulajia edustaa keskipuu (Dg, Hg) ja pohjapinta-ala. Runkolukusarjamalla ennustetaan puiden jakautuminen läpimittaluokkiin ja pituusmalleilla saadaan jokaiselle puulle pituus, jonka jälkeen voidaan tehdä puulista. On selvää, että jälkimmäisessä menettelyssä annetaan mallivirheiden vaikuttaa tuloksiin (puulistan realistisuuteen). Toisaalta, metsän mittaaminen puustotunnuksin (relaskooppi, keskipuu) on nopeampaa kuin puumittauksin (puidenluku, koepuut).

Kun kuviolle on puulista ja kasvupaikkatiedot, voidaan ”puusto alkaa käsitellä tietojärjestelmässä”. Harvennussimulaattori on melko yksinkertainen toteuttaa. Alaharvennuksessa poistetaan pienempiä läpimittaluokkia, kunnes jokin tiheys on saavutettu, kun taas yläharvennuksessa toimitaan toisin päin. Avohakkuussa poistetaan koko puulista. Puita voi kasvattaa malleilla, jotka lisäävät esim. 5 vuoden kasvun läpimitaan ja pituuteen. Kasvumallit eivät voi huomioida puiden tilajärjestystä (osa puista kasvaa tiheämmässä osassa kuviota, osa harvemmassa), koska tätä tietoa ei ole kerätty, vaan olettavat keskimääräisen tiheyden, annetun kasvupaikan ja sijainnista johdetun ilmaston (kasvukauden pituus esim.). Kasvumalli voi huomioida edellisestä hakkuusta kuluneen ajan (harvennusreaktio kasvussa) tai lannoituksen vaikutuksen. Luonnonpoistumaa voidaan simuloida esim. tilanteessa, jossa puuston tiheys on niin suuri, että puusto on saavuttanut itseharvenemisrajan. Myrskytuhojen ennustaminen on vaikeampaa, mutta esim. maaston korkeusmallin ja kuvioiden puustotietojen ja tilajärjestyksen avulla voidaan ennustaa kuviot, joilla myrskytuho on todennäköisin.

Jokaiselle metsälön kuviolle voidaan ennustaa yksi tai useampi tulevaisuuden skenaario esim. ajankohdille 0, 5, 10, 15 ja 20 vuotta tulevaisuuteen. Yksi sellainen voisi olla lepo – lepo – lannoitus – lepo – avohakkuu. Jos kuvioita on satoja, syntyy erilaisia tulevaisuuden (koko aluetta koskevien simuloitujen) vaihtoehtojen kombinaatiota valtava määrä. Niiden joukosta voidaan kuitenkin etsiä optimaalinen, metsänomistajan tavoitteet täyttävä vaihtoehto laskennallisin menetelmin. Tätä osaa metsäsuunnittelujärjestelmässä kutsutaan optimoinniksi. Tavoite voidaan muotoilla niistä muutujista, joita on käytössä. Tavoite voi olla jonkin muuttujan (tavoitefunktion) minimointi tai maksimointi joidenkin rajoitteiden vallitessa. Esim. 5-vuotiskauden uudistusala voidaan rajata alle/yli jonkin hehtaarimäärän, samalla kun maksimoidaan metsätalouden harjoittamisen nettotulojen nykyarvoa tietyllä korkokannalla. Yhtä lailla rajoite voi koskea puuston määrää ja rakennetta tietyillä ajankohdilla (kestävyys). Jos tavoitteita on paljon, puhutaan monitavoitteisesta metsäsuunnittelusta ja päätöksenteosta. Tavoitteita voi

asettaa myös rajoitteiden avulla kuten edellä (esim. vartuneet männiköt ja metso), mutta tavoitefunktio voi sisältää myös eri muuttujia painotettuina. Virkistyskäyttö, metsästyys, maisema-arvot, puuntuotanto jne. esiintyvät tällöin maksimoitavassa funktiossa omilla painoillaan. Näiden ei-puuntuotannollisten hyötyjen estimoimiseksi tarvitaan tietoa maastosta ja/tai erilaisia malleja, mikä on usein haasteellista. Oikeat painot yrietään selvittää metsänomistajalta ja/tai intressiryhmiltä (kaupunkimetsät, valtion metsät, virkistysalue-metsät).

