



Konekapasiteetti
Jukka Ahokas

Johdanto

Peltotyöt pitää tehdä 'ajallaan'. Väärä ajankohta voi vaikuttaa sekä satoon että sen laatuun. Sade voi keskeyttää pellolla tehtävän työn, jolloin täytyy ottaa huomioon kuinka paljon sään takia on oikeasti käytettävissä aikaa työntekoon. Maataloustöihin liittyy aina useita eri vaiheita. Kylvöillä maa muokataan ja kylvetään, sadonkorjuussa vilja puidaan ja kuivataan. Kapasiteetti riippuu eri työvaiheiden kokonaisuudesta, esimerkiksi puinti voi keskeytyä kun kuivauskapasiteetti ei riitä. Lisäksi töihin liittyy valmisteluajoja, kuten koneiden huoltoa, materiaalin siirtoa pellolle tai pellolta. Nämä kaikki on otettava huomioon töiden kapasiteettia laskettaessa.

Koneisiin voi tulla huollon tai korjauksen tarvetta, joka pysäyttää varsinaisen työnteon. Luotettavuus riippuu koneen iästä, käyttötavasta ja myös sen alkuperäisestä laadusta. Luotettavuutta voidaan parantaa aina varakoneilla. Koneita suunniteltaessa niitä ei tehdä suinkaan ikuisesti kestäviksi, koska se aikaansaisi raskaita koneita, vaan lähdetään tietysti käyttötuntimäärästä, jonka jälkeen kone voi tavallisessa käytössä tarvita peruskorjauksia. Laakereille, hihnoille ja väsyville osille voidaan suunnitteluvaiheessa määrätä kuinka monta tuntia niiden pitäisi kestää.

Tässä monisteessa käydään läpi sitä, mitkä seikat vaikuttavat koneiden ja koneistuksen valintaan. Valinnalla on ratkaiseva osa tilan toiminnassa. Väärä koneiden valinta voi johtaa toimimattomiin koneketjuihin ja kalliisiin investointeihin, jolloin tilan tulos heikkenee.

Maaliskuu 2026. Erillinen kuivauskapasiteetti moniste on yhdistetty tähän. Lisäksi tekstiä on laajennettu. Ilmatieteen laitoksen säädatat mahdollistavat tarkemman, lähes tilakohtaisen säätietojen käsittelyn ja töiden kapasiteetin suunnittelun.

Apurina on ollut tekoäly. Se on tietävinään kaikesta kaiken, mutta monasti tieto on vajavaista. Se osaa kylläkin neuvoa eri tilanteissa ja tehdä ehdotuksia. Siltä saa apua etenkin tietokoneen ja ohjelmistojen käyttöön.

Mahdolliset kommentit ja kysymykset tästä.

Sisällys

1	Todennäköisyys ja tilastolliset arvot	4
1.1	Tilastolliset arvot	4
1.2	Säätietojen käsittely	5
1.3	Poutapäivien perustodennäköisyys	5
1.4	Säädäntöjen käsittelyssä käytettäviä jakaumia	6
1.4.1	Normaalijakauma	8
1.4.2	Binomijakauma	9
1.4.3	Markovin ketju	9
1.5	Tiivistelmä	11
2	Tuotannon suunnitteluun vaikuttavia asioita	12
2.1	Ajallisuuskustannus	12
2.2	Pellon tila	12
2.3	Sään vaikutus	15
2.3.1	Tehoisa lämpösumma	16
2.3.2	Säätietojen käyttö	18
2.3.3	Kevättyöt	20
2.3.4	Nurmisadon korjuu	23
2.3.5	Viljan puinti	29
2.4	Koneiden luotettavuus, kestoikä ja huoltokustannukset	32
2.4.1	Kestoikä ja luotettavuus	32
2.4.2	Huolto- ja korjauskustannukset	39
2.5	Tiivistelmä	42
3	Konekapasiteetin valinta	43
3.1	Koneiden valinnan optimointi	43
3.2	Tarvittava konekapasiteetti	45
3.3	Teoreettinen työsaavutus	47
3.4	Käytännön työsaavutus	48
3.5	Kuljetuksien ja materiaalin käsittelyn vaikutus	49
3.6	Ajotavan ja peltolohkon muodon ja koon vaikutus	49
3.7	Kuivauskapasiteetti	52
3.7.1	Materiaalien kosteuden ilmoittamistavat	52
3.7.2	Hehtolitrapäino	53
3.7.3	Ilman ominaisuudet	54
3.7.4	Kuivuriunit	55
3.7.5	Veden poistumisnopeus	56
3.7.6	Kuivurin mitoitus	58
3.7.7	Kuivumisaika käytännössä	60
3.8	Työketjut	60
3.8.1	Peräkkäiset työvaiheet	61
3.8.2	Rinnakkaiset työvaiheet	62
3.8.3	Koneketjut eri töissä	62
3.8.4	Koneinvestoinnit	67
3.9	Urakointi	68
3.10	Tiivistelmä	69

4 Koneiden kokojen yhteensopivuus	70
4.1 Traktorin vetovoima ja vetoteho	70
4.2 Liikkumisvastus ja -teho	73
4.3 Vetovastus ja vetoteho	74
4.4 Työkoneen ja traktorin koon yhteensovittaminen	75
4.5 Muokkauuskoneiden tehontarve	76
4.5.1 Yleisiä vetovastuksen laskentatapoja	76
4.5.2 Yksinkertaisia vetovastuksen laskentatapoja	79
4.5.3 Äkeen varusteiden vaikutus vetovastukseen	80
4.6 Voimanottoakselikäyttöisten koneiden tehontarve	80
4.7 Tiivistelmä	82
5 Maan tiivistyminen	83
6 Laskuesimerkit ja analysointivihjeitä	84
6.1 Laskuesimerkit	84
6.2 Tilasto-ohjelman käyttö poutapäivien haussa	84
6.3 Excel taulukkolaskentaohjelman käyttö tietojen käsittelyssä	86
6.4 Markovin ketjun analysointi	87

Luku 1

Todennäköisyys ja tilastolliset arvot

Sääolosuhteet, koneiden säätämistarpeet ja rikkoontumiset ovat luonteeltaan satunnaisia ilmiöitä. Yksittäisiä tapahtumia ei voida ennustaa tarkasti etukäteen, mutta niiden todennäköisyyksiä voidaan arvioida tilastollisin menetelmin aiempien havaintojen perusteella. Monivuotisten säätietojen avulla voidaan arvioida poutapäivien todennäköisyyksiä ja koneiden rikkoutumistietojen perusteella koneiden luotettavuutta. Näitä tietoja hyödyntämällä voidaan tehdä perusteltuja päätelmiä tarvittavasta konekapasiteetista ja sen mitoituksesta.

1.1 Tilastolliset arvot

Jotta tilastollisten menetelmien käyttöä konekapasiteetin mitoituksessa voidaan ymmärtää, palautetaan ensin mieleen muutamia tilastotieteen peruskäsitteitä. Näiden tunnuslukujen avulla voidaan kuvata havaintoaineiston keskimääräistä tasoa, vaihtelua sekä jakauman muotoa.

- **Keskiarvo (mean, average, Excel =AVERAGE)** saadaan laskemalla kaikki havaintoarvot yhteen ja jakamalla summa havaintojen lukumäärällä. Normaalisti jakautuneessa aineistossa keskiarvo, mediaani ja moodi ovat keskenään samansuuruisia. Jos jakauma ei ole normaali, keskiarvo ei välttämättä vastaa aineiston todennäköisintä arvoa. Keskiarvo μ lasketaan yhtälön 1.1 mukaisesti.

$$\mu = \frac{\sum x_i}{n} \quad (1.1)$$

- **Mediaani (median, Excel =MEDIAN)** on havaintoaineiston keskimäinen arvo siten, että puolet havainnoista on sitä pienempiä ja puolet suurempia. Mediaani ei ole herkkä yksittäisille poikkeaville arvoille, minkä vuoksi se kuvaa usein paremmin tyypillistä arvoa vinosti jakautuneessa aineistossa.
- **Moodi (tyyppi-arvo, mode, Excel = MODE)** on useimmin esiintyvä havaintoarvo. Moodi kuvaa jakauman huippukohtaa ja on erityisen hyödyllinen diskreeteissä jakaumissa, kuten poutapäivien lukumäärissä.
- **Varianssi (variance, Excel =VARP.P tai VAR.S)** ilmaisee ilmiön vaihtelua. Varianssi σ^2 lasketaan yhtälön 1.2 avulla. Varianssi mittaa kuinka kaukana eri pisteet ovat neliöllisesti keskimäärin keskiarvosta. Excelissä on funktiot =VAR.P ja =VAR.S. P = population ja S =sample eli P on ison joukon tapaus ja S otoksen tapaus. Siitä kumpaa käytetään ei ole tarkkaa rajaa, suosituksena on 30 pistettä. Jos vähemmän, silloin S, jos isompi silloin P. Monessa muussakin Excelin tilastofunktiossa on vaihtoehtona .S tai .P. Laskennassa on erona jakaja, otoksessa (S) se on n-1, isossa joukossa n.

$$\sigma^2 = \frac{\sum (\mu - x_i)^2}{n} \quad (1.2)$$

Varianssin dimensio on kaksi eli se korottaa suureen toiseen potenssiin. Sen takia varianssia kutsutaan todennäköisyysjakauman toiseksi momentiksi.

- **Keskihajonta (standard deviation, Excel =STDEV.P tai =STDEV.S)** on varianssin neliöjuuri (yhtälö 1.3) eli se mittaa kuinka kaukana pisteet ovat keskimäärin keskiarvosta. Keskiarvon ja hajonnan avulla voidaan esittää normaalisti jakautuneen tapauksen todennäköisyyksiä.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \mu)^2}{n}} \quad (1.3)$$

- **Vinous (skewness, Excel =SKEW tai =SKEW.P)** kuvaa jakauman vinoutta (epäsymmetrisyyttä), yhtälö 1.4

$$\gamma_s = \frac{1}{n\sigma^3} \sum (x_i - \mu)^3 \quad (1.4)$$

Normaalista jakautuneen funktion skewness on 0. Skewnessin merkki kuvaa jakauman muotoa. Positiivinen arvo ja keskiarvoa pienempi mediaani kuvaa jakauman oikealla puolella olevaa häntää. Vastaavasti negatiivinen arvo ja keskiarvoa suurempi mediaani kuvaa vasemmalla puolella olevaa jakauman häntää.

- **Huipukkuus (kurtosis, Excel = KURT)** (yhtälö 1.5) kuvaa jakauman muotoa ja keskittymistä. Normaalisti jakautuneessa tapauksessa matemaattinen kurtosis on 3. Jos arvo on alle 3, jakauma on lattana eli se on hajaantunut leveälle alalle. Jos jakauma on yli 3, jakauma on keskittynyt ja sillä on terävä huippu. Excelin KURT-funktio antaa excess-kurtosis arvon, jolloin normaalijakaumalle arvo on 0.

$$\gamma_k = \frac{1}{n\sigma^4} \sum (x_i - \mu)^4 \quad (1.5)$$

1.2 Säätietojen käsittely

Säätietoja eri paikkakunnilta voidaan hakea Ilmatieteen laitoksen avoimesta datapalvelusta. [Ilmatieteen laitos]. Palvelusta voidaan valita havaintoasema sekä halutut suureet, kuten sademäärä ja lämpötila. Aineisto on ladattavissa CSV- tai Excel-muodossa, mikä mahdollistaa sen jatkokäsittelyn taulukkolaskenta- ja analyysiohjelmilla. Tässä monisteessa on käytetty sekä päivittäisiä että tuntikohtaisia säähavaintoja. Päiväaineisto soveltuu erityisesti poutapäivien ja työpäivien tarkasteluun, kun taas tuntiaineistoa voidaan käyttää esimerkiksi sateen ajoittumisen ja intensiteetin analysointiin. Laskenta ja analyysi on toteutettu pääosin Excelin englanninkielisellä versiolla. Lisäksi joissakin tarkasteluissa on hyödynnetty JASP-tilasto-ohjelmaa sekä Python-pohjaisia analyysikoodeja. Esitetyt menetelmät ja esimerkit perustuvat näillä työkaluilla tehtyihin laskentoihin.

Säätiedon käsittelyn tavoitteena ei ole yksittäisten päivien ennustaminen, vaan pitkän aikavälin todennäköisyyksien arviointi. Monivuotisen aineiston avulla voidaan määrittää esimerkiksi:

- poutapäivien keskimääräinen määrä työjakson aikana
- poutajaksojen pituuksien vaihtelu
- epävarmuus työpäivien lukumäärässä

Näitä tuloksia hyödynnetään myöhemmissä luvuissa konekapasiteetin mitoituksessa ja työn ajoituksen arvioinnissa. Kappaleessa 6 on esimerkkejä siitä, kuinka tietoja voi käsitellä Jasp ohjelmalla ja Excelillä.

1.3 Poutapäivien perustodennäköisyys

Useiden vuosien säätietojen perusteella voimme laskea kuinka monta poutapäivää keskimäärin kunakin vuonna on ollut työjakson aikana. Näiden perusteella voidaan laskea todennäköisyyksiä poutapäiville.

Jos meillä on lukuja 26 vuoden ajalta ja 9 poutapäivää on esiintynyt 7 kertaa, saamme todennäköisyyden $\frac{7}{26} = 0,27$ eli meillä on 27 % todennäköisyys täsmälleen 9 poutapäivään, yhtälö 1.6.

$$P = \frac{n_p}{n_k} \quad (1.6)$$

P todennäköisyys poutapäivien määrälle
 n_p poutapäiviä
 n_k havaintojen määrä (havaintovuosia)

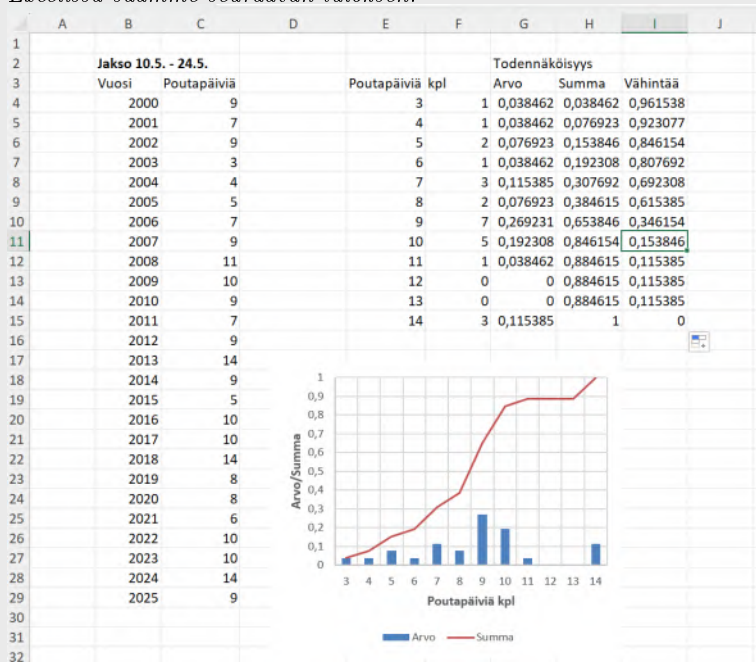
Jos haluamme tietää kuinka monta poutapäivää ja sitä lyhyempiä poutia on ollut, silloin summaamme sen ja sitä pienempien päivien todennäköisyydet yhteen.

Tälläisen tarkastelun tarkkuus riippuu tarkasteluvuosien määrästä, yhtälö 1.7. Jos havaintoja on esimerkiksi 10 vuoden ajalta, tarkkuus on $\frac{1}{10} = 10\%$ ja 26 vuoden aineistossa 3,8%, yhtälö 1.7. Jos jonkun poutapäivämäärän kohdalla ei ole yhtään havaintoa, silloin todennäköisyys on nolla. Tämä ei tarkoita, että ilmiö olisi mahdoton, vaan ainoastaan sitä, ettei se ole esiintynyt tarkastellussa aineistossa.

$$v_t = \frac{1}{n_k} \quad (1.7)$$

Esimerkki 1. Säättietoja on käytettävissä 26 vuoden ajalta. Niistä on etsitty 10.5. - 24.5. väliseltä ajalta poutapäivien määrät.

Excelissä saamme seuraavan tuloksen.



Pienin poutapäivien määrä on 3 ja suurin 14. Vuonna 2003 on satanut melkein aina, poutapäiviä on ollut vain kolme. Kolme kertaa koko ajanjakso on ollut poutaa eli 14 vrk poutaa. Laskenta on tehty kirjoittamalla E sarakkeeseen poutapäivät 3 - 14. Sen jälkeen on laskettu kullekin poutapäivien määrälle esintymiskerrat. Tässä se on laskettu F sarakkeeseen yhtälöllä =COUNTIF(\$C\$4:\$C\$29;"="&E4). G-sarakkeeseen on laskettu todennäköisyydet kullekin poutapäivälle =F4/26. H sarakkeeseen on laskettu kertyneen summan, H4: =G4 ja sen jälkeen H5 =H4+G5 jne.

Katsotaan miten todennäköistä 10 poutapäivää on tuolla jaksolla, arvo on 19% eli keskimäärin joka viides vuosi. Jos haluamme tietää 10 poutapäivän ja sitä lyhyempien poutien todennäköisyyden, se on 85%. Jos halutaan tietää vähintään 10 päivän poutamäärä, se on $1 - 0,85 = 15\%$.

Jos tarkastellaan lukemia tarkemmin, niin esimerkiksi vähintään viiden poutapäivän summa on 15% eli meillä on keskimäärin vuosi tai kaksi kymmenestä sellaisia, jolloin poutapäiviä on viisi tai vähemmän. Tällöin kevättyöt venyvät, emmekä saa niitä valmiiksi halutussa 14 vrk ajassa. Vastaavasti meillä on 12% mahdollisuus, että koko jakso on poutaa. Koko tarkastelun virhe on $\frac{1}{26} = 3,8\%$.

Perustodennäköisyyksiin perustuva tarkastelu antaa selkeän kuvan poutapäivien jakaumasta ja työn onnistumisen riskistä. Menetelmän etuna on sen yksinkertaisuus ja suora kytkeä havaintoaineistoon. Haittapuolena on, että tulokset ovat herkkiä aineiston pituudelle ja satunnaisvaihtelulle, minkä vuoksi myöhemmissä luvuissa tarkastelua täydennetään jakaumamalleilla ja Markovin ketjulla.

1.4 Säädatan käsittelyssä käytettäviä jakaumia

Edellisessä kappaleessa poutapäivien todennäköisyydet määritettiin suoraan havaintoaineistosta. Tätä lähestymistapaa voidaan kutsua perustodennäköisyyksien laskennaksi. Vaihtoehtoisesti säättietoja voidaan analysoida käyttämällä tilastollisia jakaumamalleja, jotka kuvaavat aineiston käyttäytymistä matemaattisen funktion avulla. Jakaumia on kahta päätyyppiä, jatkuvia tai diskreettejä. Jatkuva jakauma tarkoittaa, että ilmiö voi saada mitä tahansa arvoja sen vaihteluväliltä. Diskreetissä jakaumassa on vain tietyt arvot käytössä ja niiden välillä ei ole arvoja. Esimerkissä 1 meillä ei ollut havaintoja 12 ja 13 poutapäiville, koska niitä ei ole olemassa esimerkin laskennassa. Jatkuvassa jakaumassa saisimme arvoille ja summalle omat luvut.

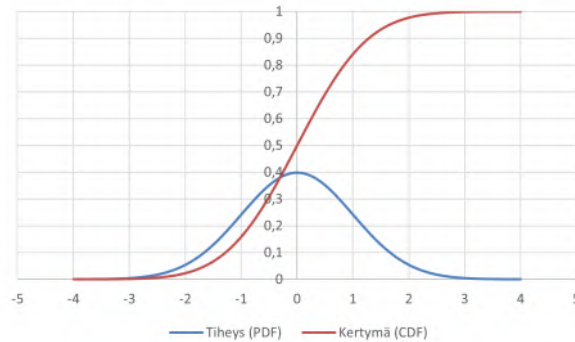
Jatkuvassa jakaumassa todennäköisyydet määritellään tiheysfunktion $f(x)$ avulla. Jos halutaan laskea kertymä tietyllä alueella olevilla arvoilla, funktio integroidaan (summataan) tällä välillä. Esimerkiksi summa välillä a,b on $P = \int_a^b f(x)dx$. Tiheysfunktion summa (integraali) koko sen määrittelyalueella on 1.

Diskreetissä jakaumassa muuttuja voi saada vain tiettyjä arvoja. Poutapäivien lukumäärä on diskreetti suure, koska se voi olla esimerkiksi 3, 4 tai 5 vuorokautta, mutta ei näiden väliarvoja. Diskreetissä jakaumassa todennäköisyydet lasketaan summana yksittäisistä todennäköisyyksistä, eikä jatkuvaa integraalia tarvita.

Kertymäfunktio

Tiheysfunktion summaa kutsutaan kertymäfunktioiksi (CDF, cumulative distribution function). Ilmiön tietyn arvon todennäköisyys voidaan laskea kertymäfunktion avulla käyttämällä siinä x arvona kohtaa, jossa to-

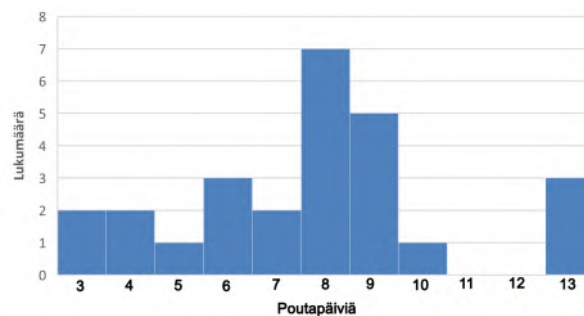
dennäköisyys halutaan laskea. Kertymäfunktio antaa itse asiassa summan sille, että arvo on joko x :n suurempi tai sitä pienempi, koska laskenta (summaus, integrointi) aloitettiin alarajalta. Kuvassa 1.1 on esimerkki normaalijakauman tiheys- ja kertymäfunktioista. Todennäköisyys sille, että arvo on pienempi tai yhtä suuri kuin haluttu arvo on sama kuin kertymäfunktion arvo. Todennäköisyys sille, että arvo on suurempi tai yhtä suuri kuin haluttu arvo on 1-kertymäfunktio. Jos lasketaan tietyn välin todennäköisyyttä, silloin todennäköisyys on raja-arvojen summafunktioiden erotus.



Kuva 1.1: Esimerkki tiheys- ja kertymäfunktioista, keskiarvo on 0 ja hajonta 1

Jakauman muodon tarkastelu

Havaintoaineiston jakauman muotoa voidaan tarkastella piirtämällä histogrammi. Histogrammi osoittaa, mille arvoalueille havainnot keskittyvät ja millainen jakauman muoto on. Kuva 1.2 esittää esimerkin poutapäivien jakaumasta. Vuosien aikana eniten on ollut 8 - 9 kpl poutapäiviä, 26 vuoden aikana 8 poutapäivää on ollut 7 kertaa. Tilastollisen jakauman valinnassa tavoitteena ei ole täydellinen matemaattinen tarkkuus, vaan riittävän hyvä kuvaus todellisesta ilmiöstä. Yksinkertainen malli on usein käytännössä käyttökelpoisempi kuin monimutkainen, mutta vaikeasti tulkittava funktio. Valintakriteerinä voi olla myös funktion yksinkertaisuus eli kun saadaan kohtuullinen yhteensopivuus, käytetään sitä mieluummin kuin matemaattisesti hankalaa ja monimutkaista funktiota. Se kuinka pitkää jaksoa tarkastellaan vaikuttaa myös tuloksiin, onko esimerkiksi haluamamme toukotöiden jakso kahden tai kolmen viikon mittainen?



Kuva 1.2: Esimerkki poutapäivien jakaumasta toukotöiden aikana

Säädäntäanalysoinnissa voidaan käyttää esimerkiksi:

- perustodennäköisyyksiä
- normaalijakaumaa (jatkuva jakauma)
- binomijakaumaa (diskreetti jakauma)
- beta-binomijakaumaa
- Markovin ketjua peräkkäisten poutapäivien tarkasteluun

Tässä monisteessa säädäntä käsittelyssä on käytetty pääasiassa normaalijakaumaa sekä Markovin ketjua.

1.4.1 Normaalijakauma

Normaalijakauma on yleisimmin käytetty tilastollinen jakauma. Se soveltuu hyvin ilmiöihin, joissa havaintojen vaihtelu on satunnaista ja jakauma on symmetrinen keskiarvon ympärillä. Normaalijakauman muoto on Gaussin kellokäyrä.