Suunnittelu ja tiedonkeruu maksavat. Yleisesti esitettäviä lukuja (huom. markkinahintaa on vaikea määritellä) ovat 10-20 eur/ha, kun työ tehdään maastossa. Päätöksentekijän tulisi hyötyä jotain parantuneista päätöksistä, joita tiedon varassa ja suunnittelutyökaluilla tehdään. Esimerkkejä:

- tiedetään missä on tiettyjä puutavaralajeja korjattavissa ja voidaan optimoida myyntiajankohta hintojen mukaan.
- saadaan parempi korvaus myydyistä puusta, kun ostajalle on esittää heidän työtään helpottavia ja hyödyttäviä tietoja
- tehdään onnistuneita uudistamispäätöksiä (metsänhoidollisesti, taloudellisesti ’alhaisen tuoton kohteet’)
- tehdään järkeviä investointipäätöksiä (tiet, ojitukset, lannoitukset), ja vältetään huonot.
- optimoidaan taimikoiden ja nuorten metsien hoito (vain tarvittava)

On selvää, että jos kerätty metsävaratietoa on epäluotettavaa, ei siitä juuri kannata maksaa. Toisaalta, on myös ymmärrettävää, ettei tiedosta kannata maksaa liikaa, koska eivät hyödytkään ole merkittäviä ottaen huomioon metsätalouden melko alhaisen tuoton, noin 150 eur/ha/v. Lisäksi simuloinnissa käytettävät mallit eivät nekään ole täydellisiä. Oikealla suunnittelulla ja päätöksenteolla toisaalta vältetään tappioita: viljellyn taimikon tuhoutuminen, metsälakikohteen pilaaaminen, virkistys- tai marjastusmahdollisuuksien menetys, jne.

Tietojenkäsittely

Metsätietojärjestelmän

- Reaalimetsä ja sen kehitys – Metsä tietojärjestelmässä ja reaalikehityksen mallinnus

Tietokannoista

Tietomääristä (rasterikuvat, pistepilvet, puujoukot)

–
rakenne

Kaukokartoitus

Metsien

kaukokartoitus

- ilmakuvauus, ortoilmakuvaus, satelliittikuvaus

–

yleisteksti

Sähkömagneettinen säteily: sironta, absorptio, läpäisy

Säteilykentän ominaisuuksia (irradianssi, radianssi, reflektanssi)

Kohteen sironta- ja läpäisyominaisuudet

Väliaineen merkitys (kuvausolosuhteet) – ilmakuvauus, maastokuvaus, satelliittikuvaus

Passiivinen ja aktiivinen kuvauus

Passiivinen kuvauus

- Yleiskuvauus – mistä fotonit
- Kollinearisuus, reikäkameramalli
- Kameran geometria
 - kameran kalibrointi (iWitness) esimerkki
 - Excel simulaatio – rakennuksen ääriiivat kuvalla
- Kuvauksen geometria, fotogrammetria
 - kohteen 3D rekonstruointi kuvilta
 - latvapistekartta
 - pintamallin muodostaminen
- Signaalinmuodostus kamerassa
 - Mitä pikseli mittaa? Mitä ovat RGB ja muut kanavat?

-

Aktiivinen kuvauus

- Laserkeilaus ja tutka
- ALS, TLS, MLS
- Esimerkkidataa – moniaikainen ALS samasta pisteestä (Excel)

Käsitteitä

Kasvu, tuotos

Arvo, tuotto

Parametri, estimaatti

Estimaatti – luottamusvälit

mittausvirhe, mallivirhe, jäännösvirhe, otantavirhe

1. Mittauksia, Malleja ja Otantaa - esimerkki

Onko puiden kasvu kärsinyt teollisuuslaitoksen lähellä?

Sköldvikin öljynjalostamo sijaitsee noin 35 km Helsingistä itään Porvoon länsireunalla. Se aloitti toimintansa 1960-luvulla.

2. Rakenne – toiminta ja ympäristö

Puu – iänmukainen kehitys, suhde ympäristöön, keskeiset tunnuukset

Metsä – kilpailua valosta, vedestä ja ravinteista. Mekaanista kilpailua.

3. Ohjelmia

Excel-taulukkolaskentaohjelmisto
Maple symbolisen matematiikan ohjelmisto
Matlab
R

avulla

Koordinaatistoja on

Yhden skalaariarvoisen muuttujan funktio

-

- funktio voi olla jatkuva tai epäjatkuva. Epäjatkuvat metsää kuvaavat mallit ovat

Vektoriarvoinen funktio

Derivaatta ja integraali, pyörähdyskappaleen integraali

Matriisi ja lineaarikuvaukset, sisätulo, vektoritulo

-

Pienimmän neliösumman menetelmä

- lineaarinen regressio

- malli joka kytkee havainnot ja tuntemattomat para+metrit

- suoran sovitus, yhtälön sovitus

- residuaalit, RMSE

- siirto ja kierto tasossa, affiini muunnos

Trigonometriaa

- Karteesinen koordinaatisto

- Napa- ja pallokoordinaatit

- Trigonometriset funktiot

- Kahden pisteen välinen etäisyys, vektori

- Eteenpäinleikkaus

- Trilaterointi

Tilastotiede

Havaintoasteikot

Yhden muuttujan jakaumatunnukset

Painotettu keskiarvo, painoilla laskeminen

Spatiaalinen tilastotiede

- Tilajärjestys, puut pisteitä (äärellien) tiheystunnukse/4t,

- Autokorrelaatio

- Simulaattorit – tiheys pisteessä X,

Otanta – satunnaisotanta, systemaattinen otanta, ositettu otanta

Luottamusrajan laskeminen, keskiarvo, osuus, kerroin,

Regressioanalyysi

Lähimmän naapurin menetelmä, ei-aparametriset menetelmät

Todennäköisyys ja tn-jakauma (nopanheitto, syntyvyys, puulajivirhe, laitevirhe)

Tasajakauma, normaalijakauma, Beta-jakauma

Kombinatoriikka

Äärellinen ja ääretön (metsikön pinta-ala ja koealapisteen paikat, yli 10-m puut)

Puun paikantaminen – menetelmät

Sisällysluettelo

Otanta – satunnaisotanta, systemaattinen otanta, ositettu otanta

Luottamusrajan laskeminen, keskiarvo, osuus, kerroin,

Regressioanalyysi

Lähimmän naapurin menetelmä, ei-aparametriset menetelmät

Todennäköisyys ja tn-jakauma (nopanheitto, syntyvyys, puulajivirhe, laitevirhe)

Tasajakauma, normaalijakauma, Beta-jakauma

Kombinatoriikka

Äärellinen ja ääretön (metsikön pinta-ala ja koealapisteen paikat, yli 10-m puut)

Maanmittaus – ja kartoitus

Karttakoordinaatit, karttaprojektiot, mittakaava, digitaliset kartta-aineistot (dynaaminen k), korkeusjärjestelmät

Karttatieto

Vektori- ja rasterimuotoinen kartta-aineisto

Korkeusmalli, TIN 3D mallinnus

Kiinteistöjärjestelmä

Tiestö (saavutettavuus, puunkorjuun ja kuljetuksen logistiikka)

Geodeettinen infrastruktuuri

Tarkat pisteet, XY ja Z

GNSS, tarkka reaaliaikainen GNSS

Karttapalvelut (kotimaiset, ulkomaiset)

GNSS, ilmassa, metsässä

Metsän tarkka paikallinen kartoitus

Metsäbiologiaa (puun ja puuston rakenne ja kasvu/reaktiot)

Kasvupaikan ja -ympäristön kuvaus – turvemaiden ekohydrologia, pienilmasto

Biologinen puuluokitus

Latvuksen tunnuksot, latvuksen kehittyminen ja allometria

Biomassaositteet, kasvu, allokatio

Puun suhde valoon – harvennus / kasvatustavat

Puiden välinen kilpailu

Kasvu-, syntymis- ja kuolemismallit - kasvatussimulaattorit

Kasvatusmallit

Luonnonmetsä (luonnonnormaali)

Metsätalouden perusteita (Metsäsuunnittelu)

Metsikkötalousjärjestelmä

Metsänhoitotoiden tekeminen ja kustannukset

Metsänomistajat (tilakoko, tavoitteet metsälle, monitavoitteisuus)

Metsätalouden tuottavuus, nettotulojen nykyarvo -laskelmat

Lannoitus

Tienrakennus

Korjuuolosuhteiden arviointi
Ojitustoiminta
Metsälainsäädäntö, yhteiskunnan tuki
Metsien suojelu, metsäluonnon suojelu
Puumarkkinat ja kannattavuus, nollaraja
Optimaalinen toimenpidesuunnitelma, riskit kun tieto ei ole täydellistä

Suomen metsät

Maaluokat ja niiden osuus, suojelualueiden osuus
Puulajit ja niiden osuus
Metsävarojen kehittyminen
Puuston kasvu ja sen alueellisuus
Metsänraja

Maailman metsät