Normaalisti jakautuneessa aineistossa pätevät seuraavat likimääräiset säännöt:

- alue $\mu \pm \sigma$ kattaa noin 68 % havainnoista
- alue $\mu \pm 2\sigma$ kattaa noin 95 % havainnoista
- alue $\mu \pm 3\sigma$ kattaa noin 99,7 % havainnoista

Konekapasiteetin mitoituksessa tämä tarkoittaa, että jos työaikaa tai poutapäivien määrää tarkastellaan keskiarvon ja hajonnan avulla, voidaan arvioida kuinka suurella todennäköisyydellä työ saadaan tehtyä annetussa ajassa.

Normaalijakauman tiheysfunktio on yhtälön 1.8 mukainen ja kertymäfunktion on tämän integraali $P = \int_a^b f(x)dx$.

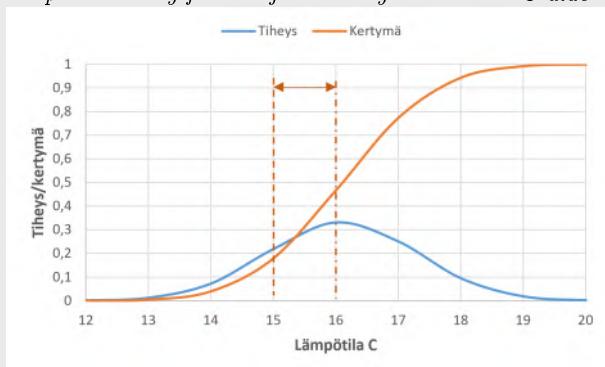
$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1.8)$$

$f(x)$	=	tiheysfunktio
μ	=	keskiarvo
σ	=	keskihajonta
x	=	tarkasteltava arvo

Laskuja helpottaa se, että Excelissä on käytettävissä =NORM.DIST funktio normaalijakauman tiheys- ja kertymäfunktion laskentaan. Käänteiseen laskentaan on käytössä =NORM.INV funktio. Käänteisellä laskennalla tarkoitetaan kertymäfunktion arvoa halutulla todennäköisyydellä. Excelissä, kun keskiarvo ja hajonta tiedetään, voidaan laskea mikä on tiheysfunktion ja kertymäfunktion arvo tietyllä kohtaa. Käsky on =NORM.DIST(x,mean,standard_dev,cumulative), jossa x on arvo, jonka kohdalla lasku tehdään, mean = keskiarvo, standard_dev = hajonta, cumulative on joko TRUE (1) tai FALSE (0). TRUE tarkoittaa, että lasketaan kertymäarvo (CDF = cumulative distribution function) ja FALSE, että lasketaan tiheysarvo (PDF = probability density function). Kun lasketaan todennäköisyyttä tietylle määrälle x (poutapäiville), silloin =NORM.DIST(x,mean,standard_dev,1) ja vähintään tietylle määrälle x =1-NORM.DIST(x,mean,standard_dev,1).

Esimerkki 2. Paikkakunnan kesäajan (kesäkuu - elokuu) monivuotinen koko vuorokauden lämpötilan keskiarvo on saanut seuraavat tilastoarvot, keskiarvo $16,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, varianssi $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}^2$, hajonta $1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, mediaani $16,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, moodi $14,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, vinous $0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja huipukkuus $-0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Mitä niistä on pääteltävissä ja mikä on todennäköisyys sille, että lämpötila on välillä $15 - 16\text{ }^{\circ}\text{C}$ tai vähintään $15\text{ }^{\circ}\text{C}$?

Vinous (0,02) on käytännössä nolla ja keskiarvo ($16,1\text{ }^{\circ}\text{C}$) on sama kuin mediaani ($16,1\text{ }^{\circ}\text{C}$), joten jakauma on hyvin lähellä symmetristä. Huipukkuus on $-0,8$, mikä viittaa normaalia tasaisempaan ja leveämpään jakaumaan. Moodi ($14,8\text{ }^{\circ}\text{C}$) poikkeaa keskiarvosta, mikä voi johtua aineiston pyörityksestä, luokittelusta tai siitä, ettei moodi ole stabiili tässä aineistossa. Lasketaan todennäköisyys sille, että lämpötila on vähintään $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Excel =1-NORM.DIST(15;16,1;1,2;1) =0,82 eli 82 % lämpötiloista on $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ tai enemmän. Vähintään $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ vastaava arvo on 0,47. Erotus eli $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ välinen pinta-ala on $0,47 - 0,18 = 0,29$ eli 29 % todennäköisyydellä lämpötila on tällä välillä. Alla olevassa kuvassa on lämpötilan tiheysfunktio ja merkittynä $15 - 16\text{ }^{\circ}\text{C}$ alue.



Normaalijakauman soveltuvuutta säädatan analysointiin arvioidaan histogrammin sekä keskiarvon, medianin ja moodin avulla. Vaikka sääaineisto ei ole koskaan täysin normaalijakautunutta, normaalijakauma antaa usein riittävän hyvän approksimaation konekapasiteetin mitoitusta varten.

1.4.2 Binomijakauma

Binomijakauma on diskreetti jakauma, jota voidaan käyttää tilanteissa, joissa tarkastellaan kahden mahdollisen tapahtuman esiintymistä. Poutapäiviä tarkasteltaessa tapahtuma voi olla esimerkiksi:

- poutapäivä (onnistuminen)
- sadepäivä (epäonnistuminen)

Binomijakauma ei kuvaa peräkkäisten poutapäivien pituuksia, vaan ainoastaan sitä, kuinka monta poutapäivää tarkastelujakson aikana esiintyy. Menetelmä olettaa, että jokainen päivä on riippumaton edellisestä päivästä, mikä on sen keskeinen rajoitus sääaineiston analysoinnissa. Binomijakauman matemaattinen muoto on yhtälössä 1.9.

$$P(x = k) = \binom{n}{k} \cdot p^k \cdot (1 - p)^{n-k} \quad (1.9)$$

$P(x=k)$	=	todennäköisyys, että poutapäiviä on k kappaletta
n	=	tarkastelujakson pituus (vrk)
p	=	poutapäivän todennäköisyys
k	=	poutapäivien lukumäärä
$\binom{n}{k}$	=	yhdistelmien lukumäärä

Excelissä on binomijakaumalle oma yhtälö =BINOM.DIST(number_s, trials, probability_s, cumulative). number_s = laskettavan tapahtuman haluttu määrä (esim. poutapäivien määrä), s.trials = kuinka monta tapahtumaa on ollut (esim. havaintojakson pituus pv), probability_s = tapahtuman todennäköisyys (esim. poutapäivän todennäköisyys) ja s.cumulative = TRUE/FALSE = kertymä- tai tiheysfunktio.

Binomijakauma poikkeaa normaalijakaumasta siinä, että siinä ei käytetä hajontaa laskennassa. Itse asiaa binomijakauman hajonta lasketaan erilailla kuin normaalijakaumassa. Binomijakauman hajonta on: $\sigma = \sqrt{n \cdot p \cdot (1 - p)}$. Nyrkkisääntö, milloin binomijakaumaa voidaan käyttää normaalijakauman sijasta, kun $n \cdot p \geq 5$ ja $n \cdot (1 - p) \geq 5$.

Esimerkki 3. Usean vuoden säätiedoista on saatu toukotöiden 14 vrk (n) ajalle 8,7 (k) poutapäivää. Mikä on todennäköisyys sille, että poutapäiviä on 10 kpl tai vähintään 10 kpl?

Poutapäivien todennäköisyys saadaan jakson pituudesta ja siinä olevien poutapäivien määrästä $p = \frac{8,7}{14} = 0,621$ eli poutapäiviä on keskimäärin 62,1 % 14 vuorokauden jaksossa. Työpäivien määrä on poutapäivien määrä $k = 8,7$. Lasketaan mikä on todennäköisyys tasan 10 poutapäivän määrälle. =BINOM.DIST(10;14;0,621;0) = 0,176 eli 17,6 % todennäköisyydellä on tasan 10 poutapäivää. Lasketaan mikä on todennäköisyys vähintään 10 poutapäivälle. Laskennassa käytetään nyt 9 poutapäivää, koska lasketaan 10 tai enemmän poutapäivää. =1-BINOM.DIST(9;14;0,621;1) = 0,336 eli 33,6 % todennäköisyys vähintään 10 poutapäivälle.

Poutapäivien hajonta on $\sigma = \sqrt{14 \cdot 0,621 \cdot (1 - 0,621)} = 1,82$ vrk ja 68% todennäköisyydellä poutapäiviä on $8,7 \pm 1,8 \approx 7 - 11$

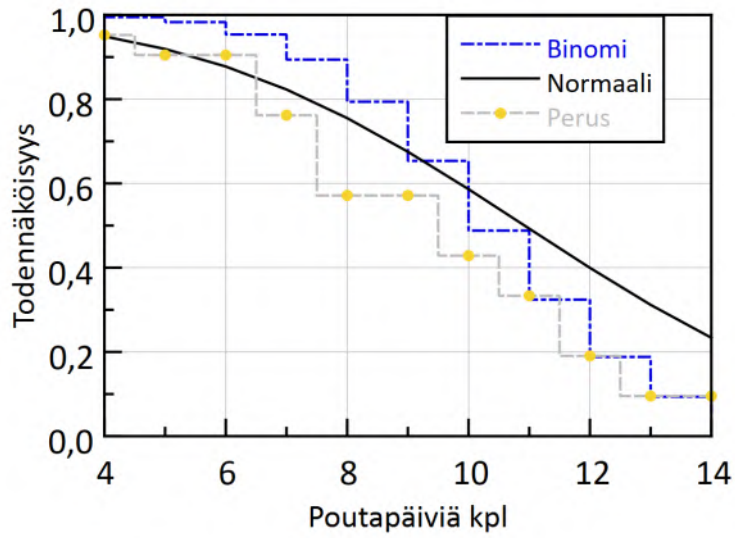
Katsotaan vielä nyrkkisääntö $14 \cdot 0,621 = 8,7$ ja $14 \cdot (1 - 0,621) = 5,3$ eli tämän mukaan binomijakauma soveltuu analyysiin.

Kuvassa 1.3 on esimerkki säädätystä, johon on käytetty perustilastotarkastelua sekä normaalijakaumaa ja binomijakaumaa. Perustarkastelussa näkyy poutapäivän puuttuminen 9 pv kohdalla (säädätystä), jolloin perustilastotarkastelussa on sama arvo 8 ja 9 päivän kohdalla. Normaali- ja binomijakauma poikkeavat jonkin verran toisistaan, normaalijakauma on loivempi kuin binomijakauman. Tässä monisteessa on säädätystä käsittelemässä käytetty pääasiassa normaalijakaumaa.

Binomijakauma soveltuu hyvin poutapäivien lukumäärän tarkasteluun, mutta se ei huomioi päivien välisiä riippuvuutta. Tämän vuoksi se ei kykene kuvaamaan peräkkäisiä poutajaksoja, joita tarvitaan esimerkiksi nurmen ja heinän korjuussa. Tätä varten käytetään Markovin ketjua, joka esitellään seuraavassa kappaleessa.

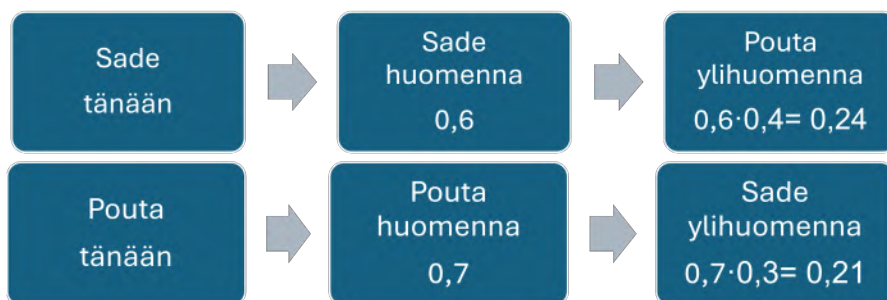
1.4.3 Markovin ketju

Markovin ketjua käytetään tilanteissa, joissa tarkasteltavan tapahtuman todennäköisyys riippuu edellisen ajan kohdan tilasta. Sääntarkastelussa tämä tarkoittaa sitä, että huomisen sää riippuu osittain tämän päivän säästä. Poutapäivien analysoinnissa Markovin ketju soveltuu erityisesti peräkkäisten poutapäivien todennäköisyyksien laskentaan, mikä on keskeistä esimerkiksi nurmen ja heinän korjuun ajoituksessa. Analyysi antaa todennäköisyyksiä sille, kuinka todennäköistä on siirtyä poudasta poutaan, poudasta sateeseen tai sateesta sateeseen tai sateesta poutaan. Kuvassa 1.4 on esimerkki Markovin ketjusta. Sääntiedoista on saatu todennäköisyys sille, että poudan jälkeen on pouta on 70% ja sateen jälkeen on sade on 60%. Kun ennustetaan ylihuomista, saadaan 21 % todennäköisyys sateelle, jos lähdetään poudasta.



Kuva 1.3: Toukotöiden poutapäivien todennäköisyys 3. kasvuvyöhykkeellä 10.5. - 31.5. välisenä aikana. Poutaraja 0,2 mm/vrk ja edellisen päivän sade <5 mm/vrk.

Nykytila	Huomenna pouta	Huomenna sade
Pouta	0,7	0,3
Sade	0,4	0,6



Kuva 1.4: Esimerkki Markovin ketjusta

Markovin ketjun analysointitapa on esitetty kappaleessa 6. Markovin ketjun etuna on, että se huomioi päivien välisen riippuvuuden, jota binomijakauma ei pysty kuvaamaan. Sen avulla voidaan laskea todennäköisyyksiä esimerkiksi kahden, kolmen tai useamman peräkkäisen poutapäivän esiintymiselle.

Excelissä Markovin ketjulle ei ole omaa valmista funktiota, joten laskenta toteutetaan matriisilaskennan tai VBA-makron avulla. Tässä monisteessa Markovin ketjua hyödynnetään erityisesti poutajaksojen pituuksien ja niiden todennäköisyyksien määrittämisessä.

1.5 Tiivistelmä

- Sää ja työpäivät ovat satunnaisia ilmiöitä, joita ei voida ennustaa tarkasti, mutta niiden todennäköisyyksiä voidaan arvioida monivuotisen aineiston avulla.
- Pelkkä keskiarvo ei riitä kapasiteetin mitoittamiseen, vaan tarvitaan myös hajonta, joka kuvaa vuosien välistä vaihtelua.
- Tilastolliset jakaumat mahdollistavat todennäköisyyksien arvioinnin myös sellaisille arvoille, joita aineistossa ei ole esiintynyt.
- Normaalijakauma avulla saadaan jatkuva tieto poutapäivistä, perustodennäköisyys antaa tuloksen vain niille poutapäiville, joita aineistossa on. Binomijakauma kuvaa poutapäivien lukumäärää, mutta olettaa päivien olevan toisistaan riippumattomia.
- Todellisessa säässä päivät ovat riippuvaisia toisistaan. Peräkkäisten poutapäivien todennäköisyydet voidaan arvioida Markovin ketjulla.
- Konekapasiteetin mitoituksessa ratkaisevaa ei ole keskimääräinen poutapäivien määrä, vaan todennäköisyys riittävän pitkille yhtäjaksoisille työjaksoille.

Luku 2

Tuotannon suunnitteluun vaikuttavia asioita

2.1 Ajallisuuskustannus

Töiden ajallaan tekeminen (ajallisuus) vaikuttaa satoon kuvan 2.1 mukaisesti. Jos kevättyöt tehdään liian aikaisin tai liian myöhään, molemmat pienentävät saatua satoa. Kaikkia peltotöitä ei voida tehdä samanaikaisesti, jolloin työt joudutaan usein aloittamaan ennen sopivinta ajankohtaa ja lopettamaan sopivan ajan jälkeen.

Kuvan 2.1 tulokset esittävät kevättöiden ajankohdan vaikutusta satoon. Ne perustuvat laajoihin koesarjoihin, ja jos siitä lasketaan keskimääräinen päivittäinen tappio, se on 1,4 %/vrk. Jos satotaso on 3500 kg/ha, silloin ajallisuustappio on n 50 kg/(ha·vrk). Nämä tulokset pätevät virolaisiin olosuhteisiin [Tamm 2009]. Ruotsalaiset vastaavat tulokset ovat kevätviljojen osalta 43 kg/(ha·vrk) ja syysviljojen osalta 30 kg/(ha·vrk) [Toro ja Hansson 2004a]. Toro ja Hansson [Toro ja Hansson 2004a] laskevat ajallisuuskustannuksista johtuvan tappion yhtälön 2.1 mukaisesti. Yhtälö olettaa lineaarisen satotappion optimiajankohdan ympärillä. Tappio voidaan laskea myös päiväkohtaisesti, jos halutaan tarkempaa tarkastelua.

$$Y = kA(\Delta t_a + 0,5\Delta t_l) \quad (2.1)$$

Y	ajallisuustappio [kg]
k	ajallisuuskerroin, tappion [kg/(ha·vrk)]
A	pinta-ala [ha]
Δt_a	kylvöjen aloitus vrk ennen optimiaikaa, optimiajan jälkeen arvo on nolla
Δt_l	kylvöjen lopetus vrk optimiajan jälkeen

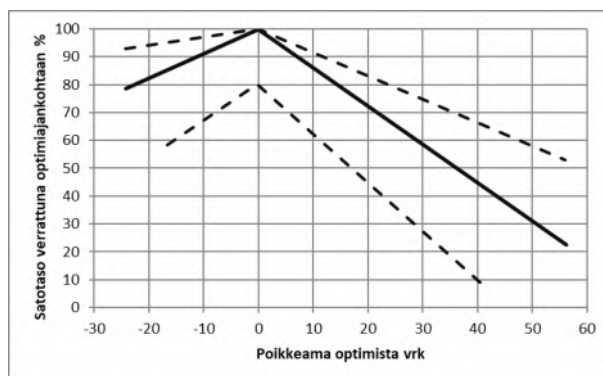
Esimerkki 4. Tiedetään, että kevättöiden satotappio on 50 kg/(ha·vrk) optimiajan ulkopuolella tehdystä kylvöstä. Kuinka suuri tappio on, jos 100 ha kylvöt aloitetaan 4 vrk ennen optimia ja lopetetaan joko 1 vk tai 2 vk optimiajan jälkeen? Mikä on rahallinen tappio, jos viljan hinta 0,16 €/kg?

Ensimmäisen tapauksen tappio on $Y_1 = \frac{50\text{kg}}{\text{ha}\cdot\text{vrk}} 100\text{ha} (4\text{vrk} + 0,5 \cdot 7\text{vrk}) = 37500\text{kg}$ ja toisen $Y_2 = \frac{50\text{kg}}{\text{ha}\cdot\text{vrk}} 100\text{ha} (4\text{vrk} + 0,5 \cdot 14\text{vrk}) = 55000\text{kg}$. Rahalliset tappiot ovat vastaavasti 6 000 € ja 8 800 €.

Tappiolla on sitä suurempi merkitys mitä korkeampi on tuotteiden hinta. Tuotteiden hinnan ollessa alhainen ajallisuudesta johtuvan tappion merkitys on pienempi. Tappiota voidaan vähentää lisäämällä konekapasiteettia. Tällöin pitää löytää optimi tappioille ja konekapasiteetin kustannuksille. Määrällisten satotappioiden lisäksi syyskaudella esiintyy myös sadonkorjuun laatutappioita, jotka voivat sadon arvon kannalta olla huomattavia. Nurmirehun osalta korjuuajankohta vaikuttaa merkittävästi rehun laatuun: myöhästynyt korjuu alentaa rehun D-arvoa. Toisaalta myöhemmässä korjuussa satotaso on yleensä korkeampi.

2.2 Pellon tila

Muokkausta ja kylvöä varten maan on oltava sopivan kosteaa, jotta maa murustuu ja siemenet orastuvat normaalisti. Pellon kulkukelpoisuus on toinen keskeinen tekijä, joka on otettava huomioon. Traktorit ja työkonet eivät saa upota maahan, eikä liiallinen maan tiivistyminen ole sallittua.



Kuva 2.1: Viljasadon kylvötöiden ajallisuustappio. Yhtenäinen viiva kuvaa keskimääräistä arvoa ja katkoviivat vaihtelualueita. [Tamm 2009]

Maaperän kosteuden ilmoittaminen ei ole yhtä yksinkertaista kuin esimerkiksi viljan kosteuden mittaaminen. Pelkkä kosteusprosentti ei yksin kuvaa maan tilaa, vaan myös maalaji vaikuttaa ratkaisevasti siihen, miten vesi sitoutuu maahan ja on kasvien käytettävissä.

Maaperän kosteus voidaan ilmoittaa seuraavasti:

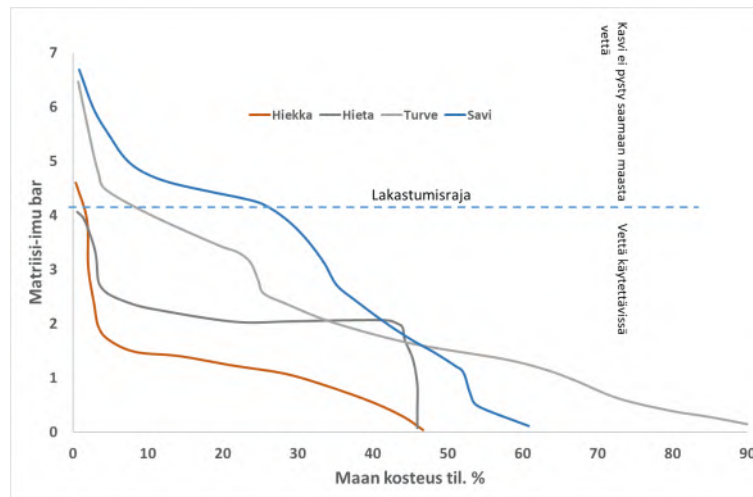
- **Massaperusteisena** prosenttina (gravimetrinen). Mittaus on helppo tehdä, maakerä punnitaan ennen ja jälkeen kuivauksen ja tästä voidaan laskea maan vesipitoisuus. Kosteus voidaan ilmoittaa kahdella eri tavalla.
 - **Märkäkosteus**, poistuneen veden määrää verrataan näyte-erän alkuperäiseen painoon (wb=wet basis)
 - **Kuivakosteus**, poistuneen veden määrää verrataan kuivatun erän painoon (db=dry basis).
- **Tilavuusperusteisena** prosenttina (volumetrinen). Tilavuusperusteinen kosteus ilmoittaa, kuinka suuri osa maan tilavuudesta on vettä. Kuivauksessa poistunut vesimäärä suhteutetaan näytteen alkuperäiseen tilavuuteen. Arvo voidaan laskea myös massaperusteisesta kosteudesta, mikäli maan tiheys tunnetaan. Koska maan tiheys poikkeaa veden tiheydestä, paino- ja tilavuusperusteiset kosteusarvot eivät ole numeerisesti samoja. Tilavuusperusteinen kosteus antaa kuitenkin selkeän kuvan siitä, kuinka paljon vettä maassa on litroina. Tämän ansiosta esimerkiksi kastelun vaikutusta kosteuteen voidaan arvioida helposti.
- **pF-luku**. elkkä kosteusprosentti ei kerro maan vedenpidätyskyvystä. Kasvien kannalta oleellista on se, kuinka helposti vesi on juuriston käytettävissä. Kasvien juuret ottavat vettä maasta alipaineen avulla, mutta tiukasti sitoutunutta vettä ne eivät pysty hyödyntämään. pF-luku kuvaa veden sitoutumista maahan. Maanäytteesen kohdistetaan erilaisia alipaineita, ja mittauksissa rekisteröidään, kuinka paljon vettä irtoa maasta eri imuvoimilla. Mittaus vastaa periaatteessa kasvien juuriston toimintaa. Kuvassa 2.2 on esitetty näin saatu tulos. Paine ilmaistaan pF-luvulla, joka on imun kymmenlogaritmi, kun imu ilmoitetaan yksikkönä cm vesipatsasta, $pF = \log(h)$, h on imukorkeus [cm]. pF luvun ollessa pieni sitä heikommin vesi on sitoutunut, esim. $pF = 4$ tarkoittaa, että vesi on sitoutunut maahan alipaineella, joka vastaa 10000 cm korkean vesipatsaan painoa (n 10 bar, 1 MPa).
- **Kenttäkapasiteetilla** tarkoitetaan vesipitoisuutta, joka jää maalajiin, kun vedellä kyllästyneestä maasta poistuu vesi painovoiman vaikutuksesta ($pF = 1,5 - 2,0$ eli 3 - 10 kPa tai 0,03 - 0,1 bar). Kenttäkapasiteetti voidaan ilmaista myös suhteellisenä arvona, jolloin 100 % tarkoittaa tilannetta, jossa maasta on poistunut kaikki irtovesi eli maahiukkasilla on maksimivesimäärä mitä ne pystyvät sitomaan. Kasvit hengittävät juurillaan ja kenttäkapasiteettia suurempi vesimäärä jää maan huokosiin ja tukehduttaa kasvun. Tämä näkyy keltaisena kasvustona.
- **Lakastumisraja** on vesipitoisuus, jossa kasvit eivät pysty ottamaan maasta enempää vettä. Tämä riippuu kasvista ja maalajista. Lakastumisraja on normaalisti n 4 pF eli 1000 kPa (10 bar), mutta esimerkiksi perunalla se on 2,7 pF ja mansikalla 2,5 pF.

Eri maalajit sitovat vettä erilailla. Savimaassa vesi on tiukemmin sitoutunut kuin hiekkamaissa. Kuvassa 2.2 on esitetty eri maalajeille lakastumisraja ja miten se vaikuttaa kasvien vedensaantiin. Esimerkiksi 20 tilavuus % kosteus on savimaalla kasveille jo käyttökelvoton. Hieta- ja hiekkamailla sen sijaan vesi on vielä löyhässä ja kasvien käytettävissä. Kyse on siitä, kuinka suuren alipaineen kasvin juuristo pystyy saamaan aikaan ja kuinka helposti maa luovuttaa vettä. Savimaa on koheesiomaata ja se luovuttaa vettä selvästi huonommin kuin esimerkiksi hiekkamaa. Toisaalta savimaa ei ole yhtä poudan arka kuin hiekkamaa.

Taulukko 2.1: Peltotöiden ja koneiden käytön suositeltuja raja-arvoja kenttäkapasiteettiin verrattuna [Toro ja Hansson 2004a]

Työ	Maan pintakerros < 3 cm	Syvempi kerros 3 - 7 cm
Kyntö	110%	110%
Kylvömuokkaus	85%	107%
Sadonkorjuu	110%	110%

Maan kosteus on erilainen keväällä ja syksyllä. Keväällä maa kuivuu pinnasta ja syvemmällä on märkää. Syksyllä maa kostuu pinnasta ja syvemmällä on kuivempaa. Tämän takia maan kosteutta tarkastellaan usein kerroksittain, jotta sekä pintamaan että pohjamaan ominaisuudet tulevat esiin. Ruotsalaisen tutkimuksen mukaan peltotöiden suositellut työrajat ovat taulukon 2.1 mukaisia. Orastumisen kannalta sopiva maan kosteus on savi- mailla 45 - 80 % kenttäkapasiteetistä ja hiekkamailla 20 - 70 % kenttäkapasiteetistä [Alakukku 2006]. Taulukon 2.1 mukaan koneiden liikkumisen kannalta kosteuden pitäisi olla korkeintaan 85% kenttäkapasiteetistä. Orastumisraja alkaa likimain samasta tilanteesta. Murustumisen kannalta sopiva maan kosteus on 20 paino %. Tämä vastaa n 25 til. %. Lakastumisraja on 2,9 - 9,8 kPa ja kuvan 2.2 mukaan tämä vastaa viljelymaalaajeilla n 45 til. % kosteutta. Peltotyöt voidaan siten alkaa, kun pellon kosteus on n 30 til. %.



Kuva 2.2: Kasveille käyttökelpoisen veden raja-arvoja [Andersson ja Winkler 1972]

Ilmastonmuutoksen mukana rankkasateiden ennustetaan lisääntyvän [Ilmastokatsaus]. Tämän seurauksena vesi ei välttämättä kerkeä imeytymään maahan, vaan se jää pellon pintaan. Lisäksi sade pienentää hiukkas-kokoa eli maahiukkaset pienenevät ja muodostavat tiiviin pintakerroksen. Veden imeytymistä maahan voidaan laskea Darcyn lain perusteella, yhtälö 2.2. Veden läpikulkema matka L on pohjaveden korkeus maan pinnasta. Vesikerroksen paksuus on tähän verrattuna usein pieni, jolloin yhtälön jälkimmäinen osa saa usein arvon 1 ja virtausnopeus on sama kuin maaperän hydraulinen johtavuus.

$$q = K \frac{\Delta h}{L} \quad (2.2)$$

- q veden virtausnopeus [m/s]
 K maaperän hydraulinen johtavuus [m/s]
 Δh vedenpintojen korkeusero
 L veden läpikulkema matka

Maan hydraulisen johtavuuden arvoja on taulukossa 2.2. Taulukossa on sekä m/s että mm/h arvoja. Jälkimmäinen on lähempänä käytännön tulkintaa. Johtavuusarvoissa on runsaasti hajontaa, koska maaperän huokosten määrä, humuspitoisuus ja lämpötila vaikuttavat veden virtaamiseen. Maaperän johtavuus voidaan määrittää melko yksinkertaisesti kairaamalla maahan reikä, tyhjentämällä se ja seuraamalla kuinka nopeasti se täyttyy uudelleen. Ohjeet löydät Vakkilaisen artikkelin tietoruudusta 3.7 kirjassa [Äijö ym(2016)]. Peltojen ojituksella pohjaveden korkeus pidetään 1,0 - 1,2 m korkeudella [Äijö ym(2016)]. Veden imeytymistä voidaan parantaa

Taulukko 2.2: Tyypillisiä maaperän johtavuuden arvoja

Maalaji	K m/s	K mm/h
Savi	$10^{-9} - 10^{-6}$	0,004 - 4
Siltti	$10^{-7} - 10^{-5}$	0,04 - 40
Hieta	$10^{-6} - 10^{-4}$	0,4 - 400
Hiekka	$10^{-5} - 10^{-3}$	4 - 4 000
Sora	$10^{-4} - 10^{-2}$	40 - 40 000

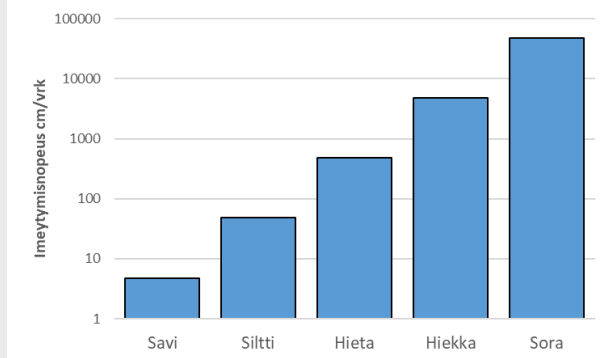
Taulukko 2.3: Sateiden luokitus [Sadetta ja poutaa]

Sademäärä mm/vrk	Sateen luokitus	Rankkasade mm	Sadeaika
< 0,3	Pouta	2,5	5 min
0,3 - 0,9	Vähäinen sade	5,5	30 min
1,0 - 4,4	Sade	7,0	1 h
≥ 4,5	Runsas sade	10	4 h
		15	12 h
		20	24 h

huolehtimalla maan huokostilavuudesta. Tämä saadaan aikaiseksi vähentämällä maan tiivistymistä, välttämällä turhan hienoa muokkausta, pitämällä huolta humuskerroksesta ja käyttämällä mahdollisia maanpeitekasveja [Peltonen ym].

Esimerkki 5. Maan pinnalla on 5 cm vettä ja pohjavesi on 1 m syvyydessä, kyseessä on savimaa. Mikä on veden imeytymisnopeus?

Savimaan hydraulinen johtavuudeksi otetaan $K = 0,4 \text{ mm/h}$. Maan pinnalla on vettä 5 cm ja pohjavesi on 1 m syvyydessä. Vedenpintojen korkeusero on $\Delta h = 1,0 + 0,05 = 1,05 \text{ m}$ ja veden läpikulkema matka on 1m. Imeytymisnopeus on $q = K \frac{\Delta h}{L} = 0,4 \cdot \frac{1,05}{1,0} = 0,42 \text{ mm/h}$ ja imeytyminen kestää $t = \frac{50}{q} = 5 \text{ vrk}$. Tämä toteutuisi, jos maassa ei olisi huokosia, jotka toimivat vesiteinä pohjaveteen ja maa olisi hyvin tiivistä. Oikeastaan sadeveden kerrospaksuus maan pinnalla on pieni verrattuna läpikulkumatkaan, jolloin voitaisiin laskea suoraan hydraulisen johtavuuden avulla. Alla olevassa kuvassa on taulukon 2.2 keskiarvoilla laskettuja imeytymisnopeuksia.

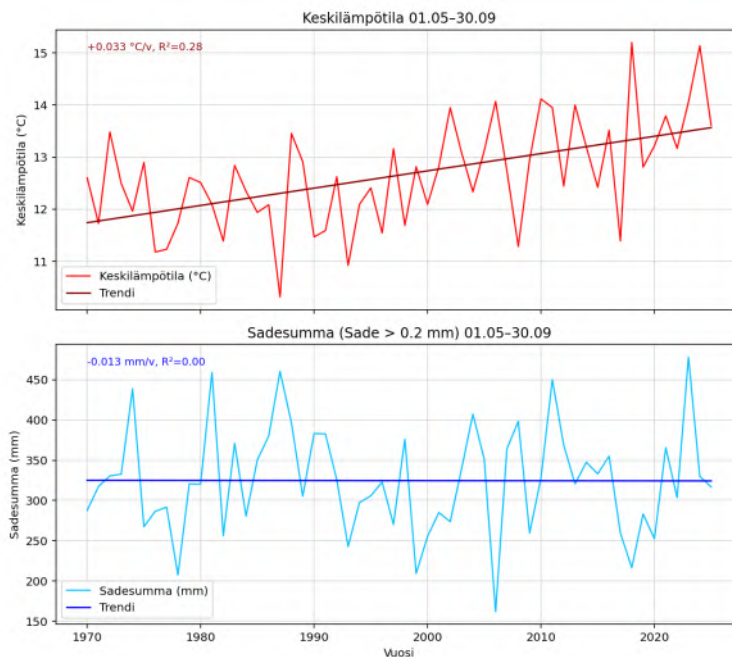


2.3 Sään vaikutus

Maataloustyöt täytyy tehdä ns hyvän sään aikana. Sateet vaikuttavat maan kosteuteen, muokattavuuteen ja kantavuuteen. Lisäksi ne vaikuttavat sadon kosteuteen. Sadon korjuu pitää tehdä kuivalla säällä ja korjattavan sadon pitäisi olla mahdollisimman kuivaa. Saderiski on aina olemassa ja se pitää ottaa huomioon tuotannon suunnittelussa työpäivän todennäköisyyden avulla. Kuvassa 2.3 on tuotantokauden sademääriä ja lämpötiloja eri vuosina [Ilmatieteen laitos]. Kuvasta on nähtävissä, että sademäärät voivat vaihdella runsaasti, mutta mitään trendiä sademäärien muutokselle ei ole. Lämpötilan muutos on selvä, keskilämpötila on kohonnut 0,033 astetta vuodessa eli kuvan 55 vuoden jakson aikana 1,8 °C.

Sateet ja rankkasateet luokitellaan taulukon 2.3 mukaisesti.

Toteutuneiden säätietojen avulla saadaan arvio käytettävissä olevista työpäivistä työsesongin aikana. Tämä ei kuitenkaan kerro koko totuutta mahdollisuudesta työn tekoon. Maan ominaisuudet (lähinnä kosteus) ja sadon kypsyys sekä kosteus sadonkorjuussa vaikuttavat myös siihen voidaanko työ tehdä. Esimerkiksi Toro ja



Kuva 2.3: Tuotantokauden vuosittaisia sademääriä ja lämpötiloja 3. kasvuvyöhykkeellä [Ilmatieteen laitos]

Taulukko 2.4: Eri viljalajikkeiden tyypillisiä lämpösummavaatimuksia

Laji	Tehoisan lämpösumman tarve °C·vrk	Kavuaika vrk ¹
Ohra	850–1050	81 - 96
Kaura	900 - 1100	91 - 102
Kevätvehnä	1000 - 1200	97 - 108
Syysruis	1000 - 1200	337 - 339
Syysvehnä	1050 - 1250	331 - 334

¹<https://www.luke.fi/fi/luonnonvaratieto/tiedetta-ja-tietoa/viralliset-lajikekokeet>

Hanson [Toro ja Hansson 2004a] määrittivät todennäköisyyksiä pellon tilan mukaan. Tässä monisteessa tutustutaan siihen, miten sää tietoa voidaan hyödyntää silloin, kun mietimme kuinka monta päivää meillä on työhön käytettävissä. Sen perusteella taasen voimme arvioida minkä kokoisia koneita hankimme. Käytännössä työnteon aloittaminen pitää ajoittaa aina sääennusteiden mukaan.

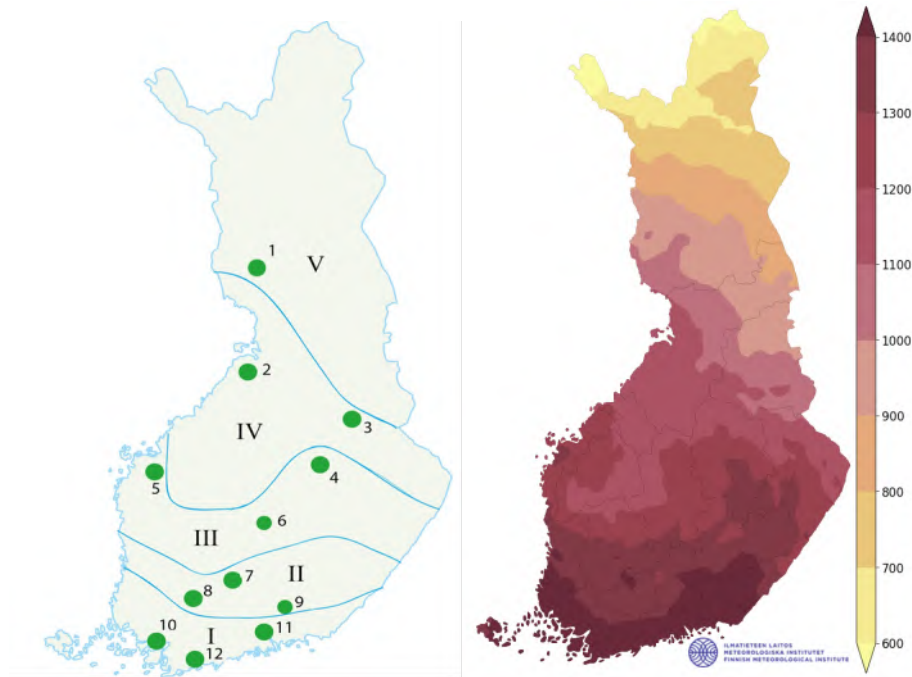
Sää tiedoista pitää poimia työlle otolliset päivät. Yksinkertaisimmillaan valitaan poutapäivät taulukon 2.3 luokituksien perusteella eli kun sademäärä vuorokaudessa on alle 0,3 mm/vrk, silloin on pouta. Edellisen päivän sademäärä vaikuttaa myös töiden onnistumiseen, silloin poimintaan lisätään edellisen päivän sademäärä tai vielä sitä edeltäneen päivän sademäärä.

2.3.1 Tehoisa lämpösumma

Tehoisa lämpösumma (effective temperature sum, growing degree days, GDD) saadaan vähentämällä vuorokauden keskilämpötilasta viisi astetta ja laskemalla vuorokautiset lämpösummat yhteen. Tämän avulla seurataan termisten vuodenaikojen vaihtumista ja maataloudessa lasketaan tehollista lämpösummaa, yhtälö 2.3. Kasvien kasvu alkaa, kun keskilämpötila on yli 5 °C ja pysyy sen yläpuolella vähintään 5 vuorokauden ajan. Kasvukauden alku vaihtelee vuosittain. Jos viljellään maissia, lämpötilan raja on 10 °C. Jos vuorokauden keskilämpötila alittaa 0 °C, sitä ei oteta huomioon tehoisassa lämpösummassa, koska kasvu vain pysähtyy hetkeksi. Tehoosaa lämpösummaa käytetään kasvukauden pituuden määrittämiseen, kylvö- ja korjuuajan arviointiin, kasvilajikohtaisiin malleihin (viljat, nurmet, metsänkasvu) ja kasvuvyöhykkeiden määrittelyyn.

Kasveille on erilaisia kasvu- ja viljelyvyöhykkeitä. Kuvassa 2.4 on viljelyvyöhykkeet ja virallisten lajikekokeiden koepaikat v 2024 [Viralliset lajikekokeet]. Siinä on myös maamme lämpösummien keskiarvot vuosilta 1991 - 2020 [Terminen kasvukausi].

Taulukossa 2.4 on eri viljalajikkeiden tyypillisiä tehoisan lämpösumman tarpeita ja kasvuaikoja. Virallisissa lajikekokeissa on tarkemmat lajikekohtaiset lämpösummatarpeet. Termisen kasvukauden tilastot löytyvät Ilmatieteen laitoksen nettisivuilta.



Kuva 2.4: Viljelyvyöhykkeet ja lajikoekkeiden paikat sekä lämpösummat ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{vrk}$) vuosilta 1991-2020 [Viralliset lajikekoekkeet, Terminen kasvukausi]

Kasvukauden katsotaan alkavan Suomessa, kun vuorokauden keskilämpötila ylittää $+5^{\circ}\text{C}$ eikä maassa ole lumipeitettä. Tuosta aloitetaan tehoisan lämpösumman laskenta. Kasvukausi ja tehoisan lämpösumman laskenta loppuu, kun keskilämpötila laskee alle $+5^{\circ}\text{C}$. Tehoisa lämpösumma kertoo kuinka paljon lämpöenergiaa on ollut kasvien käytettävissä kasvukauden aikana. Eri kasvuvaiheiden osuus tehoisasta lämpösummasta on seuraava: orastuminen $\approx 10\%$, versojen muodostus $\approx 25\%$, tähkälle tulo $\approx 65-70\%$, jyvän täyttyminen $\approx 80-90\%$ ja jyvän valmistuminen $\approx 100\%$.

$$S_t = \sum (T_{vrk} - T_p) \quad (2.3)$$

S_t	Tehoisa lämpösumma
T_{vrk}	Vuorokauden keskilämpötila
T_p	Kasvun alkulämpötila 5°C

Netistä voit myös löytää laskureita, joiden avulla voi laskea lämpösumman tietyistä päivästä lähtien, esimerkiksi Farmit sivustolta. Kuvassa 2.5 on esimerkki tehoisan lämpösumman kehittymisestä vuodesta 1970 lähtien 3. kasvuvyöhykkeellä. Lämpösumma on kasvanut vuodessa keskimäärin $5,4^{\circ}\text{C}\cdot\text{vrk}$.

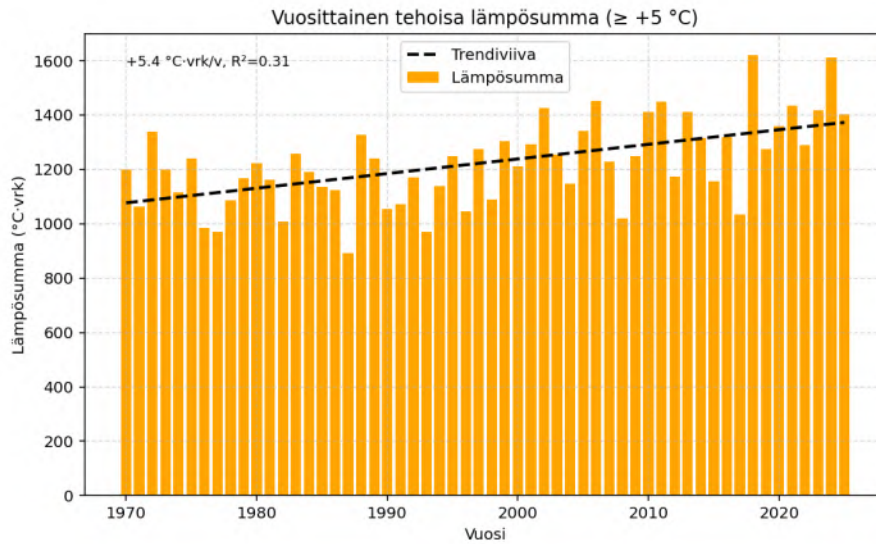
Viljalajikkeiden valinnassa ilmoitetaan usein vain kasvuaika vuorokausina. Sen ja tehoisan lämpösumman välillä on karkeasti yhtälön 2.4 mukainen yhteys.

$$T_{kasvu} = \frac{S_t}{S_d} \quad (2.4)$$

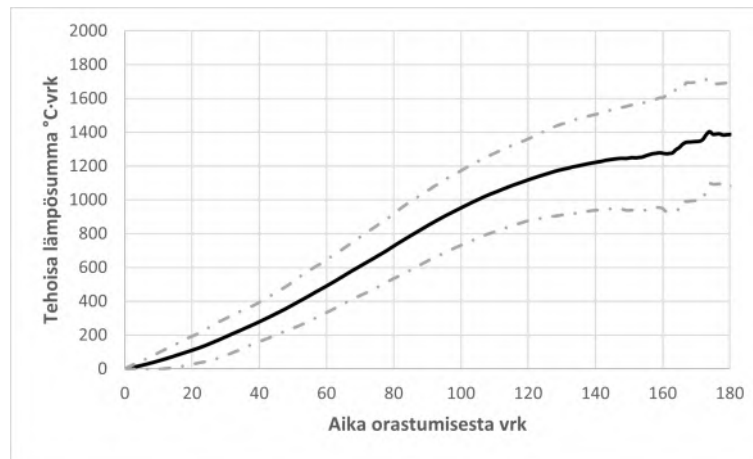
T_{kasvu}	Kasvuaika [vrk]
S_t	Kasvilajin tehoisan lämpösumman tarve [$^{\circ}\text{C}\cdot\text{vrk}$]
S_d	Keskimääräinen tehoisa päiväsumma [$^{\circ}\text{C}$]

Esimerkki 6. Etelä-Suomessa keskimääräinen tehoisa päiväsumma on $10-12^{\circ}\text{C}\cdot\text{vrk}$. Viljalajin kasvuajaksi on annettu 102 vrk. Mikä on sen tehoisan lämpösumman tarve?
 $S_t = T_{kasvu} \cdot S_d = 102 \cdot 11 \approx 1100^{\circ}\text{C}\cdot\text{vrk}$.

Periaatteessa lämpösumman kehittymistä jatkuvasti seuraamalla voidaan arvioida kunakin vuonna kasvun eri vaiheita ja valmistumista. Kuvassa 2.6 on esimerkki lämpösumman kehittymisestä kasvukauden aikana. Keskiarvon lisäksi kuvassa on 2-hajonta rajat. Niiden sisällä on 95% kaikista analyysin vuosista. Jos tarkastellaan



Kuva 2.5: Tehoisan lämpösusman muutos 3. kasvuvyöhykkeellä



Kuva 2.6: Kasvukauden lämpösusman kehitys 2. kasvuvyöhykkeellä vuosina 1970 - 2025, keskiarvo ja 96 % todennäköisyyssrajat

1000 °C·vrk lämpösusmaa, niin se saavutetaan keskimäärin 105 vrk aikana. Hyvinä kesinä se saavutetaan jo 86 vuorokaudessa ja huonoina 170 vuorokaudessa. Tosin huonona vuotena 140 vuorokauden kohdalla ollaan jo lähellä 1000 °C·vrk summaa. Heittoa vuosien välillä voi olla pari - kolme viikkoa.

2.3.2 Säätietojen käyttö

Ilmatieteen laitoksella on yli 400 säämittausasemaa. Näiden säätiedot saa ladattua Ilmatieteen laitoksen nettisivuilta <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus>. Oman sääaseman voi myös perustaa, jolloin saa varmasti oman tilansa alueen säätietoja. Säätietojen avulla voi tehdä arvion siitä, kuinka monena päivänä peltotoimenpiteet on mahdollista tehdä. Tämän avulla voidaan laskea minkä kokoiset koneet tarvitaan.

Säätiedoista pitää rajata aika, jota halutaan tarkastella. Toukokuulle, nurmenkorjuulle ja puinnille on omat aikansa milloin ne tehdään. Rajauksella vaikutetaan myös sään puolesta sopivien työpäivien määrään. Käyttämällä pidempää aikajaksoa saadaan myös useampi sään puolesta käyttökelpoinen työpäivä. Työpäivien (poutapäivien) määrä vaikuttaa taas suoraan koneiden koon valintaan. Jos työpäiviä on enemmän, tarvittavat työkonet ovat pienempiä. Pidempi ajanjakso toisaalta vaikuttaa sadon määrään (ajallisuustappio) ja laatuun (nurmen D-arvo, viljan laatu).

Otetaan esimerkki kevättöiden työpäivistä. Haetaan päivittäisiä säätietoja lähimmältä sääasemalta vaikka kymmenen viimevuoden ajalta toukokuulta. Lasketaan, kuinka monta päivää tuona aikana on ollut, jolloin sade on ollut alle 0,3 mm/vrk. Kuvassa 2.7 on esimerkki Jyväskylän lentoaseman päivittäisistä säätiedoista. Sademäärässä 0 tarkoittaa alle 0,1 mm sadetta ja -1 poutaa.

Säätietoja voidaan käsitellä monella eri ohjelmistolla. Siihen voi käyttää taulukkolaskentaa, tilasto-ohjelmia,

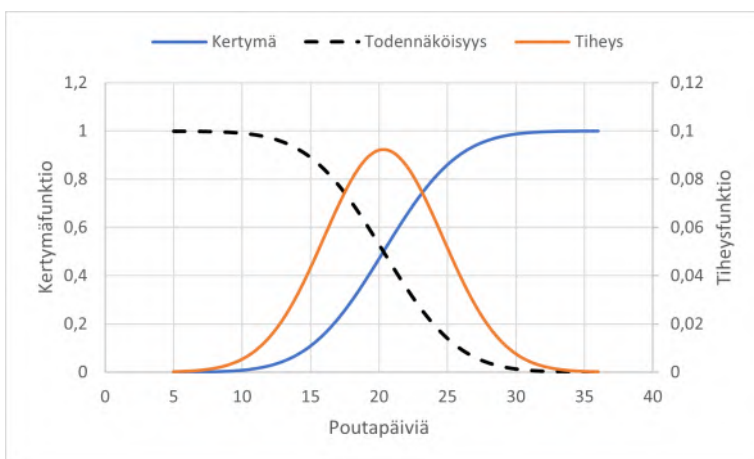
Havaintoasema	Vuosi	Kuukausi	Päivä	Aika (Paikallinen aika)	Sademäärä [mm]	Ilman keskilämpötila [°C]
Jyväskylä lentoasema	2015	1	1	02:00	1,5	2,6
Jyväskylä lentoasema	2015	1	2	02:00	15,9	0,6
Jyväskylä lentoasema	2015	1	3	02:00	1,1	-1,3
Jyväskylä lentoasema	2015	1	4	02:00	0	-6,9
Jyväskylä lentoasema	2015	1	5	02:00	-1	-16,1
Jyväskylä lentoasema	2015	1	6	02:00	0,9	-21,7
Jyväskylä lentoasema	2015	1	7	02:00	5,2	-4,5
Jyväskylä lentoasema	2015	1	8	02:00	6,4	-1,5
Jyväskylä lentoasema	2015	1	9	02:00	2,5	-0,3
Jyväskylä lentoasema	2015	1	10	02:00	0,7	-6,4
Jyväskylä lentoasema	2015	1	11	02:00	0,2	-14,5
Jyväskylä lentoasema	2015	1	12	02:00	5,1	-14,7
Jyväskylä lentoasema	2015	1	13	02:00	3,5	-14,4
Jyväskylä lentoasema	2015	1	14	02:00	1,2	-5,6
Jyväskylä lentoasema	2015	1	15	02:00	3,1	-0,6
Jyväskylä lentoasema	2015	1	16	02:00	5,2	0,2
Jyväskylä lentoasema	2015	1	17	02:00	0,2	1,6
Jyväskylä lentoasema	2015	1	18	02:00	0,5	-0,8
Jyväskylä lentoasema	2015	1	19	02:00	-1	-7,8
Jyväskylä lentoasema	2015	1	20	02:00	-1	-20,3
Jyväskylä lentoasema	2015	1	21	02:00	0,3	-19,1
Jyväskylä lentoasema	2015	1	22	02:00	1,3	-16
Jyväskylä lentoasema	2015	1	23	02:00	1,4	-15,3
Jyväskylä lentoasema	2015	1	24	02:00	0,3	-7,9

Kuva 2.7: Jyväskylän lentoaseman päivittäiset säätiedot vuodesta 2015 vuoden 2025 lokakuuhun [Ilmatieteen laitos]

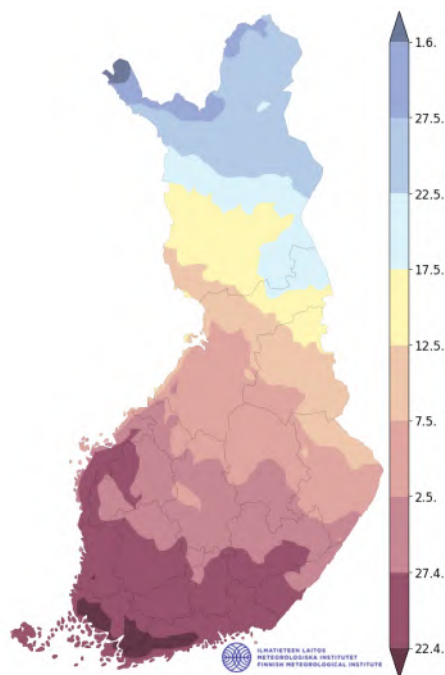
tietokantaohjelmia tai matemaattisia ohjelmia. Tiedot pitää suodattaa eli siitä on valittava tietty aikajakso. Miten se voidaan tehdä vaihtelee ohjelmistosta toiseen. Kappaleessa 6 on esimerkkejä tilasto-ohjelman ja taukkolaskentaohjelman käytöstä.

Kuvassa 2.8 on esimerkki poutapäivistä. Laskennassa on käytetty normaalijakaumaa. Tiheysfunktio on laskettu yhtälön 1.8 mukaan. Excelissä tämä on =NORM.DIST(x; mean; standard_dev; cumulative), jossa x on laskentapiste, mean on keskiarvo (μ), standard_dev on hajonta (σ) ja cumulative on 0 (FALSE). Kertymäfunktio on tiheysfunktion alle jäävä pinta-ala eli integraali laskentapisteeseen asti. Laskentaan käytetään Excelissä samaa funktiota kuin äsken, mutta nyt cumulative on 1 (TRUE). Todennäköisyys saadaan kun vähennetään luvusta 1 kertymäfunktion arvo laskentapisteessä.

Esimerkiksi, jos halutaan poutapäiviä olevan vähintään 15 kpl, todennäköisyys tälle on kuvan 2.8 mukaan 0,9 eli 90 % todennäköisyydellä tämä toteutuu. Kymmenen vuoden jaksossa on odotettavissa keskimäärin että 9 vuotena tämä toteutuu ja yhtenä vuotena ei. Kymmenen vuotta on kuitenkin lyhyt aika todennäköisyyksille, ehkä 100 vuoden jaksossa tämä toteutuu. Odotettavissa kuitenkin on tällainen käyttäytyminen.



Kuva 2.8: Poutapäivien tiheys-, kertymä- ja todennäköisyysfunktiot toukokuulta, kun ajanjaksolla on keskimäärin 20,3 poutapäivää ja hajonta on 4,3 päivää



Kuva 2.9: Termisen kasvukauden alkamisaikoja keskimäärin vuosina 1991 - 2020. [Terminen kasvukausi]

Esimerkki 7. Toukotöiden poutapäiviä on keskimäärin 20,3 ja niiden hajonta on 4,3. Laske mikä on 17 työpäivän todennäköisyys ja mikä on todennäköisyyttä 0,7 vastaava poutapäivien määrä.

Poutapäivämäärän 17 todennäköisyys voidaan laskea Excelin käskyllä $=1-NORM.DIST(17;20,3;4,3;1) = 0,78$ eli 78%. Vastaavasti haluttua todennäköisyyttä 0,7 vastaava poutapäivien määrä käskyllä $=NORM.INV(1-0,7;20,3;4,3) = 18$. Tällaista laskutapaa voidaan käyttää koneiden koon valinnassa.

Kapasiteetilaskuissa täytyy tietää kuinka paljon aikaa on käytettävissä töiden tekemiseen. Riittävän pitkän ajan säätiedoilla voidaan tehdä arvioita työhön sopivista päivistä. Luotettavaan tulokseen suositellaan vähintään 25 vuoden tiedot. Ilmastonmuutos on muuttamassa säitä, joten viimeaikaisempi säätieto voi olla tarkempi, vaikka tarkkuus heikkenee lyhyttä ajanjaksoa käytettäessä. Kapasiteetilaskuissa voidaan valita millä todennäköisyyksillä työ onnistuu ja sen perusteella saadaan kuinka montaa päivää on käytettävissä. Lisäksi pitää arvioida kuinka monta tuntia päivässä on tehokasta työntekoa.

Kevättöiden alku riippuu säästä ja maan kuivumisesta. Terminen kasvukausi alkaa hieman aiemmin kuin kevättyöt, maa ei ole kantavuuden ja muokkautumisen kannalta valmis vielä silloin. Kuvassa 2.9 on termisen kasvukauden keskimääräisiä alkamisaikoja vuosina 1991 - 2020 [Terminen kasvukausi].

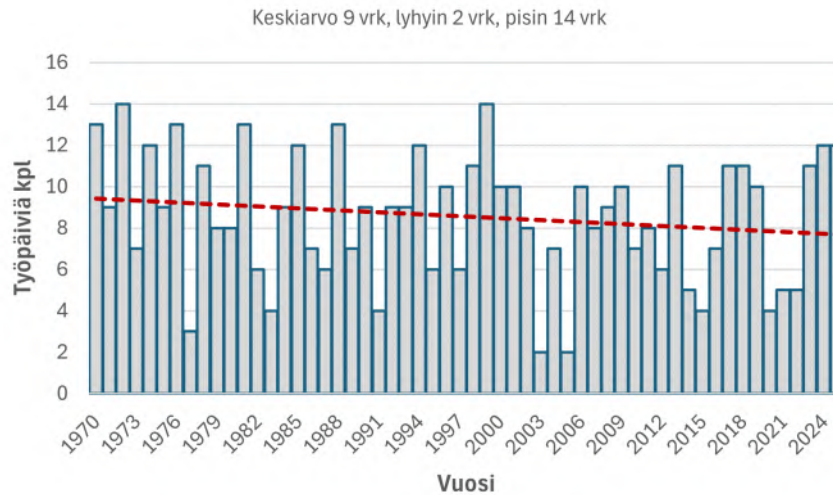
Tässä monisteessa on verrattu eri viljelyvyöhykkeitä siten, että 1. ja 2. vyöhykkeiden säätiedot on haettu Lammilta, 3. vyöhykkeen Jyväskylästä, 4. vyöhykkeen Vieremältä 5. vyöhykkeen Rovaniemeltä tai Ranualta. Analyysissä on käytetty eri kriteerejä, joiden periaate on Laineen [Laine 1996] käyttämissä kriteereissä ja apuna on käytetty taulukon 2.3 sadeluokituksia. Säätietojen analysointi liittyy koneiden koon valinnan perusteisiin. Sen perusteella voidaan miettiä konekokoja ja kapasiteettiä ja valita ne oman tilan ja strategian mukaisiksi käyttäen lähellä olevan sääaseman tietoja. Sää vaihtelevat runsaasti vuosittain ja töitä tehdessä pitää seurata säätiedotuksia ja niiden avulla päättää töistä. Joinakin vuosina voidaan myös joutua muuttamaan suunnitelmia säiden takia, esimerkiksi tarvittavia poutia ei ole. Tätä pitäisi miettiä ennakkoon, mitä silloin tehdään.

2.3.3 Kevättyöt

Työpäivän todennäköisyys on ruotsalaisen tutkimuksen mukaan kevät- ja syystöissä 60% luokkaa [Toro ja Hansson 2004b]. Suomalaisen tutkimuksen mukaan se on 40 - 50 % [Laine 1996]. Tämä tarkoittaa sitä, että kevättöiden aikana noin puolet ajasta voidaan käyttää työn tekoon. Jos esimerkiksi koko kevättyöjakson pituus on 20 vrk, tästä on 10 vrk käyttökelpoisia eli poutaa. Kuvan 2.3 mukaan kevään sademäärät voivat vaihdella runsaasti, jolloin myös vuotuiset käyttökelpoisten työpäivien vaihtelut ovat suuria. Kevättöiden alkuja voidaan arvioida kuvan 2.9 perusteella lisäämällä noin viikon viive alueen termisen kasvukauden alkuun. Tämän perusteella saadaan taulukko 2.5. Tätä taulukkoa käytetään kevättöiden säädatojen analysoinnissa tässä monisteessa. Oman tilan säädatojen käsittelyssä kannattaa käyttää oman tilan keskimääräisiä aloitusaikoja.

Taulukko 2.5: Termisen kasvukauden alku ja arvioitu kevättöiden alku

Viljelyvyöhyke	Termisen kasvukauden alku	Arvioitu toukotöiden alku	Analyyssissä käytetty alkupäivä
1 ja 2	22.4. - 27.4.	29.4. - 4.5.	1.5.
3	27.4. - 2.5.	4.5. - 9.5.	7.5.
4	2.5. - 12.5.	9.5. - 19.5.	14.5.
5	1.5. - 7.6.	8.5. - 14.6.	26.5.



Kuva 2.10: Toukotöiden poutapäivien määrät 3. vyöhykkeellä 7.5. - 20.5. välisenä aikana. Poutaraja 0,3 mm/vrk ja edellisen päivän sade ≤ 1 mm/vrk.

Poutapäivät eivät yksin ratkaise toukotöiden tekoa. Pellon pitää kantaa koneet ja maan pitää olla muokattavassa kunnossa. Myöskin rankkasateet voivat keskeyttää työt useaksi päiväksi. Poutapäivien määrä antaa jonkinlaisen pohjan käytettävissä olevien työpäivien laskennalle. Asiaa helpottaa se, että kylvöjä voidaan jatkaa laskennassa käytetyn ajanjakson jälkeenkin, tosin sato heikkenee. Käytännössä peltolohkot kuivuvat erilailla, jolloin työt voidaan ajoittaa sen mukaan pidemmälle ajalle. Savimaat kuivuvat nopeimmin ja niille suositellaan viikon kestävästä kylvöaika. Pintaäestyksellä kuivumista voidaan vähentää, jolloin käytettävissä oleva työaika pitenee. Satotappio kuitenkin suurenee eli ajallisuuskustannus tulee tällöin kuvaan mukaan.

Tarkastellaan esimerkiksi poutapäivien määriä 3. kasvuyöhykkeellä, kuva 2.10. Vähimmillään poutapäiviä on ollut 2 kpl ja enimmillään koko jakso on ollut poutaa (14 vrk). Keskiarvo on 8,6 vrk ja hajonta 3,1 vrk. Poudan todennäköisyys on $\frac{8,6}{14} = 61\%$. Toukutyöt riippuvat poudan lisäksi maan kunnosta, se voi sateiden takia olla liian märkä. Poutapäivissä on laskeva trendi, 1970 luvulla niitä oli 9 kpl ja 2020 luvulla 8 kpl.

Kevättöiden poutapäiville käytettiin tässä monisteessa kahta kriteeriä.

1. Poutainen jakso, työpäivän sade $\leq 0,3$ mm/vrk ja edeltävän päivän sade ≤ 1 mm/vrk.
2. Kosteaa jakso, työpäivän sade ≤ 1 mm ja edeltävän päivän sade ≤ 5 mm/vrk.

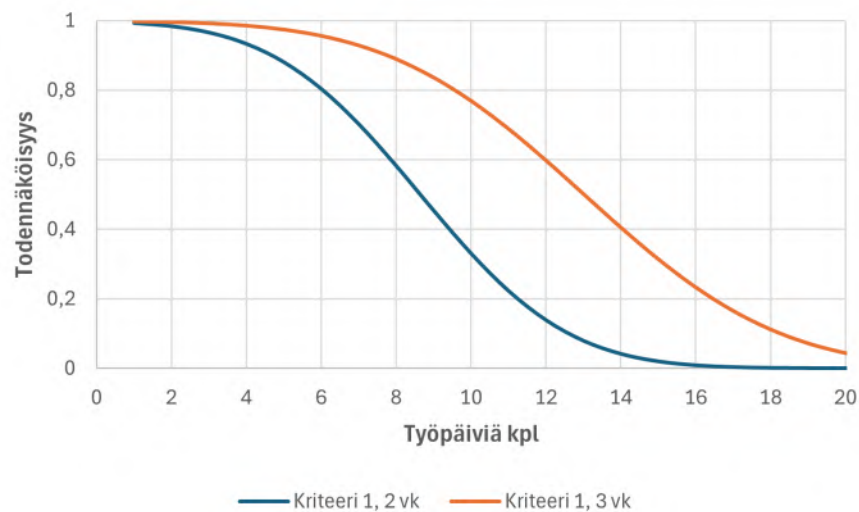
Näiden kriteerien mukaan on laskettu esimerkit eri viljelyvyöhykkeille, taulukko 2.6. Jaksojen pituutena on käytetty kahta ja kolmea viikkoa. Kriteerin 1. mukaan todennäköisyydet poudalle ovat olleet luokkaa 50 - 60 %. Kostealla jaksolla (kriteeri 2) vastaavasti on saatu 60 - 70 % luokkaa olevia todennäköisyyksiä. Taulukon alemmassa osassa on vastaavasti työpäivien määrä. Kun halutaan tehdä kevättyöt kahden viikon aikana, työpäiviä on kriteeristä riippuen 6 - 11 kpl. Kriteeriä ja jakson pituutta muutettaessa työpäivien määrä kasvaa. Ongelmaksi tulevat vuodet, jolloin poutapäiviä on vähän.

Keskiarvoihin perustuva laskenta antaa todennäköisyyden 50 % varmuudella eli keskimäärin joka toisena vuotena se toteutuu. Jos halutaan katsoa tarkemmin todennäköisyyksiä, silloin keskiarvon ja hajonnan perusteella voidaan laskea normaalijakauman mukaisia todennäköisyyksiä myös muilla arvoilla. Kuvassa 2.11 on laskettu toukotöiden todennäköisyyksiä 3. kasvuyöhykkeen arvoilla. Jos halutaan esimerkiksi 80 % todennäköisyys, silloin 2 viikon jaksolla meillä olisi käytettävissä 6 työpäivää ja kolmen viikon jaksolla 10 työpäivää. Tällöin kahden viikon jaksossa keskimäärin kahdeksana vuotena kymmenestä mitoitus on oikea ja kahtena vuotena olisi pidempiä tai lyhyempiä poutajaksoja.

Taulukko 2.6: Toukotöiden todennäköisyydet ja työpäivien määrät

Kasvuvyöhyke	Kriteeri 1 Todennäköisyys		Kriteeri 2 Todennäköisyys	
	2 vk jakso	3 vk jakso	2 vk jakso	3 vk jakso
1. ja 2.	0,62	0,62	0,75	0,75
3.	0,61	0,57	0,75	0,72
4.	0,54	0,52	0,64	0,64
5.	0,47	0,49	0,65	0,66

Kasvuvyöhyke	Kriteeri 1 Työpäiviä		Kriteeri 2 Työpäiviä	
	2 vk jakso	3 vk jakso	2 vk jakso	3 vk jakso
1. ja 2.	9	13	11	16
3.	9	12	11	15
4.	8	11	9	13
5.	6	10	9	14



Kuva 2.11: Poutapäivien todennäköisyys 3. kasvuvyöhykkeellä kriteerin ollessa 'poutainen' ja jakson pituuden ollessa 2 ja 3 viikkoa.

Esimerkki 8. Tilan pinta-ala on 120 ha. Kevättöihin halutaan käyttää korkeintaan kolmen viikon jaksoa ja sille halutaan 70% todennäköisyys. Mikä pitää olla kapasiteetin suuruus, kun poutajaksojen laskennassa on saatu keskiarvoksi 13,0 vrk ja hajonnaksi 4,1 vrk?

Excelissä yhtälöllä $=NORM.INV(1-0,7;13,0;4,1)$ saadaan tulokseksi 11 vrk. Työtunteja on $9 \cdot 11 = 99$ h ja työsaavutuksen pitää olla $\frac{120ha}{99h} = 1,2$ ha/h.

2.3.4 Nurmisadon korjuu

Nurmisadon korjuussa rehun laatu on oleellinen tekijä. Rehun sulavuutta kuvaa D-arvo. Se ilmaisee, kuinka suuri osa kuiva-aineesta on sellaista, jota eläin pystyy sulattamaan. D-arvo ilmoitetaan kuiva-ainekilon sisältäminä grammoina, g/kg ka tai sulavan osuuden prosenttia kuiva-ainemäärästä. Sulavuus on normaalisti tuorerehun korjuussa 600 - 700 g/kg ka. Korkea sulavuus saadaan aikaisessa korjuussa ja myöhäisessä korjuussa saadaan alhaisempi sulavuus heinä jo korsiutussa. Vastaavasti aikaisessa korjuussa satotaso on alhaisempi. Lisäksi pitää ottaa huomioon eläin eli lehmä. D-arvo vaikuttaa maidon tuotokseen siten, että sulavampi rehu antaa enemmän maitoa.

Säilörehun korjuussa voidaan korjata joko kaksi tai kolme satoa. Nurmen sulavuusarvo (D-arvo) määrittää korjuun aloitusajankohdan. Suosituksena on 680 - 700 g/kg ka arvo. D-arvon ennustetta voi seurata Karpe palvelusta. Kasvustosta voi myös ottaa näytteitä ja lähettää ne analysoitavaksi. Taulukossa 2.7 on Karpe palvelun perusteella saadut keskimääräiset ajankohdat, jolloin D-arvo saavuttanut 700 g/kg ka arvon. Lisäksi siinä on D-arvon alenemanopeudet. Toinen nurmisato korjataan 5-8 viikkoa ensimmäisen jälkeen ja Etelä-Suomessa voidaan korjata myös kolmas sato. Silloin toisen sadon korjuuta aikaistetaan ja kolmas sato korjataan 5-6 viikkoa toisen jälkeen.

Taulukko 2.7: D-arvon mukaisia säilörehun korjuuajankohtia ja korjuujakson pituuksia v 2021 - 2025 [Karpe]

Kasvuyöhyke	D-arvo 700 g/kg ka	Alenema vrk 700 → 650 g/kg ka	
		Lyhin vrk	Pisin vrk
Vyöhyke 1 ja 2	5.6.	5	9
Vyöhyke 3	14.6.	5	10
Vyöhyke 4	17.6.	5	11
Vyöhyke 5	24.6.	5	10

Korjuutavasta riippuu mitä vaatimuksia sillä on. Suoraan silppurilla korjatun tuoresäilörehun kuiva-ainepitoisuus on 20 - 25%. Esikuivatun siilorehun tavoitteena on 30 - 35% kuiva-ainepitoisuus ja esikuivatun paalirehun 35 - 45% kuiva-ainepitoisuus. Esikuivaus 30 % kuiva-ainepitoisuuteen estää puristenesteen irtoamisen eikä rehu jäädy talvella. Paalien käärintää varten kuiva-ainepitoisuus pitäisi olla 40 - 45 %. Näihin kuiva-ainepitoisuuksiin pääsyyn tarvitaan kuivumisaika, mikä riippuu säästä ja nurmen käsittelystä. Kuivuminen voi tapahtua muutaman tunnin aikana tai siihen voi mennä vuorokauden tai parin vuorokauden verran. Käsittelyllä, kuten murskauksella ja pöyhinnällä, voidaan tehostaa kuivumista.

Nurmen korjuusta v 2019 86 % tapahtui esikuivattuna, tuoresäilörehun osuus oli 6 % ja kuivaheinän osuus oli 4 %. Loppu 4 % oli muuta säilörehua, kuten kokovilja- ja vihantaviljasäilörehu. Säilörehujen kuiva-ainepitoisuudet olivat vuosina 2016 - 2019 1. sadossa 35 - 42 % eli ne olivat esikuivatun siilorehun ja paalirehun korjuuvaatimusten mukaisia. Toisen sadon kuiva-ainepitoisuudet olivat 29 - 41 % ja kolmannen 27 - 35 %. [Hellstedt ja Virkkunen(2020)]

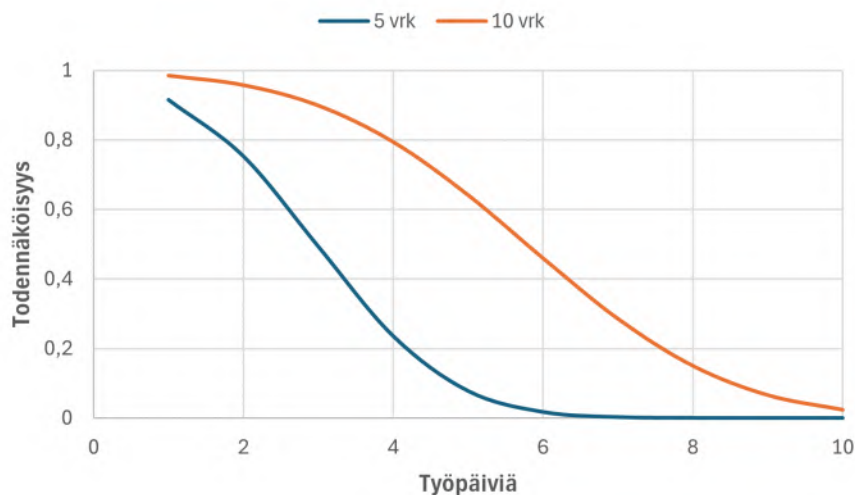
Tuoresäilörehu

Tuoresäilörehun etuna on, että sitä voidaan korjata vaikka sateella, jolloin periaatteessa korjausaika on osittain säästä riippumaton. Tosin pieni kuiva-ainepitoisuus eli suuri sadon vesimäärä tuottaa enemmän puristenestettä, jäätymisongelmia ja sato on myös herkemmin pilaantuvaa. Korjuuaika voidaan valita D-arvon alenemisnopeudesta, taulukko 2.7. D-arvo laskee 5 - 10 yksikköä/vrk, jolloin 50 yksikön (700 -> 650) lasku kestää 5 - 10 vrk vuodesta riippuen. Tätä voidaan käyttää koneiden koon valinnan perustana. Jos satoa ei keretä korjaamaan tässä ajassa, seurauksena on alentunut D-arvo.

Jos halutaan korjata satoa vain poutapäivinä, silloin saadaan eri paikkakuntien säätiedoista taulukon 2.8 mukainen tulos. Kun tarkastelujakson pituus on 5 vrk, korjuuaikana keskimäärin 3 vrk on sateetonta. Jos käytetään 10 vrk jaksoa, silloin poutapäiviä on 5 - 6 kpl. Nämä ovat keskiarvoja, joinain vuosina ei ole yhtään poutapäivää, toisinaan taas koko jakso on poutaa.

Taulukko 2.8: Tuoresäilörehun poutapäivien määrien keskiarvot ja todennäköisyydet eri kasvuvyöhykkeillä. Korjuuajankohta on taulukon 2.7 mukainen.

Kasvuvyöhyke	5 vrk jakso		10 vrk jakso	
	Työpäiviä	Todennäköisyys	Työpäiviä	Todennäköisyys
Vyöhyke 1 ja 2	3,3	0,65	6,1	0,61
Vyöhyke 3	2,9	0,59	6,1	0,61
Vyöhyke 4	2,7	0,54	5,5	0,55
Vyöhyke 5	3,0	0,60	5,4	0,54



Kuva 2.12: Tuorerehun korjuun poutapäivien todennäköisyydet, käyrät ovat kasvuvyöhykkeiden keskiarvoja

Kuvaan 2.12 on piirretty hajonnan ja keskiarvon perusteella poutapäivien todennäköisyydet 5 ja 10 vrk jaksoissa kaikkien vyöhykkeiden keskiarvoina. Jos esimerkiksi halutaan 70% todennäköisyys, 5 vrk jaksossa on 2 poutapäivää ja 10 vrk jaksossa 5 poutapäivää. Analyysissä on tarkasteltu vain kokonaan poutaisia vuorokausia. Vuorokaudessa voi olla poutaisia jaksoja, jolloin korjuu on mahdollista. Jos tätä haluttaisiin tarkastella, silloin pitäisi käyttää tuntikohtaisia säätietoja.

Kun koneiden kokoa valitaan, pitää päättää käytetäänkö pelkästään poutapäivä ja millä todennäköisyydellä halutaan näitä päiviä. Sinänsä sateet eivät haittaa tuoresäilörehun korjuuta samalla lailla kuin esikuivatun rehun korjuuta.

Esimerkki 9. *Nurmiala on 45 ha ja tilalla on päätetty käyttää tuoresäilörehua. Millainen konekapasiteetti tarvitaan, kun päivässä on tehokkaita työtunteja 10 h ja sato halutaan korjata poudan aikana?*

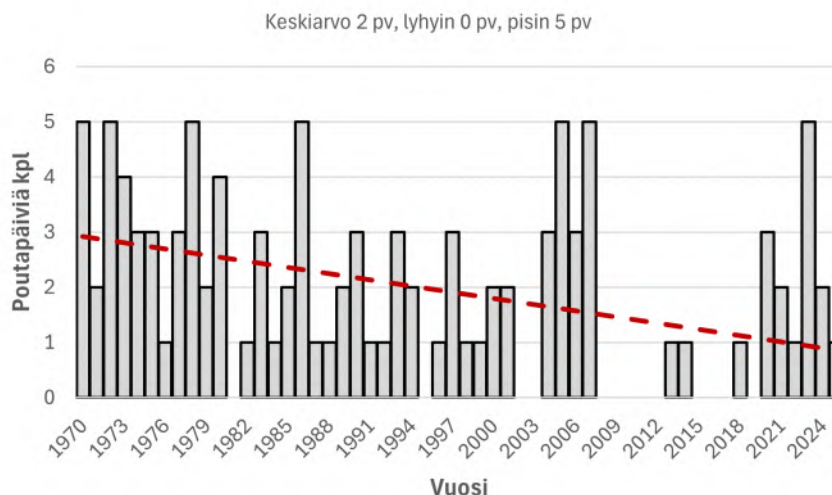
Ensiksi pitää valita haluttu strategia, millä todennäköisyydellä on poutaa ja halutaanko se 5 vai 10 vrk jaksossa. Tehdään kompromissi, valitaan 70 % todennäköisyys. 5 vrk jaksossa on n 3 poutapäivää ja 10 vrk jaksossa n 5 poutapäivää, kuva 2.12. Valitaan 4 päivän strategia. Tällöin käytettävissä on $4 \cdot 10 = 40$ työtuntia ja kapasiteetin tarve on $\frac{45 \text{ ha}}{10 \text{ h}} = 4,5 \text{ ha/h}$. Tämä on koko koneketjun kapasiteetti, kuljetusten ja varastoinnin pitää myös toimia tämän perusteella.

Esikuivattu säilörehu

Tarkastellaan 4. kasvuvyöhykkeen säätietoja 17.6. - 21.6. väliseltä ajalta. Poutapäivien määrät on kuvassa 2.13. Useana vuonna käytetyn kriteerin mukaisia työpäiviä ei ole ollut yhtään, joinakin vuosina on taasen ollut koko ajanjakson poutaa. Poudan todennäköisyys on $\frac{2}{5} = 40\%$. Poutapäivien määrän trendi on laskeva, 1970 luvulla niitä oli keskimäärin 3 kpl ja 2020 luvulla 1 kpl. Viisi vuorokautta on tällaisessä tarkastelussa lyhyt tarkastelujakso, kun tietoja haetaan usealta vuodelta. Käytännössä joudutaan turvautumaan sääennusteisiin korjuuajan valinnassa. Tässä säätietoja käytetään koneiden koon valintaan.

Säilörehun korjuupäivien arvioinnissa on käytetty kolmea kriteeriä.

- Hyvä korjuusää, työpäivän sade $< 0,3$ ja edellisen päivän sade $< 0,3$ mm/vrk. Tämä tarkoittaa kahta peräkkäistä poutapäivää.
- Kostea korjuusää, työpäivän sade $< 0,3$ ja edellisen päivän sade $\leq 0,6$ mm/vrk. Työpäivä on poutainen,



Kuva 2.13: Esimerkki poutapäivien määrästä 4. kasvuvyöhykkeellä 17.6. - 21.6. välisenä ajanjaksona. Työpäivän sade < 0,3 mm/vrk ja edellisen päivän sade ≤ 0,6 mm/vrk.

edellisenä päivänä on ollut vähäinen sade.

- Märkä korjuusää, työpäivän sade < 0,3 ja edellisen päivän sade ≤ 3 mm/vrk. Työpäivä on poutainen ja edellisenä päivänä on ollut 'normaali' sade.

Kuvassa 2.9 on esimerkki miten nämä kriteerit ja jaksojen pituudet vaikuttavat poutapäivien määrään. Säätiidot on valittu kultakin vyöhykkeeltä taulukon 2.7 mukaisesti. Jos katsotaan 5 korjuupäivän tuloksia, niin käytettävissä on melkein kriteereistä riippumatta 2 - 3 työpäivää. 10 päivän jaksoa käytettäessä on 4 - 5 työpäivää. Työpäivän todennäköisyys on luokkaa 40 - 50 %.

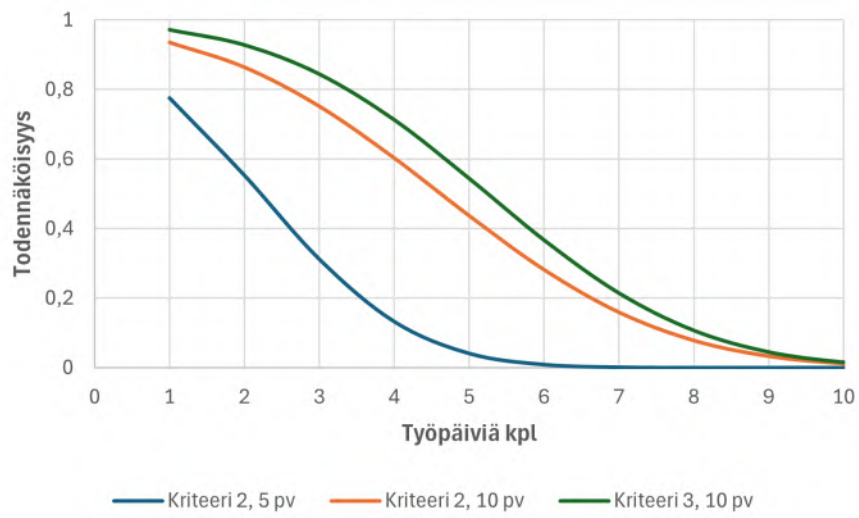
Taulukko 2.9: Säilörehun korjuupäivien määrän todennäköisyyksiä käytettäessä kolmea kriteeriä ja kahta korjuuajan pituutta.

Kasvuvyöhyke	Kriteeri 1 Todennäköisyys		Kriteeri 2 Todennäköisyys		Kriteeri 3 Todennäköisyys	
	5 vrk jakso	10 vrk jakso	5 vrk jakso	10 vrk jakso	5 vrk jakso	10 vrk jakso
	1. ja 2.	0,47	0,44	0,44	0,48	0,58
3.	0,42	0,44	0,44	0,46	0,51	0,53
4.	0,35	0,37	0,38	0,39	0,44	0,46
5.	0,45	0,40	0,47	0,42	0,53	0,47

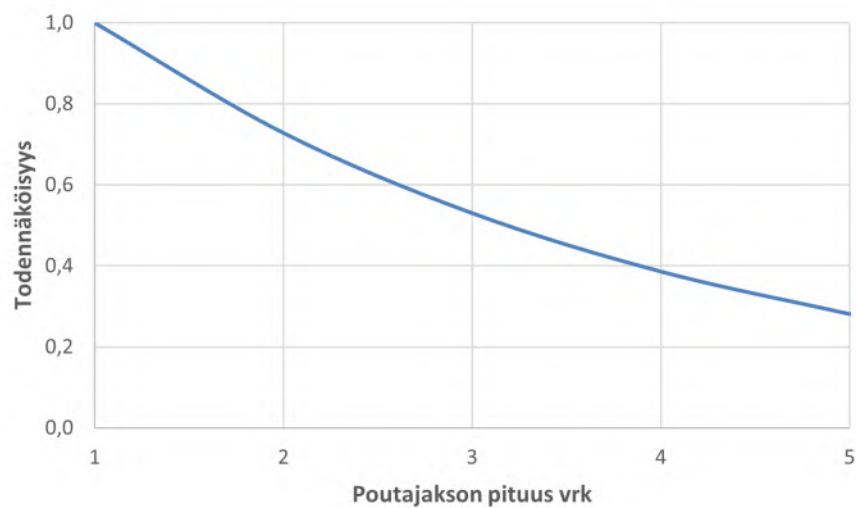
Kasvuvyöhyke	Kriteeri 1 Työpäiviä		Kriteeri 2 Työpäiviä		Kriteeri 3 Todennäköisyys	
	5 vrk jakso	10 vrk jakso	5 vrk jakso	10 vrk jakso	5 vrk jakso	10 vrk jakso
	1. ja 2.	2	4	3	5	3
3.	2	4	2	5	2	5
4.	2	4	2	4	2	5
5.	2	4	2	4	3	5

Kuvassa 2.14 on poutapäivien todennäköisyyksiä 3. kasvuvyöhykkeellä. 5 päivän analysointijakso antaa 80% todennäköisyydellä yhden poutapäivän. Jos haluamme neljä työpäivää, silloin 10 pv jaksossa todennäköisyys on 60 - 70%.

Kuvassa 2.15 on Markovin ketjun mukaan laskettu poudan pituuden todennäköisyys. Työ on aloitettu poutapäivänä ja todennäköisyys sille on sen takia 100%. Todennäköisyys kahdelle peräkkäiselle poutapäivälle on n 70%. Kolmen peräkkäisen poutapäivän todennäköisyys on n 50% ja neljän 40 %. Esimerkiksi kahden päivän poutajakson todennäköisyys toteutuu keskimäärin 7 vuotena kymmenestä. Käytännössä pitää seurata sääennustuksia ja sen perusteella valita työt. Kuvan 2.14 normaalijakauman mukainen todennäköisyys on yksittäisten mahdollisesti erillisten poutapäivien todennäköisyys, kun taasen Markovin ketju analysoi peräkkäisten poutapäivien todennäköisyyttä.



Kuva 2.14: Poutapäivien todennäköisyyksiä 3. kasvuyöhykkeellä



Kuva 2.15: Poutajakson pituuden todennäköisyys 3. kasvuyöhykkeellä käytettäessä 10 päivän jaksoa kriteerin 2 mukaan.

Taulukko 2.10: D-arvon mukaisia hevosheinän korjuuajankohtia ja korjuujakson pituuksia v 2021 - 2025 [Karpe]

Kasvuyöhyke	D-arvo 600 g/kg ka
Vyöhyke 1 ja 2	29.6.
Vyöhyke 3	2.7.
Vyöhyke 4	4.7.
Vyöhyke 5	10.7.

Esimerkki 10. *Nurmisato halutaan korjata esikuivattuna. Kuivumisajaksi valitaan 1 vrk, mikä tarkoittaa sitä, että niiton jälkeen on oltava vuorokauden verran poutaa. Nurmialaa on 80 ha. Mikä on tarvittava konekapasiteetti, kun tila on 3. kasvuyöhykkeellä?*

Käytetään 10 vrk korjuu-aikaa, 3. kasvuyöhykkeellä on taulukon 2.9 mukaan 4 - 5 poutapäivää keskimäärin tuona aikana. Tämä tarkoittaa 50% todennäköisyydellä sitä, että keskimäärin viitenä vuotena kymmenestä tämä onnistuu. Muina vuosina voi olla vähemmän tai enemmän päiviä käytettävissä. Tarvittava kapasiteetti on $\frac{80}{5} = 16$ ha/vrk.

Kuivan heinän korjuu

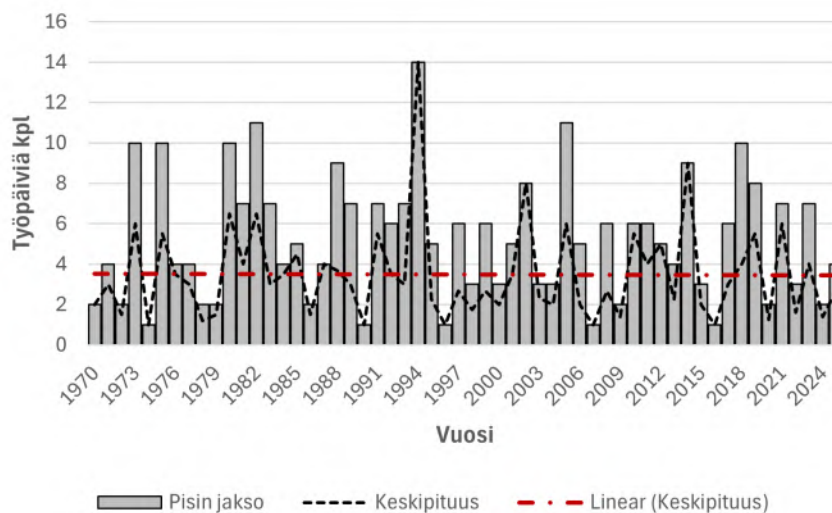
Kuivan heinän korjuun suosituksena on niitto juuri ennen kukintaa. Tällöin ravintoarvo ja sulavuus ovat parhaimmillaan. Kuivan heinän korjuussa riskit ovat suuremmat, koska heinän kuivuminen pelolla vaatii usean vuorokauden poutajakson. Kasvuston kehittymisen lisäksi on seurattava sääennusteita ja korjuu on aloitettava, kun riittäviä poutajaksoja on odotettavissa. Jos heinän kuivuminen tapahtuu pellolla, tällöin tarvitaan lämpötilasta, auringonpaisteesta ja tuulesta riippuen 3 - 5 vrk. Jos heinä esikuivataan pellolla ja loppukuivaus tapahtuu ladossa, silloin 2 - 3 vrk pouta riittää.

Kuivaheinää käytetään enimmäkseen hevosten ruokinnassa. Silloin D-arvon tavoite on 600 - 620 g/kg ka. Karpe palvelun [Karpe] avulla voidaan arvioida milloin tämä keskimäärin saavutetaan, taulukko 2.10.

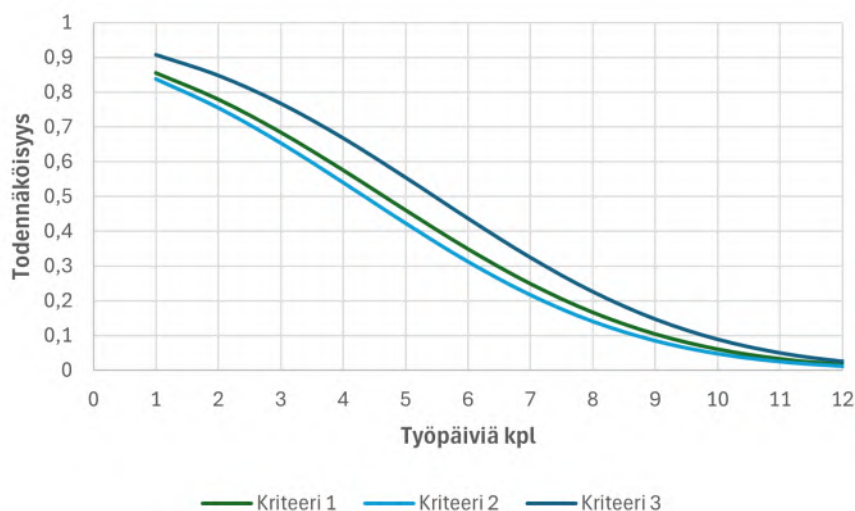
Kuivan heinän korjuussa käytetään kolmea eri kriteeriä.

1. Kolmen päivän pouta, korjuupäivänä ja kahden tätä edeltävän vuorokauden sade on $< 0,3$ mm/vrk
2. Työpäivänä ja edeltävänä päivänä pouta $< 0,3$ mm/vrk, sitä edeltävänä päivänä vähäinen sade $\leq 0,6$ mm/vrk
3. Työpäivänä pouta $< 0,3$ mm/vrk, edeltävänä päivänä vähäinen sade $\leq 0,6$ mm/vrk, sitä edeltävänä päivänä sade ≤ 3 mm/vrk

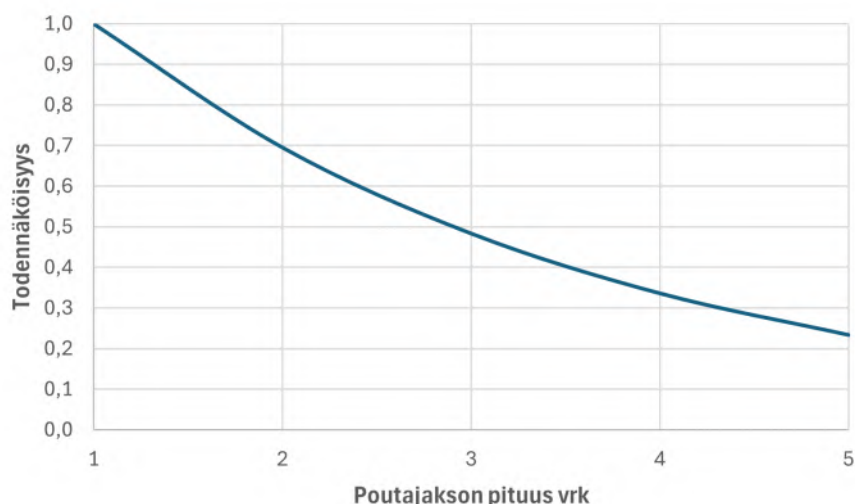
Tarkastellaan 3. kasvuyöhykkeen säätietoja 2.7. - 15.7. väliseltä ajalta. Poutajaksojen keskipituudet ja pisimpien jaksojen pituudet ovat kuvassa 2.16. Vähimmillään on ollut yksi poutapäivä, enimmillään on ollut 14 päivän pouta. Keskimäärin on ollut 4 poutapäivää, jolloin poudan todennäköisyys on $\frac{4}{14} = 29\%$. Poutapäivien määrän trendi on pysynyt samana.



Kuva 2.16: Poutapäivien keskipituus ja pisimmän jakson pituus 3. vyöhykkeellä 2.7. - 15.7. välisenä ajanjaksona. Poudan saderaja 0,3 mm, Linear (Keskipituus) = trendi.



Kuva 2.17: Poutapäivien normaali jakaumat 3. kasvuyöhykkeellä 2.7. - 15.7. välisenä aikana kolmen eri kriteerin mukaan



Kuva 2.18: 3. kasvuyöhykkeen poutapäivien analyysi 2.7 - 15.7. välisenä aikana, kun poutapäivän saderaja on 0,3 mm

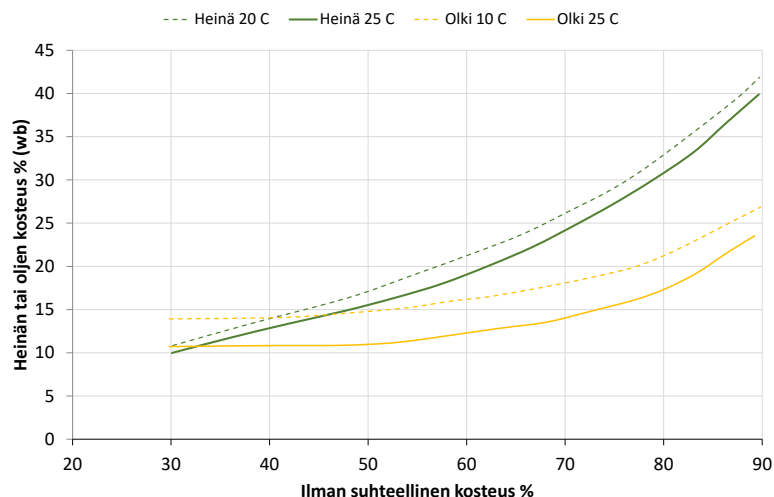
Kuvassa 2.17 on eri olevien kriteerien mukaisista poutapäivien todennäköisyyksistä 3. kasvuyöhykkeellä. Ensimmäinen ja toinen kriteeri ovat melko lähellä toisiaan, kolmas muita sateisempi kriteeri poikkeaa näistä. Esimerkiksi 70% todennäköisyydellä työpäiviä on kriteeristä riippuen 2 - 4 kpl.

Kuvassa 2.18 on esimerkki säätietojen Markov analyysistä. Sen mukaan kolmen päivän poutajakson todennäköisyys on 50 % eli keskimäärin joka toinen vuosi.

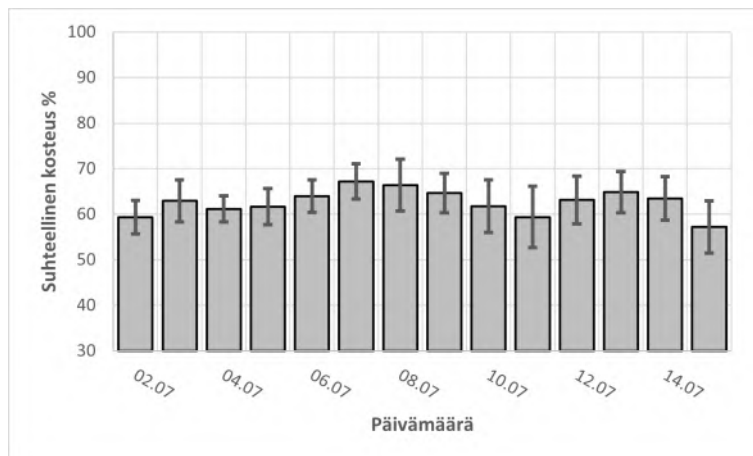
Esimerkki 11. *Kuivan heinän korjuuajan poutajaksojen todennäköisyys on kuvan 2.18 mukainen. Heinäalaa on 35 ha. Mikä pitäisi latokuivauksen tapauksessa olla korjuukapasiteetti?*

Latokuivausta käytettäessä esikuivaukseen pellolla riittää pari päivää ja hyvällä säällä lyhyempikin aika. Katsotaan kuvasta 2.18 2 päivän pituisen poutajakson todennäköisyys, joka on 70 %. Tämä tarkoittaa sitä, että 7 vuotta kymmenestä korjuun pitäisi keskimäärin onnistua. Jos päivässä on tehollisia työtunteja 10 h, meillä on kaikkiaan 20 h aikaa suoritua korjuusta. Tämä tarkoittaa sitä, että meidän koneketjujen pitäisi suoritua 1,8 ha alasta tunnissa. Tuon perusteella meidän pitäisi suunnitella koneketjut.

Kuivan heinän kosteus pitää saada alle 20%, mieluiten lähelle 15% kosteutta, jotta se säilyisi pilaantumatta. Vastaava ilman tasapainokosteus on 50 - 60%, kuva 2.19. Tämä tarkoittaa sitä, että tuohon kosteuteen päästään vain, jos ilmankosteus on tuota luokkaa. Kuvassa 2.20 on esimerkki ilman keskimääräisestä kosteudesta 3. kasvuyöhykkeellä heinäkorjuu-aikaan päivällä. Ilman kosteus on ollut keskimäärin 60 - 70% luokkaa, jolloin



Kuva 2.19: Heinän ja oljen tasapainokosteus



Kuva 2.20: Ilman kosteuden keskiarvot ja hajonnat vuosilta 2006 - 2025 klo 10 - 22 välisenä aikana 3. kasvuvyöhykkeellä.

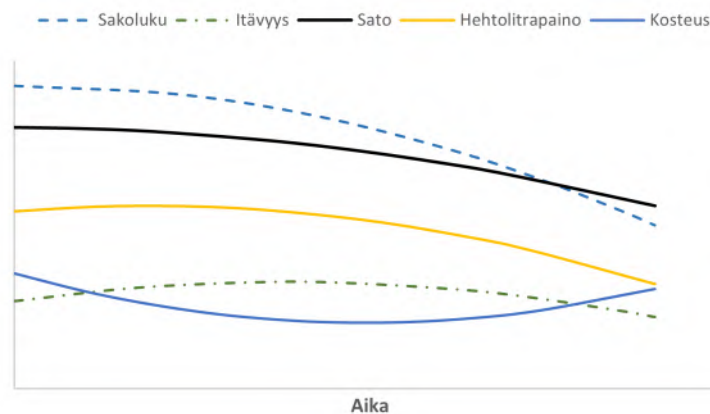
heinän kosteus jää yli 20 %. Yön aikana ilma on kosteampaa, jolloin heinä kostuu hieman.

Ilman kosteus ei pelkästään vaikuta kuivumiseen, auringonpaiste tehostaa kuivumista, koska se lämmittää karhoa ja pienentää ilman kosteutta. Tuuli taas siirtää kosteutta tehokkaasti pois. Lisäksi murskaus ja pöyhintä tehostavat korsien kuivumista. Varastointikosteuteen pääseminen on pellolla keskimäärin erittäin vaikeaa, kuivina vuosina onnistuu, tavanomaisina ei enää kunnolla onnistu.

2.3.5 Viljan puinti

Vilja valmistuu lopulliseen koostumukseen keltatuleentumisvaiheessa. Lehtivihreä häviää jyvistä ja sen kosteus on 30 - 40 %. Siemenviljan ja mallasohran puinnin aloittamisen suosituksena on alle 25% kosteus. Kosteampana puinti alentaa selvästi itävyä. Sakoluku muuttuu korjuuajana eniten. Se on kytköksissä jyvän itämiseen, itäessä tarkkelys hajoaa sokereiksi ja leivontaominaisuudet heikentyvät. Viljan ominaisuudet keltatuleentumisen jälkeen muuttuvat kuvan 2.21 mukaisesti. Keltatuleentumisesta viljan ominaisuudet pysyvät pari viikkoa lähes samana, minkä jälkeen alkaa ominaisuuksien muuttuminen. Rehuviljan puinnin ajankohta ei ole yhtä tarkka kuin leipä-, siemen- ja mallasviljan. Puinnin viivästyminen ei haittaa, jos kasvusto on pystyssä eikä varise. [Järvenpää ja Laurola]

Puintikauden alkua ja kesto vaihtelevat hyvin suuresti ja tarkka arviointi on hankalaa. Puintipäivä riippuu kylvöajankohdasta ja lämpösuumakertymästä. Lämpösuumman sijaan eri viljoille ja lajikkeille on annettu kasvukauden pituuksia. Lämpösuumma on tarkempi kuin kasvukauden pituus, koska se ottaa huomioon kasvukauden



Kuva 2.21: Viljan ominaisuuksien muuttuminen keltatuleentumisesta lähtien

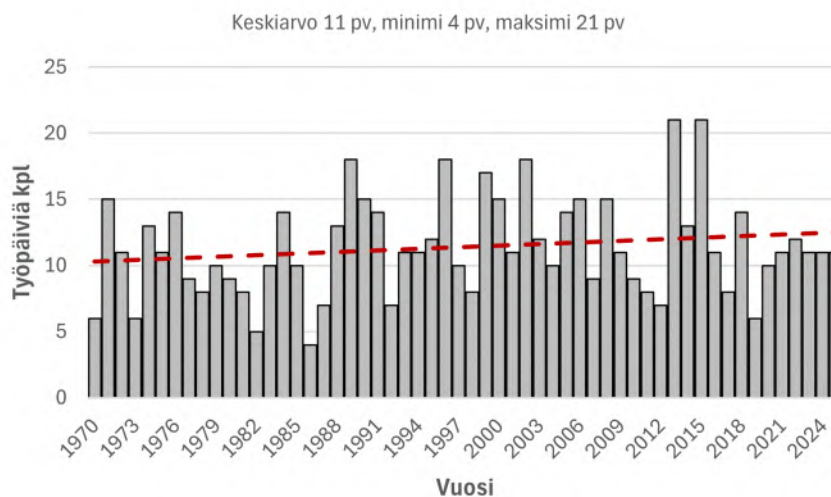
Taulukko 2.11: Viljan puintien alku- ja loppupäivät analyysissä

Kasvuyöhyke	Puinnin aloitus	Puinnin lopetus
1. ja 2. kasvuyöhyke, 90 vrk kasvukausi	13.8.	15.9.
3. kasvuyöhyke, 90 vrk kasvukausi	19.8.	15.9.
4. kasvuyöhyke, 80 vrk kasvukausi	16.8.	22.9.
5. kasvuyöhyke, 80 vrk kasvukausi	26.8.	22.9.

lämpötilat. Lämpösummaa seuraamalla voidaan arvioida valmistumisajankohta.

Taulukossa 2.11 on analysoinnissa käytetyt eri kasvukauden puinnin aloitus- ja lopetuspäivät. Ne on saatu lisäämällä toukotöiden aloitusaikaan (taulukko 2.5) viikko orastumiseen ja viikko kypsymiseen kasvukauden lopussa. Kasvukauden pituutena on käytetty 1 - 3 kasvuyöhykkeellä 90 vrk ja 4 -5 kasvuyöhykkeellä 80 vrk.

Kuvassa 2.22 on esimerkki puintipäivien määrästä. Käytetyn kriteerin mukaan ajanjaksolla on keskimäärin 11 puintipäivää ja todennäköisyys on $\frac{11}{28} = 39\%$. Puintipäivien trendi on hieman noussut vuosien aikana.

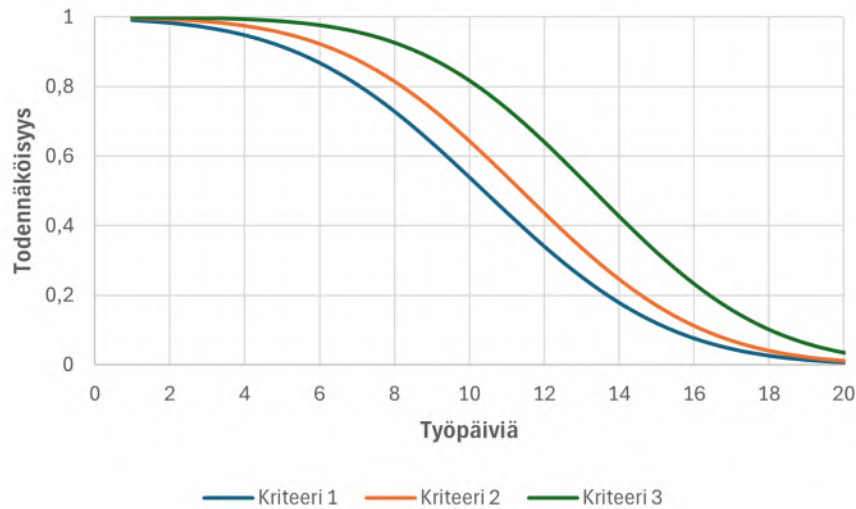


Kuva 2.22: Puintipäivien määrä 3. kasvuyöhykkeellä, puintipäivän sade <0,3 mm/vrk ja edellisen päivän sade ≤ 0,6 mm/vrk

Korjuupäivien arvioinnissa käytettiin kolmea kriteeriä.

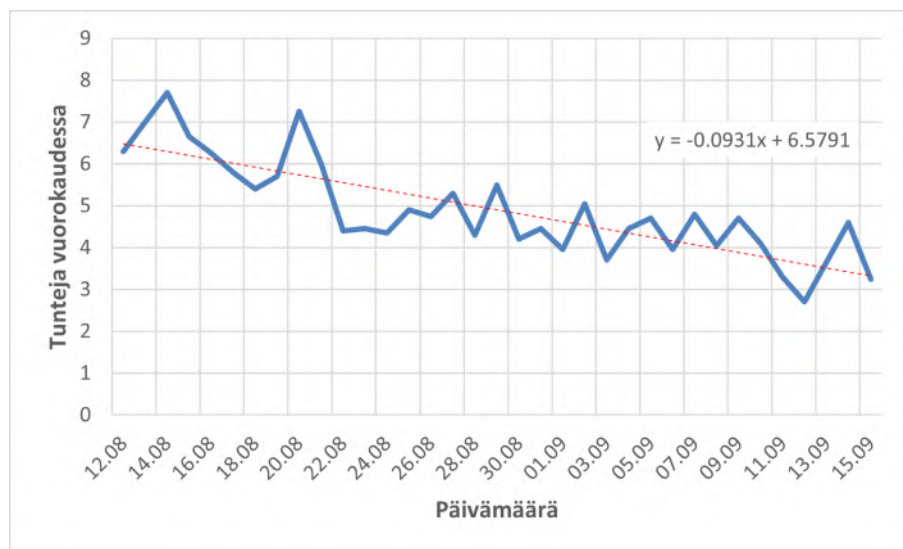
1. Poutajakso, edellinen vuorokausi sade < 0,3 mm/vrk, puintipäivä < 0,3 mm/vrk.
2. Vähäinen sade, edellinen vuorokausi sade < 0,6 mm/vrk, puintipäivä < 0,3 mm/vrk.
3. Sateinen jakso, edellinen vuorokausi sade < 3 mm/vrk, puintipäivä <0,3 mm/vrk.

Kun tarkastellaan pintikautta, sille voidaan tehdä kuvan 2.23 mukainen korjuupäivien määrän ja todennäköisyyden välinen yhteys. Esimerkiksi 70% todennäköisyyden kohdalla saadaan kriteeristä riippuen 8 - 11 työpäivää.



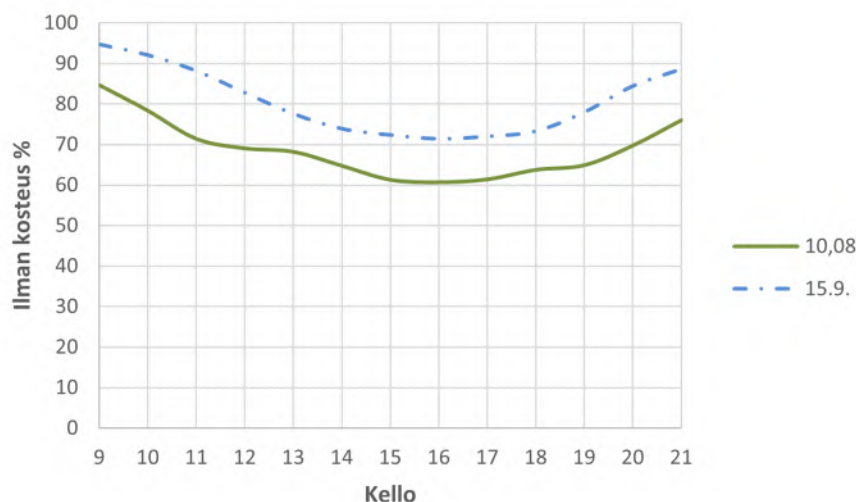
Kuva 2.23: Esimerkki korjuupäivien todennäköisyyksistä pintikaudella 3. kasvuvyöhykkeellä

Ilman kosteus vaikuttaa iltakasteen muodostumiseen. Jos kosteus on 90 - 100% kaste on lähes varmaa, kosteuden ollessa 80 - 90 % kaste on todennäköinen, 70 - 80 % kosteudella se on mahdollinen ja alle 70 % kosteudella epätodennäköinen. Säädatasta löytyy ilman kosteus, kun käytetään tuntikohtaisia tietoja. Kuvassa 2.24 on esimerkki, jossa on laskettu vuodesta 2006 vuoteen 2025 jokaiselle päivälle ja tunnille ilmankosteuden keskiarvot. Elokuussa on 70% ilmankosteuden kriteerin mukaan keskimäärin 6 - 7 tuntia päivässä puintiaikaa ja syyskuun puolivälissä 3 - 4 tuntia. Puintiaika pienenee reilut 5 min vuorokaudta kohti.



Kuva 2.24: Puintitunnit 3. kasvuvyöhykkeellä. Ilman kosteus alle 70 % vuosina 2006 - 2025.

Kuvassa 2.25 on esimerkki ilman kosteudesta kellon ajan mukaan elokuussa ja syyskuussa. Elokuun 10. päivä voitaisiin 70% ilman kosteuden mukaan puida klo 11 - 20 välisenä aikana ja syyskuun 15. päivänä iltapäivällä voidaan päästä lähelle 70% kosteutta. Jos käytetään 80 % rajaa, silloin puinti onnistuu syyskuussa kello 12:30 - 19 välisenä aikana. Koska iltakaste ei tule aamulla, aamun aloitus voi olla aiempikin. Vuodet vaihtelevat ja aina pitää toimia päivittäisen tilanteen mukaan. Nämä luvut osoittavat vain mitä on keskimäärin odotettavissa. Puinnin onnistumisen ratkaisee käytännössä viljan kosteus ja puinnille sopivat olosuhteet.



Kuva 2.25: Ilman kosteus keskimäärin elokuun 10. päivä ja syyskuun 15. päivä Jyväskylässä vuosina 2006 - 2025.

Esimerkki 12. Mikä 3. kasvuyöhykkeellä puintipäivien määrä ja koko puintikauden tuntimäärä?

Käytetään puintipäiville 80% todennäköisyyttä, jolloin kuvan 2.23 kriteerin 1 mukaisesti puintikelpoisten päivien määrä on 8 pv. Kuvan 2.24 mukaan puintitunteja päivässä on puintikauden alussa 6,5 h ja lopussa 3,5 h eli keskimäärin 5 h päivässä. Kaikkiaan puintitunteja on näillä ehdoilla keskimäärin 40 h. Jos puintiala on 80 ha, meidän pitää pystyä puimaan $\frac{80\text{ha}}{40\text{h}} = 2,0 \text{ ha/h}$.

2.4 Koneiden luotettavuus, kestoikä ja huoltokustannukset

Työn onnistumiseen ja konekapasiteetin valintaan vaikuttaa myös koneiden luotettavuus. Tämä tarkoittaa huoltoihin ja korjauksiin kuluva aikaa. Silloin, kun työ on meneillään viivästyksistä aiheuttavat työn keskeytymisen ja sitä kautta voi tulla ajallisuuskustannuksia tai sadon korjuussa laatuongelmia. Yleisesti 95% luotettavuutta pidetään hyvänä. Tähän voidaan päästä uusilla koneilla tai sitten meillä on varakone tai varasuunnitelma, jos koneissa on ongelmia. Luotettavuus voidaan ottaa huomioon koneiden kokoa eli konekapasiteettia valittaessa. Koska maataloustyöt ovat kausiluonteisia, ennakoivilla huoltotöillä on suuri merkitys ja sillä varmistetaan koneiden toiminta sesongin aikana. Esimerkiksi 95% luotettavuus tarkoittaa sitä, että työajasta 5% voidaan käyttää koneen korjaukseen tai huoltoon. Työsaavutuksessa on tällainen varaus, kun koneiden luotettavuus otetaan huomioon.

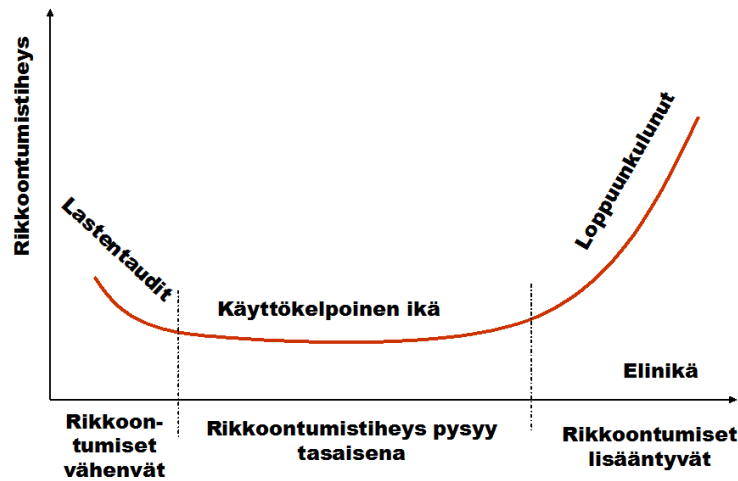
2.4.1 Kestoikä ja luotettavuus

Kestoiän ja luotettavuuden määrittäminen

Koneen elinikää kuvataan monasti "kylpyamme"-käyrällä, kuva 2.26. Eliniän alussa rikkoontumisia on muutamia, mutta niillä on tunnusomaista vähentyminen iän myötä. Tähän vaiheeseen voidaan vaikuttaa valmistuksen laadulla ja erilaisilla luovutus- ja käyttöönottohuolloilla. Tämä vaihe on myös normaaliin takuukorvauksiin liittyvää kautta. Koneiden valmistuksen jälkeinen korjaaminen ja säätäminen on kallista, joten valmistuksessa pyritään laadultaan aina parempaan tulokseen ja ns lastentautien poistamiseen.

Käyttökelpoisen eliniän aikana rikkoontumisten tai vaurioiden tiheys pysyy likimain samalla tasolla. Niille on ominaista satunnaisuus. Tämä vaihe vastaa koneen käyttökelpoista vaihetta. Eliniän lopulla rikkoontumisten määrä alkaa lisääntyä. Kyseessä on tällöin usein väsymisestä ja kulumisesta johtuvat rikkoontumiset. Koneen käyttökelpoinen elinikä on loppunut, ja joko kone uusitaan tai sille tehdään peruskorjaus.

Luotettavuus voi saada arvoja nollan ja ykkösen väliltä, tai jos käytetään prosentteja nollan ja sadan väliltä. Nolla tarkoittaa toimimatonta konetta ja ykkönen tarkoittaa konetta, joka toimii aina. Luotettavuus ei ole koskaan ykkösen suuruinen, vaan sitä pienempi eli täysin luotettavia järjestelmiä tai koneita ei voida koskaan tehdä. Monasti 95 % luotettavuutta pidetään hyväksyttävänä ja pienempi luotettavuus luo epävarmuutta toimintaan.



Kuva 2.26: Rikkoontumistiheyden muutos tuotteen eliniän aikana

Taulukko 2.12: ASAE D497 mukaisia 40 ha tilan vuosittaisia rikkoontumisaikoja ja luotettavuuksia [ASAE D497]

Työ	Seisonta-aika h/a	Hajonta h/a	Rikkoontumisen todennäköisyys	Luotettavuus
Muokkaus	13,6	24,1	0,109	0,89
Maissin kylvö	5,3	5,4	0,139	0,87
Massin puinti	12,3	12,6	0,323	0,68

ASAE D497 antaa taulukon 2.12 mukaisia esimerkkejä luotettavuudesta. Seisonta-ajan lisäksi taulukossa on annettu myös sen keskihajonta. Hajonnat ovat suuria, mikä tarkoittaa sitä, että seisonta-ajat voivat vaihdella runsaasti.

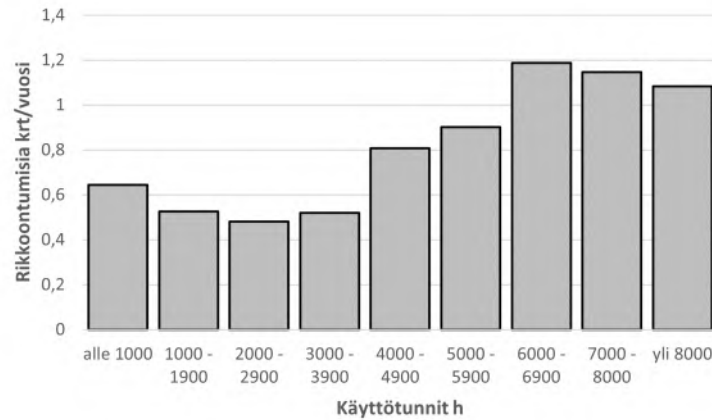
Luotettavuutta voidaan mitata vaurioitumistiheyden ja vaurioitumisvälin avulla (MTBF = Mean Time Between Failures), yhtälöt 2.5 ja 2.6. Vaurioitumistiheys kuvaa kuinka monta vauriota syntyy käyttötuntia kohden ja vaurioitumisväli taas kuvaa kuinka monta tuntia keskimäärin vaurioiden välillä on.

$$\lambda = \frac{N_{\text{vaurio}}}{h_{\text{käyttö}}} \quad (2.5)$$

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} = \frac{h_{\text{käyttö}}}{N_{\text{vaurio}}} \quad (2.6)$$

λ	vaurioitumistiheys
MTBF	vaurioitumisväli
N_{vaurio}	vauriomäärä
$h_{\text{käyttö}}$	käyttöaika

Esimerkki 13. Tuhannen käyttötunnin aikana traktoria korjattiin rikkoontumien tai pienten vikojen takia kaikkiaan 53 kertaa. Vaurioitumistiheys (tai vauriomäärä käyttötuntia kohden) saadaan seuraavasti: $\lambda = \frac{53}{1000} = 0,053$ eli jokaista käyttötuntia kohden oli 0,053 vauriota. Vastaavasti vaurioitumisväli on: $MTBF = \frac{1000}{53} = 18,9$ eli keskimääräinen vaurioväli on 18,9 tuntia. Rikkoontumiset ja huollontarpeet eivät tietysti käytännössä esiinny tasavälein, vaan ne ovat enemmänkin satunnaisia.



Kuva 2.27: Traktoreiden vikaantumistiheys käyttötuntimäärän mukaisesti [Laine ja Peltonen]

Esimerkki 14. Traktorin korjauksista pidettiin kirjaa ja saatiin seuraava tulos: 230 h ajovalon poltin palaa, 520 h pakoputki katkeaa, 760 h vetovarsi vääntyy, 870 h kytkin luistaa ja säädetään, 1110 h ajovalon poltin palaa, 1320 h tuulettajan hihna katkeaa. Vaurioitumisväli on tämän mukaan $\frac{1320}{6} = 220$ tuntia.

Polttimoiden vaihdot eivät aiheuta työn pysähtymistä ja vaurioitumisväli on, kun näitä ei oteta huomioon $\frac{1320}{4} = 330$ tuntia. Jos huollot ja tarkastukset tehdään asiallisesti, kytkimen luistamista ja tuulettajan hihnan katkeamista ei tapahtuisi, jolloin asianmukaisella huollolla vaurioitumisväli olisi $\frac{1320}{2} = 660$ tuntia. Tämä esimerkki kuvaa vaurioiden erilaista luonnetta ja sitä mitä esimerkiksi koneesta huolehtiminen tarkoittaa.

Työtehosteuran kyselyssä vikaantumistiheydessä saatiin kuvan 2.27 mukainen tulos [Laine ja Peltonen]. Kuvion muoto on samanlainen kuin kuvion 2.26 muoto, paitsi yli 7000 h tunnin jälkeen rikkoontumistiheys on hieman vähentynyt. Tämä johtuu traktorin siirtymisestä aputraktoriksi, jolloin käyttötunnit vähenevät.

Koneen tai järjestelmän vaurioitumistiheys voidaan esittää komponenttien vaurioitumistiheyksien avulla. Jos komponentit on kytketty sarjaan, yhden komponentin rikkoontuminen yleensä pysäyttää koko koneen toiminnan. Sarjaan kytketyn koneen tai järjestelmän vaurioitumistiheys λ_s saadaan yhtälön 2.7 avulla, jossa λ_i on kunkin sarjassa olevan komponentin vaurioitumistiheys.

$$\lambda_s = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \dots \lambda_n \quad (2.7)$$

Jos lasketaan suoraan luotettavuuksilla, kokonaisluotettavuus R_s voidaan laskea komponenttien luotettavuuksien avulla.

$$R_s = R_1 \cdot R_2 \dots R_n \quad (2.8)$$

Esimerkki 15. Traktorin luotettavuus on 0,95, perävaunun 0,98 ja leikkuupuimurin 0,90. Mikä on sadonkorjuun kokonaisluotettavuus ?

Kokonaisluotettavuus saadaan osien luotettavuuden tulona eli $R_s = 0,95 \cdot 0,98 \cdot 0,90 = 0,84$ eli 84 %.

Sarjaan kytketyn järjestelmän luotettavuutta voidaan parantaa parhaiten lisäämällä heikoimman komponentin luotettavuutta. Rinnan kytketyissä komponenteissa yhden komponentin rikkoontuminen ei pysäytä koneen toimintaa, mutta kustannukset kasvavat, koska koneessa tai järjestelmässä on rinnakkaisia komponentteja. Rinnankytkettyjen toimilaitteen vaurioitumistiheys λ_s , jos kullakin toimilaitteella on sama vaurioitumistiheys λ saadaan yhtälön 2.9 mukaan.

$$\lambda_s = (1 - (1 - \lambda)^m)^n \quad (2.9)$$

m rinnan olevien komponenttien määrä
n laitteen toimintojen määrä
(useimmiten laitteella on vain yksi toiminto, jolloin n=1)

Vastaavasti luotettavuus saadaan:

$$R_s = (1 - (1 - R)^m)^n \quad (2.10)$$

Esimerkki 16. *Tilalla on käytettävissä kaksi traktoria, jonka kummankin luotettavuus on 90 %. Mikä on äestyyksen luotettavuus, jos kummatkin traktorit ovat käyttökuntoisia koko ajan ?*

Tässä traktoreilla on vain yksi toiminto eli äkeen veto. Kokonaisluotettavuudeksi saadaan: $R_s = 1 - (1 - 0,90)^2 = 0,97$. Käyttämällä kahta jo vanhempaa traktoria voidaan päästä hyväksyttävissä olevaan luotettavuuteen. Mitä huonompia näiden traktoreiden luotettavuudet ovat, sitä useampia niitä tarvitaan.

Rinnakkaiskäyttömahdollisuus voidaan saada eri tavoilla. Varakone voidaan ostaa tai vuokrata tai tarvittaessa käytetään urakoitsijaa. Myös voidaan ajatella korvattavan kyseinen työ jollain toisella, esim. äestysmuoto voidaan vaihtaa toisenlaiseksi.

Yhtälössä 2.9 oletetaan, että rinnakkaisilla koneilla on sama vaurioitumisväli tai luotettavuus. Näin ei kuitenkaan käytännössä ole, vaan esimerkiksi varatraktorina voi olla vanha ja sen luotettavuus on uutta paljon huonompi. Kun käytössä on kaksi rinnakkaista laitetta, joiden luotettavuudet ovat erilaiset, kokonaisluotettavuus saadaan seuraavasti:

$$R_{s(1,2)} = R_1 + (1 - R_1) \cdot R_2 \quad (2.11)$$

Jos käytössä on kolme rinnakkaista laitetta, saadaan vastaavasti:

$$R_{s(1,2,3)} = R_{s(1,2)} + (1 - R_{s(1,2)}) \cdot R_3 \quad (2.12)$$

Esimerkki 17. *Tilalla on käytettävissä kaksi toisensa korvaavaa traktoria, joiden luotettavuudet ovat 90 % ja 80 %. Mikä on traktoritöiden kokonaisluotettavuus.*

Oletetaan, että pääsääntöisesti käytetään paremman luotettavuuden omaavaa traktoria. Tällöin saadaan: $R_{s(1,2)} = 0,9 + (1 - 0,9) \cdot 0,8 = 0,98$.

Luotettavuudessa pitää optimoida erilaisia vaihtoehtoja. Jos hyväksyttävä luotettavuus on 95 %, tämä voidaan saavuttaa monella eri tavalla, joiden kustannukset ovat erilaisia. Vertailemalla eri vaihtoehtoja voidaan löytää kustannuksiltaan edullisin yhdistelmä, jolla saadaan riittävä luotettavuus.

Eksponentiaalinen jakauma

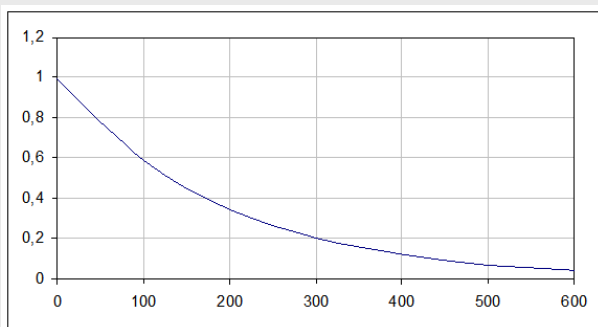
Eksponentiaalista jakaumaa (kuva 2.13) käytetään usein tuotteen osan tai asiakkaan saapumisaikojen jakautumaan kuvaamaan sekä myös korjausajan kuvaamiseen. Korjausajassa se ottaa huomioon ns yllättävät tapaukset, jolloin toisinaan korjaus kestää oletettua kauemmin. Eksponentiaalifunktion alue lähtee nolasta (saa vain positiivisia arvoja) ja ulottuu äärettömään asti ($+\infty$).

Tuotteen luotettavuus käyttötuntien mukaan voidaan esittää eksponenttijakauman tai Weibull-jakauman avulla. Eksponenttijakaumassa oletetaan, että rikkoontumiset noudattavat eksponenttifunktiota, yhtälö 2.13. Eksponentiaalinen luotettavuus voidaan laskea vaurioitumistiheyden ja ajan avulla. Sen oletuksena on, että rikkoontumiset tapahtuvat yhtä pitkien vaurioitumisvälein päässä toisistaan. Eksponenttiyhtälö kuvaa luotettavuutta kohtalaisesti silloin, kun ollaan elinkaaren ns tasaisella käyrällä (kylpyammekäyrän käyttökelpoinen osa, kuva 2.26).

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (2.13)$$

R(t)	koneen luotettavuus
λ	vaurioitumistiheys
t	aika

Esimerkki 18. *Traktorin vaurioitumistiheys on 0,053 vauriota käyttötuntia kohden. Sen mukaan voidaan laskea eksponentiaalinen luotettavuus $R(t) = e^{-\lambda t}$.*



Kuvan mukaan 100 käyttötuntin jälkeen luotettavuus on 60 % eli vaurion todennäköisyys on 40 % . 600 käyttötuntin kohdalla on lähes varmaa, että koneessa on ollut jonkinlainen rikkoontuma. Rikkoontumiset eivät tietenkään tapahdu käytännössä näin kaavamaisesti, vaan niissä on hajontaa eli seuraava rikkoontuminen voi tapahtua hieman aiemmin tai myöhemmin. Tätä voitaisiin arvioida esimerkiksi laskemalla luotettavuus eri vauriovälein. Koneen vanhetessa sen luotettavuus heikkenee eli silloin vauriot tapahtuvat useammin.

Weibull jakauma

Eksponenttijakauma ei kuvaa koneen kestävyudessa tapahtuvia muutoksia. Jos näitä halutaan kuvata, silloin käytetään Weibull jakaumaa, yhtälö 2.14. Weibull-jyrkkyys (termi b) kuvaa koneen ikääntymisen vaikutuksia. Kun b=1, yhtälö supistuu normaaliksi eksponenttiyhtälöksi ja kun b>1, vaurioitumistiheys kasvaa ajan myötä.

$$R(t) = e^{-(\lambda t)^b} \quad (2.14)$$

Luotettavuuksien määrittämistä varten tarvitaan koneen vikatilasto. Sen perusteella saadaan laskettua vikaantumistiheys λ . b-arvoille voidaan käyttää joko tunnettuja arvoja tai se voidaan laskea vikatilastosta. Koneen vanhetessa b-arvo suurenee eli vikaantumiset lisääntyvät. Sekalaisien vikojen b-kerroin on 1,2 - 1,8. Selkeän kulumisen b-arvo on 2 - 4 ja loppuunkulumisen >4. Koneiden luotettavuuden laskennassa käytetään yhtälöstä 2.14 hieman kehittyneempää mallia, yhtälö 2.15, missä b ja η määritetään erikseen. Näiden kertoimien määrittäminen on haastavaa. On olemassa Weibull paperi tai sitten käytetään numeerisia menetelmiä. Excelissä on =WEIBULL.DIST, mutta sen käytössä tarvitaan määrittää erikseen siinä tarvittavia kertoimia. Kuvassa 2.28 on esimerkki traktorin korjaustarpeesta käyttötuntien aikana. 1500 h kohdalla luotettavuus on vain n 10%. Tämä johtuu siitä, että laskennassa ei ole otettu huomioon sitä, että vian korjaaminen parantaa siltä osalta luotettavuutta. Jos osa uusitaan, silloin sen osan kohdalla aloitetaan alusta, jos konetta vain säädetään, silloin osa ei ole uusi. Monasti lähdetäänkin koko koneen sijasta tarkkailemaan tilannetta osakohtaisesti, esimerkiksi hihnat, polttimet, voimansiirto, hydraulikka yms. Työläiden korjausten osalta ennakointi on tarpeen ja seurannasta sekä ennakoivista huolloista parannetaan koneen luotettavuutta.

$$R(t) = e^{-(t/\eta)^b} \quad (2.15)$$

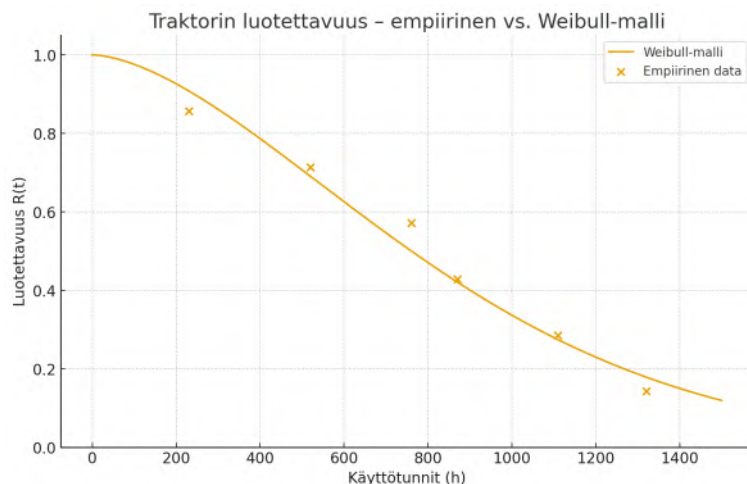
Yhtälön 2.15 η -kerrointa kutsutaan mittakaavakertoimeksi. Se on käyttötuntimäärä, jolloin 63 % koneista on rikkoontunut. Suuri η tarkoittaa, että vikavälit ovat pitkiä, kone toimii keskimäärin pitkään ilman vikaa ja sen kunto on hyvä. Pieni η tarkoittaa, että vikavälit ovat lyhyitä, vikoja ilmenee tiheästi, koneen kunto on huono kunto, siinä on kulumia. Jos η kasvaa ajan myötä, korjaukset tai peruskunnostukset ovat parantaneet tilannetta. Jos η pienenee ajan myötä, kyseessä on vikojen tihentyminen ja kulumisen kiihtyminen.

Verkossa on ilmaisia Weibull työkaluja, joihin syötetään vikaantumiset ja ohjelma laskee parametrit. Tällaisia ovat esimerkiksi Pardus Consulting ja Sigma Exacta.

Maatalouskoneiden kestoikä

Maatalouskoneiden kesto- ja suunnitteluikä käytetään usein Yhdysvalloissa käytössä olevia ikä, koska esimerkiksi Suomessa tällaisia tilastoja ei ole kerätty. Yhdysvaltalaiset luvut perustuvat maatalouskoneiden kustannuksista ja käytöstä tehtyihin tutkimuksiin. Sen mukaiset arvot ovat taulukossa 2.13.

Maatalouskoneiden malli-ikä ovat normaalisti 8 - 12 vuotta, jolloin uusi malli korvaa vanhan. Taulukosta 2.13 voidaan arvioida keskimääräinen vuotuinen käyttötuntimäärä jakamalla kestoikä malli-ikä. Esimerkiksi traktoria pitäisi kymmenen vuoden malli-ikä mukaan käyttää vuodessa 1 200 tuntia ja leikkuupuimuria 200 tuntia, jotta kestoikä ja malli-ikä olisivat yhtä pitkät.



Kuva 2.28: Esimerkki Weibull jakaumasta ja empiirisestä datasta

Taulukko 2.13: Yhdysvaltalaisia koneiden kestoikää sekä huolto- ja korjauskustannusten osuus koneen hinnasta [ASAE D497]

Kone tai laite	Arvioitu ikä h	Korjauskustannus % hinnasta
Traktori	12 000 - 16 000	100
Kyntöaura	2 000	100
Joustopiikkiäes	2 000	70
Jyrsin	1 500	80
Kylvökone	1 500	75
Leikkuupuimuri	3 000	40
Niittokone	2 000	150
Pyöröpaalain	1 500	90
Niittosilppuri	2 500	65
Nostokoneet	1 500 - 2 500	70 - 100
Lannoitteen levitin	1 200	80
Kasvinsuojeluruisku	1 500	70
Perävaunu	3 000	80

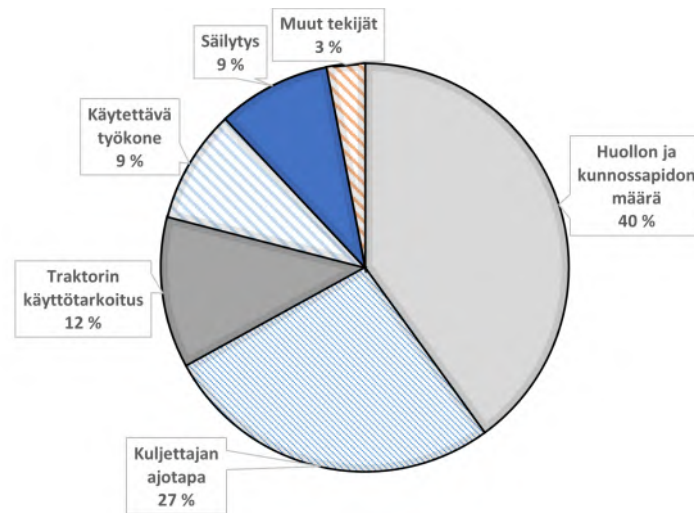
Työtehoseuran tekemän kyselyn tuloksena yli 25 ha tiloilla uusimman ykköstraktorin mediaani-ikä oli 12 vuotta ja kakkostraktorin 18 vuotta. Ykköstraktorin vuotuinen käyttötuntimäärä oli 500 tuntia ja yhteensä tilan kaikille traktoreille kertyi tilan töissä 920 h. Leikkuupuimurin mediaani-ikä oli 21 vuotta ja keskimäärin käyttötunteja vuodessa oli 110 h. [Hulkkonen ja Kaila]

Työtehoseuran kyselyssä vuodelta 1997 traktoreiden peruskorjauksiät vaihtelivat 4000 - 12 000 tunnin väliltä. Tämä kysely ei enää päde ikänsä puolesta nykytilanteeseen. Koneiden koko ja sille asetettavat vaatimukset ovat lisääntyneet ja myös heikompien itäkoneiden käyttö on loppunut. Huoltomiehille tehdyn kyselyn perusteella saatiin traktorin kestoikään vaikuttavista tekijöistä kuvan 2.29 mukainen tulos. Käyttäjän osuus (kunnossapito + ajotapa) on 67% vaikuttavista tekijöistä. Luotettavuutta voidaan parantaa ja korjauskustannuksia vähentää helposti ja halvalla huolehtimalla huolloista ja ajamalla 'nätisti'. [Laine ja Peltonen]

Taulukon 2.13 arvot ovat käyttökelpoisia koneille, jotka on tarkoitettu alueille, joissa kasvukausi on pitkä. Suomessa kasvukausi ja työvaiheisiin käytettävissä oleva aika ovat lyhyet. Koneiden vuotuiset käyttötuntimäärät ovat vähäisemmät, koska koneen hetkellisen kapasiteetin pitää olla suuri.

Maatalouskoneiden kestoikä ja luotettavuus käytännössä

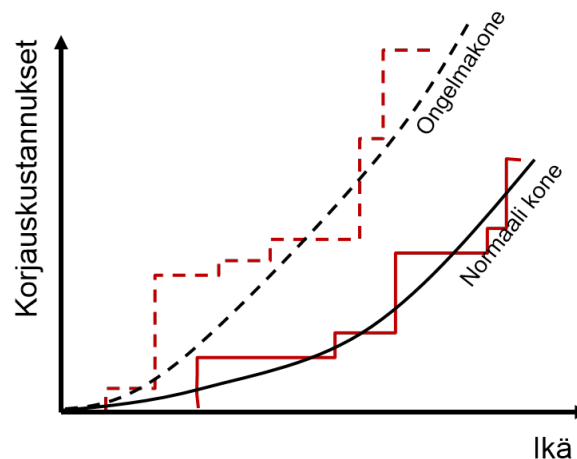
Maatalouskoneiden kestoikä tutkimuksissa korjauskustannukset usein kasvavat lineaarisesti käyttötuntia kohden laskettuna ja kasvavasti, kun lasketaan kumulatiivisia kokonaiskustannuksia. Esimerkki traktorien korjauskustannuksista on kuvassa 2.30. Korjauskustannukset eivät nouse tasaisesti, vaan portaittain. Tämä johtuu rikoitumisten ja korjausten kertaluonteisuudesta.



Kuva 2.29: Traktorin keston vaikuttavat tekijät [Laine ja Peltonen]

Koneiden korjaus- ja käyttökustannuksiin vaikuttaa muitakin seikkoja, joita tutkimusaineistoissa ei yleensä ole eritelty. Tällaisia ovat:

- kuormitustapa ja kuormitusten suuruus
- koneen konstruktio ja laatu
- käyttäjän ammattitaito ja asenne
- huoltojen laiminlyönti



Kuva 2.30: Esimerkki traktorin huolto- ja korjauskustannuksista

ASAE D497 [ASAE D497] standardi antaa dieseltraktoreiden huoltotarpeelle yhtälön 2.16.

$$T_s = 0,0003234 \cdot t^{1,4173} \quad (2.16)$$

T_s seisokkiaika
 t käyttötunnit

Esimerkki 19. Traktoria on käytetty 4000 h ja vuotuinen käyttötuntimäärä on 400 h. Kuinka pitkä seisokkiaika on odotettavissa vuoden aikana?

Lasketaan seisokkiajat 4000 h ja 4400 h mukaan. Saadaan $A = 0,0003234 \cdot 4000^{1,4173} = 41,2$ h eli koko tuona käyttöaikana seisokkeja on ollut 41,2 h. Vastaavasti 4400 käyttötunnin kohdalla saadaan 47,2 h seisokkiaika. Odotettavissa on tämän mukaan $47,2$ h - $41,2$ h = 6 h seisokkiaika vuoden aikana.

2.4.2 Huolto- ja korjauskustannukset

Huolto- ja korjauskustannuksille on useita eri laskentatapoja. Tässä tutustutaan eri niihin. Kustannuksiin vaikuttavat useat seikat, kuten koneiden käyttö, huoltojen tekeminen, kuormitus, käyttötapa, olosuhteet, onnettomuudet yms. Sen takia mitään tarkkaa arviota ei pystytä käyttämään ja kyse on aina arviosta. Konekohtaiset kustannukset saadaan koottua helposti avaamalla maatalouskirjanpitoon koneille omat tilit, jolloin saadaan automaattisesti raportit koneiden rahallisista kustannuksista.

Huolto- ja korjauskustannusten arviointiyhtälöt antavat huolto- ja korjauskustannukset koneen hankintahinnan suhteen. Koneen ikääntyessä inflaatio muuttaa hintatasoa. Tämä voidaan ottaa huomioon inflaatiokorjauksella. Jos keskimääräinen inflaatio on tiedossa tai halutaan laskea tulevaisuuden hinta keskimääräisen vuosittaisen inflaation mukaan, silloin voidaan käyttää yhtälöä 2.17. Jos meillä on tiedossa hankintavuoden inflaatio ja laskentavuoden inflaatio, tällöin hintakorjaus voidaan tehdä suoraan näiden avulla.

$$H_x = H_h \cdot \left(1 + \frac{i}{100}\right)^x \quad (2.17)$$

H_x	inflaatiokorjattu hinta
H_h	hankintahinta
i	vuotuinen inflaatio %
x	laskentavuosi

Tilastokeskus ylläpitää maatalouden tuotantovälineiden ostohintaindeksiä. Sieltä on saatavissa eri vuosien indeksikertoimet. [Ostohintaindeksi]

Korjaus- ja huoltokerroin

Korjaus- ja huoltokerroin (RMF = Repair and Maintenance Factor) antaa kustannukset koneen elinaikana suhteessa koneen hintaan, yhtälö 2.18. Tuntikohtaiset hinnat saadaan jakamalla kustannukset koneen oletetulla eliniällä, yhtälö 2.19.

$$y = \frac{K}{H_h} \quad (2.18)$$

$$K_h = \frac{K}{T} \quad (2.19)$$

y	kustannusten osuus koneen hinnasta
K	korjaus- ja huoltokustannukset koneen eliniän aikana
K_h	käyttötuntikohtaiset korjauskustannukset
H_h	hankintahinta
T	koneen kestoikä

Kustannusten arvioinnissa voidaan käyttää hyväksi taulukon 2.13 arvoja.

Esimerkki 20. Leikkuupuimurin oletettu kestoikä on 2000 - 3000 h ja sen hankintahinta on 290 000 €. Taulukon 2.13 mukaan huolto- ja korjauskustannukset ovat 40% koneen hinnasta. Tämä tarkoittaa koko kestoian aikana $0,4 \cdot 290000 = 116\,000$ € kustannuksia ja käyttötuntia kohden $\frac{116000}{2000} - \frac{116000}{3000} = 58 - 39$ €/h.

Laine ja Peltonen [Laine ja Peltonen] selvittivät traktoreiden kunnossapitokustannuksia ja saivat vuosittaisiksi kustannuksiksi 2,2 - 3,1 % jälleenhankintahinnasta siten, että 300 h vuotuisella käytöllä se oli 2,2 % ja 1200 h käytöllä 3,1 %.

Esimerkki 21. Uuden traktorin hankintahinta on 150 000 €. Kuinka suuri on vuosittainen kunnossapitokustannus?

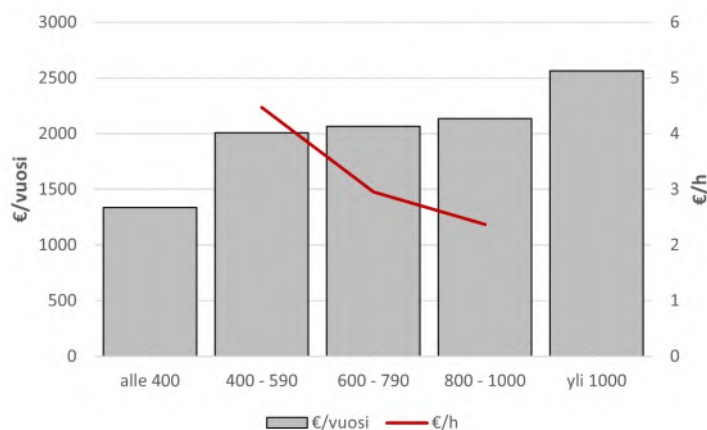
Käytetään kustannuksen laskuissa 2,5% arvoa. Kustannus on $0,025 \cdot 150000 = 3750$ €/v.

Lorencowicz ja Uziak [Lorencowicz & Uziak] kokosivat koneiden huolto- ja korjauskertoimia Puolasta, Sveitsistä, Englannista ja Yhdysvalloista. Taulukossa 2.14 on tulosten keskiarvo prosentteina 100 käyttötuntia kohden. Tuntikustannus voidaan laskea yhtälön 2.20 avulla.

$$K_h = \frac{y_{100}}{100} \cdot H_h \quad (2.20)$$

Taulukko 2.14: Koneiden huolto- ja korjauskustannusten osuus koneen hinnasta käyttötuntia kohden [Lorenkowicz & Uziak]

Kone	Kustannukset 100 käyttötuntia kohden y_{100} %
Traktori	0,8
Perävaunu	2,2
Lannoitteen levitin	6,6
Kylvökone	6,8
Kasvinsuojeluruisku	5,8
Leikkuupuimuri	2,2
Paalain	4,3



Kuva 2.31: Traktorin kunnossapitokustannukset vuotta ja työtuntia kohden eri vuosittaisilla käyttötuntimäärillä [Laine ja Peltonen]

Esimerkki 22. Traktorin hankintahinta on 165 000 €. Kuinka suuret ovat huolto- ja korjauskustannukset? Taulukon 2.14 mukaan traktoreiden kerroin $y_{100}=0,8$ % eli $\frac{0,8}{100} = 0,008$. Tuntikustannus on tällöin $K_h = \frac{0,008}{100} \cdot 165000 = 13,2$ €/h. Arvioidaan kestoiksi 10 000 h, jolloin koko eliniän aikaiset kustannukset ovat 132 000 € eli 80% koneen hankintahinnasta. Taulukossa 2.13 on avioitu kustannusten olevan 100 % koneen hinnasta.

Työtehoseuran kyselyssä saatiin traktorin kunnossapitokustannuksiksi kuvan 2.31 mukaiset tulokset [Laine ja Peltonen]. Kunnossapitokustannuksiin on laskettu varaosat ja tarvikkeet sekä huoltomiehen ja oman työn kustannus. Tulokset on indeksikorjattu vuoden 2025 tasoon. Korjauskustannukset olivat vuodessa 1500 - 2500 € ja käyttötuntia kohden 2 - 5 €/h. Käyttötuntia kohden lasketut kustannukset alenevat, koska huoltotoimenpiteistä osa on vuosiperusteisia. Lisäksi vähäinen käyttö lisää kustannuksia, koska kumiosat kovettuvat, sähkölaitteet hapettuvat yms vähäisestä käytöstä johtuvat viat lisääntyvät.

Koneen teknisten ominaisuuksien mukainen arviointi

Huolto- ja korjauskustannuksien arvioinneissa voidaan käyttää yhtälöä 2.21. Siinä voi olla useita koneen ominaisuuksia (x_i), joille määritetään kertoimia. Esimerkiksi Lipsin ja Burosen [Lips ja Burose(2012)] mukaan traktorille voidaan käyttää ominaisuuksina vuotuista käyttötuntimäärää, ikää, moottoritehoa, rengastusta ja vetotappaa.

$$y = \beta_0 \cdot x_1^{\beta_1} \cdot x_2^{\beta_2} \quad (2.21)$$

y kustannuksen osuus koneen hinnasta
 β kertoimia
 x_i koneen ominaisuuksia

Ongelmana yhtälön käytölle sen laskemiseen tarvittavan tiedon kerääminen. Lips ja Burose [Lips ja Burose(2012)] keräsivät Sveitsistä traktoreiden (655 kpl), kyntöaurojen (126 kpl), niittokoneiden (90 kpl) ja noukinvaunujen

(210 kpl) huolto- ja korjaustietoja. Sen perusteella saatiin traktorille kustannukseksi y 0,022 hinnasta työtuntia kohden, kyntöauralle 0,036 hehtaari kohden, niittokoneelle 0,035 hehtaaria kohden ja noukinvaunulle 0,012 kuormaa kohden.

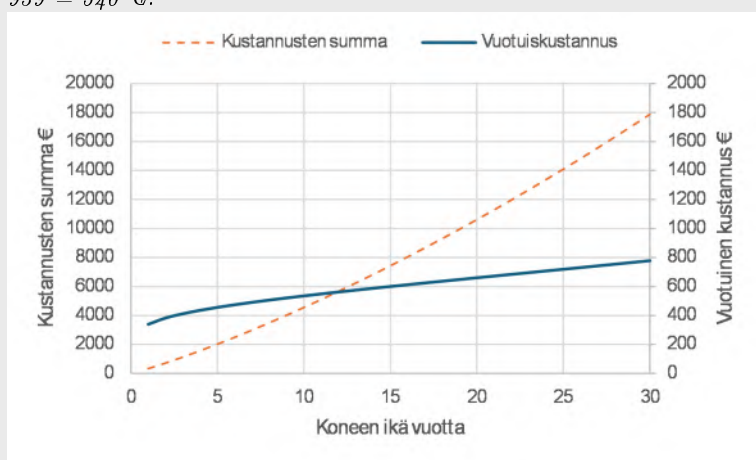
Esimerkiksi noukinvaunuille käytettiin kyselyn tuloksena yhtälöä 2.21.

$$y = 0,009 \cdot x_1^{0,42} \cdot x_2^{0,16} \cdot x_3^{-0,83} \cdot x_4^{0,12} \quad (2.22)$$

- x_1 vuotuinen korjuuala ha
- x_2 koneen ikä
- x_3 kuormatilavuus
- x_4 Veitsimäärä

Esimerkki 23. Noukinvaunun hinta on hankintahetkellä 95 000€ ja vuotuinen inflaatio on 1 %. Vaunulla korjataan keskimäärin 35 ha ala. Kuormatilavuus on 32 m³ ja koneessa on 45 veistä. Mikä on koneen huolto- ja korjauskustannus 10 vuoden päästä hankinnasta?

Kustannuskerroin $y = 0,009 \cdot 35^{0,42} \cdot 10^{0,16} \cdot 32^{-0,83} \cdot 45^{0,12} = 0,0052$. Uuden koneen hankintahinta on inflaatiokorjauksen jälkeen 10 vuoden päästä $H_x = 95000 \cdot (1 + \frac{1}{100})^{10} = 104\,939$ €. Vuotuinen kustannus on 10 vuoden jälkeen $0,0052 \cdot 104\,939 = 540$ €.



2.5 Tiivistelmä

- Työt on tehtävä oikeaan aikaan.
 - Optimiajan ulkopuolella tehty työ aiheuttaa ajallisuustappioita, jotka kasvavat nopeasti työn viivästyessä.
 - Ajallisuustappio ja konekapasiteetti ovat vastinpareja. Suurempi konekapasiteetti pienentää ajallisuustappioita, mutta lisää konekustannuksia. Suunnittelussa on löydettävä näiden välinen taloudellinen tasapaino.
- Pellon tila rajoittaa työntekoa.
 - Maan kosteuden on oltava muokkauksen, orastumisen ja kantavuuden kannalta sopiva. Pelkkä kosteusprosentti ei riitä, koska maalaji vaikuttaa ratkaisevasti siihen, miten vesi on sitoutunut maahan.
- Sää määrittää käytettävissä olevat työpäivät.
 - Töille sopiva kalenteriaika ei vastaa todellista työaikaa. Työpäivien todennäköisyys on usein vain 40–60 % työlle soveltuvasta aikaikkunasta.
 - Monissa työvaiheissa ratkaisevaa on peräkkäisten poutapäivien pituus, ei yksittäisten poutapäivien lukumäärä.
- Tehoisa lämpösumma ohjaa kasvukauden etenemistä.
 - Sen avulla voidaan arvioida kylvö-, kasvu- ja korjuuajankohtia sekä kasvukauden pituutta eri viljelyvyöhykkeillä.
- Säätietojen pitkä aikasarja on suunnittelun perusta.
 - Vuosien välinen vaihtelu on suurta, joten kapasiteetin mitoitus tulee perustaa todennäköisyyksiin, ei yksittäisiin vuosiin.
- Konekapasiteetti mitoitetaan riskitasolle.
 - Työt voidaan mitoittaa esimerkiksi 70–80 % onnistumistodennäköisyydelle sen sijaan, että tavoiteltaisiin keskiarvovuotta.
- Tuotannon suunnittelu on kokonaisuus.
 - Ajallisuus, pellon tila, sää, koneketjut ja talous muodostavat järjestelmän, jota on tarkasteltava samanaikaisesti.

Luku 3

Konekapasiteetin valinta

Koneet ovat aina osa tuotantoketjua ja niiden koko pitää sovittaa viljeltävän pinta-alan mukaiseksi. Koneiden valinta ja investointi tehdään esimerkiksi seuraavien kriteerien mukaan.

- **Vanhan koneen uusinta.** Koneen korjaus- ja huoltokustannuksia on seurattu jatkuvasti ja on huomattu niiden runsas lisääntyminen. Tämän takia lähdetään harkitsemaan koneen uusintaa.
- **Kapasiteetin parantaminen.** Koneilla ei keretä tekemään kunnolla kaikkia töitä. Ketjun toimintaa tarkastetaan kriittisesti ja parannetaan pullonkauloja. Ongelmat eivät aina ole koneiden kapasiteetissä, vaan töiden järjestelyssä tai kuljetuksissa. Koneiden suurentamisen sijaan voidaan pohtia, onko saatavissa sesonkityöntekijöitä, siirretäänkö osa töistä urakoijille vai muodostetaanko koneketjuja tai koneyhtymiä.
- **Investointisuunnitelman toteuttaminen.** Tilan kannattaa laatia investointisuunnitelma, koska koneet joudutaan uusimaan säännöllisin välein. Tätä varten kannattaa varata varoja. Jos säännölliset investoinnit jäävät tekemättä, ajaututaan tilanteeseen, jossa on tehtävä useita investointeja samanaikaisesti.
- **Työn helpottaminen.** Investoinneilla helpotetaan työntekoa ja säästetään työaika muuhun toimintaan tai parannetaan ratkaisevasti työolosuhteita ja työturvallisuutta.

3.1 Koneiden valinnan optimointi

Tuotannon optimoinnissa samoin kuin koneistuksen optimoinnissa käytetään usein lineaarista ohjelmointia (lineaarinen ohjelmointi, linear programming, lineaarinen optimointi, linear optimization). Tämän menetelmän avulla muodostetaan eri vaihtoehtojen avulla lineaarinen yhtälö, jonka minimi, maksimi tai tietty arvo etsitään. Yhtälön lisäksi tarvitaan myös tilanteen reunaehtoja (rajoitteita, constraints, joilla rajataan tapausta. Lineaarissa optimoinnissa nämä rajoitteiden muodostaminen on ratkaisevassa asemassa tuloksen suhteen. Lineaarinen optimointi onnistuu helposti käyttämällä taulukkolaskentaohjelmia.

Lähdetään liikkeelle esimerkillä kasvitilasta, jolla halutaan viljellä kahta eri kasvia. Pinta-alaa on kaikkiaan 100 hehtaaria, toisen kasvin tuotto on 800 €/ha ja toisen 500 €/ha. Kasvien kylvöön/istutukseen on käytettävissä 14 vrk ja tämä vaatii työtä 80 €/ha tuottavalla kasvilla 3 h/ha ja 50 €/h tuottavalla kasvilla 1 h/ha. Kuinka peltoala kannattaa jakaa kasvien kesken ?

Edellä oleva esimerkki on tyypillinen lineaariseen optimointiin soveltuva tilanne. Tuotantostrategia määritellään suurimman rahallisen tuoton mukaisesti. Rajoittavina asioina ovat kokonaispinta-ala ja käytettävissä oleva työaika. Lineaarisen optimoinnin yleinen yhtälö on muotoa:

$$y = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n \quad (3.1)$$

Jatketaan edellistä esimerkkiä. Meitä kiinnostaa saada maksimituotto pinta-alalta. Rajoitteena ovat kokonaispinta-ala ja käytettävissä oleva aika. Muodostetaan ensin tuotolle yhtälö: $y=80€/ha \cdot x_1 + 50€/ha \cdot x_2$. Tässä x_1 ja x_2 ovat pinta-aloja. Tuon yhtälön maksimi saadaan tietysti viljelemällä kasvia x_1 koko 100 ha alalla. Jos kylvö-/istutusaikaa on 14 vrk, ja jos lasketaan 14 h työpäivän mukaisesti, saadaan 196 h kokonaistyöaika. Kylvö/istutus pitäisi tehdä tässä ajassa. Lasketaan kuinka paljon työaika eri vaihtoehdot tarvitsevat. Kokonaisala $x_1 + x_2 = 100$ ha ja työajan tarve on $t = 3h/ha \cdot x_1 + 1h/ha \cdot x_2$. Esimerkiksi, jos kasvia x_1 on 30 ha, silloin toisen kasvin pinta-ala $x_2=100 - x_1 = 70$ ha. Työaika tähän tavitaan $3h/ha \cdot 30ha + 1h/ha \cdot 70ha = 160$ h eli tämä onnistuu, koska kokonaistyöaika on 196 h. Seuraavaksi lasketaan tuotto $30h \cdot 800€/ha + 70h \cdot 500€/ha = 59\,000€$. Käydään eri vaihtoehtoja systemaattisesti läpi, jolloin saadaan alla oleva taulukko.

x_1 /ha	x_2 /ha	Työaika h	Tuotto €
0	100	100	50000
10	90	120	53000
20	80	140	56000
30	70	160	59000
40	60	180	62000
50	50	200	65000
60	40	220	68000
70	30	240	71000
80	20	260	74000
90	10	280	77000
100	0	300	80000

Rajoituksena on 196 h \approx 200 h työaika. Nähdään, että jos kumpaakin kasvia on 50 ha, työaika riittää ja saadaan taloudellisesti myös hyvä tulos (taloudellisesti x_1 ala pitäisi olla mahdollisimman suuri). Rajoitteena tässä esimerkissä oli kokonaispinta-ala ja kokonaistyöaika. Kun esimerkki lasketaan matemaattisesti/ohjelmallisesti silloin pitää lisätä rajoitteeksi myös positiivinen pinta-ala eli negatiivinen pinta-ala ei ole mahdollinen.

Lineaarinen optimointi on mahdollista tehdä laskemalla systemaattisesti eri vaihtoehtoja ja ottamalla niiden rajoitteet huomioon. Kun joudutaan optimoimaan usean muuttujan suhteen, tämä ei enään ole helppoa ja silloin voidaan käyttää hyväksi eri ohjelmien optimointimahdollisuuksia. Esim. Excelissä on Solver työkalu tätä varten. Uusimmissa Excel versioissa on kaksi Solveria, Home välilehden ja Data välilehden takana. Näistä ensimmäinen on monipuolisempi ja se tekee ainakin osan laskutoimituksista netissä.

Suunnittelutyökaluja

Tuotannon suunnittelua varten on olemassa tietokoneohjelmistoja. Suomen kielellä on saatavissa TTS Manager ohjelma, jonka avulla tilan työt voidaan suunnitella ja ohjelma osoittaa mahdolliset pullonkaulat. TTS-Kone ohjelmalla voit laskea konekustannuksia.

Englannin kielellä on saatavissa IFSM-ohjelmisto (Integrated Farm System Model). Tämä ohjelmisto on laaja lähinnä karjatalouteen suunnattu ohjelmisto ja se sisältää myös ympäristöasioita. Maatalouden johtamiseen liittyviä ohjelmistoja voi etsiä netistä esimerkiksi hakusanoilla '*Farm management software*'.

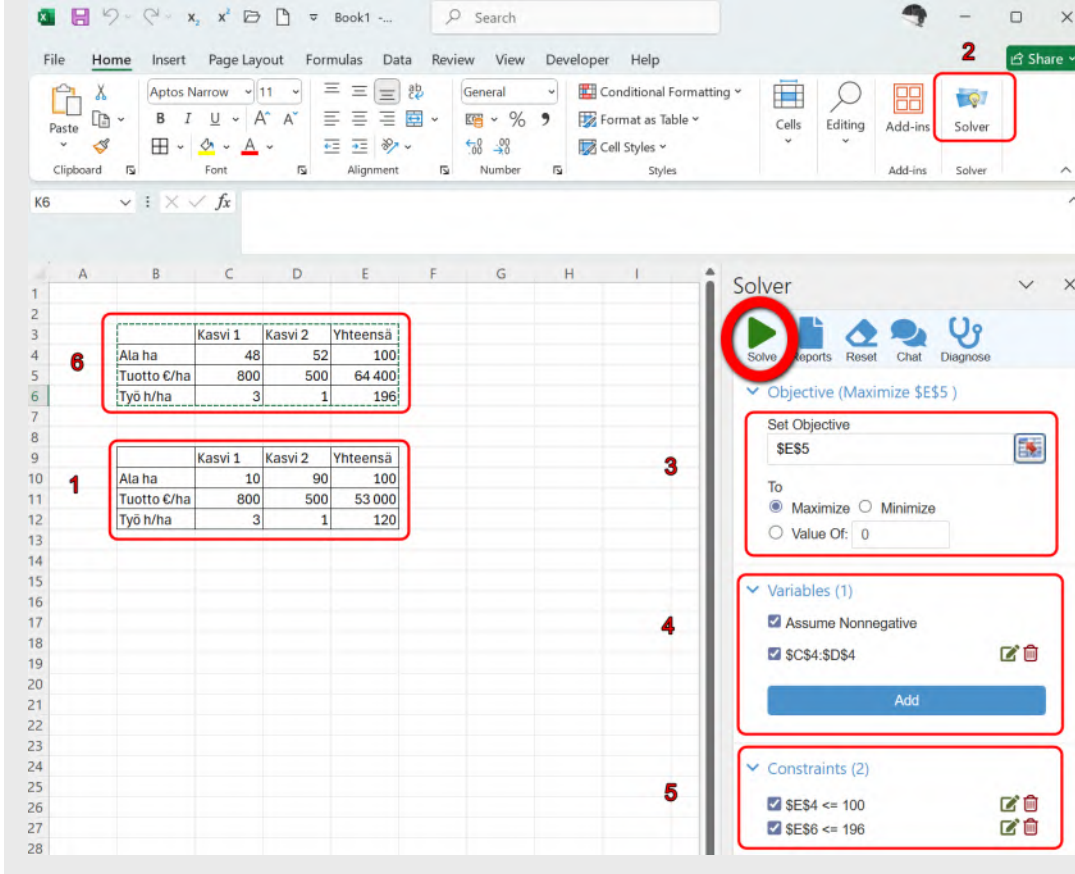
Esimerkki 24. Ratkaistaan yllä ollut esimerkki Excelin Solverin avulla. Ratkaisua varten kirjoitetaan Exceliin tarvittavat tiedot. Nämä on alla olevassa koottu yhteensä taulukkoon. Lähdetään liikkeelle siitä, että kasvin 1 ala on 10 ha ja kasvin 2 90 ha. Alojen summa on 100 ha. Tuotto €/ha lasketaan rivillä on kasvien tuotot €/ha ja viimeisessä solussa koko tuotto $10\text{ha} \cdot 800\text{€/ha} + 90 \cdot 500\text{€/ha} = 53\,000\text{€}$. Alimmalla rivillä on kummankin kasvin tarvitsema työmäärä h/ha ja kokonaistyöaika $10\text{ha} \cdot 3\text{h/ha} + 90\text{ha} \cdot 1\text{h/ha} = 120\text{h}$. Yhteensä sarakkeessa on nämä yhtälöt.

	Kasvi 1	Kasvi 2	Yhteensä
Ala ha	10	90	100
Tuotto €/ha	800	500	53 000
Työ h/ha	3	1	120

Jos valikossa ei ole Solveria, se täytyy ottaa käyttöön Add Ins ... valikosta tai File -> Options-> Add-ins . Kuvassa Kasvin 1 ala on solussa C4 ja kasvin 2 solussa D4. $E4=C4+D6$. Kasvin 1 tuotto on solussa C5 ja kasvin 2 solussa D5. Kokonaistuotto on solussa E5. $E5=D4 \cdot D5 + C4 \cdot C5$ Solussa C6 on kasvin 1 työmäärä ja solussa D6 kasvin 2 työmäärä. Työmäärä yhteensä on solussa E6. $E6=C6 \cdot C4 + D6 \cdot D4$.

Solveri kirjoittaa alkuperäisten lukujen päälle, sen takia 1. kohdassa alkuperäiset arvot on kopioitu laskentakohdan alle, jotta näemme tapahtuneet muutokset. Lähtöarvot pitää olla olemassa, jotta ohjelma toimisi, tässä annettiin 'jotkut' arvot 10 ha ja 90 ha.

Vaihe 2. otetaan Solver käyttöön, 3. halutaan laskea suurin tuotto eli solu E5 ja Maximize. 4. Muutetaan pinta-aloja eli solujen C4 ja D4 arvoja 5. Asetetaan rajoitteiksi pinta-ala E4 on korkeintaan 100 ha ja työmäärä E6 on korkeintaan 196 h. Painetaan Solve nappulaa ja Excel kirjoittaa ratkaisun alkuperäisten lukujen päälle, kohta 6. Optimointi laskee, että kasvia 1 viljeltäisiin 48 ha ja kasvia 2 52 ha.



3.2 Tarvittava konekapasiteetti

Konekapasiteetin valinta voidaan tehdä, kun tiedetään kuinka paljon aikaa työhön on käytettävissä. Maataloustöissä on työlle aina tietty kasveista johtuva aika, jolloin työ on tehtävä. Kun tiedetään pinta-ala ja kuinka paljon aikaa työhön on käytettävissä. Jos tilan kokonaispinta-ala on A ja meillä on aika $t_{työ}$, jossa tuo pinta-ala pitää käsitellä, tarvittavaksi konekapasiteetti saadaan $q_{ko} = \frac{A}{t_{työ}}$. Työhön käytettävissä oleva aika saadaan käytettävissä olevista työpäivistä N_{pv} ja työhön käytettävissä olevasta päivittäisestä ajasta t_{pv} . Työajalle saadaan yhtälö $t_{työ} = N_{pv} \cdot t_{pv}$. Kun yhdistetään nämä yhtälöt, saadaan tarvittavalle konekapasiteetille yhtälö 3.2.

$$q_{ko} = \frac{A}{N_{pv} \cdot t_{pv}} \tag{3.2}$$

q_{ko}	tarvittava konekapasiteetti
A	pinta-ala
N_{pv}	työpäivien määrä ajanjaksolla
t_{pv}	työhön käytettävissä oleva aika työpäivän aikana

Yhtälössä 3.2 työpäivien määrä on ajanjaksolla olevien poutaehtojuen mukaan laskettu päivien määrä. Määrän valitaan todennäköisyyksien mukaan kappaleen 2.3 mukaisesti.

Esimerkki 25. *Maatilalla on 80 ha viljalla. Kuinka suuri puimuri tilalle pitäisi hankkia?*

Lähdetään liikkeelle sääoloista. Puinti halutaan tehdä n 1 kk aikana. Valitaan säätiedoista aloituspäiväksi 10.8. ja lopetuspäiväksi 9.9. Käytetään 3. kasvuvyöhykkeen säätietoja, sen mukaan ajanjaksolla on keskimäärin 16,7 poutapäivää ja hajonta on 3,5 päivää. Kriteereinä on, että edellisen päivän sade on alle 10 mm/vrk ja puintipäivän sade on alle 0,3 mm/vrk. Lasketaan Excelin funktiolla ja 80% todennäköisyydellä työpäivien määrä, =NORM.INV(1-0,8;16,7;3,5) = 13,7 ≈ 14 vrk. Tämä tarkoittaa sitä, että keskimäärin 8 vuotena kymmenestä puintikelpoisia päiviä on 14 vrk. Kahtena vuonna kymmenestä poutapäivää on vähemmän kuin 14 vrk. Puintipäivän pituus on puintikaudella keskimäärin 5 h päivässä. Kaikkiaan meillä on 70 h käytettävissä puintiin ja kun otetaan huomioon puinnin tehokkuus 70% (hyötysuhde taulukossa 3.1). Käytetään puimurin luotettavuutena 95%, puinnin kokonaisyötysuhde on $k = 0,7 \cdot 0,95 = 0,665$ ja tehollisia työtunteja on 46,6. Jaetaan pinta-ala tuntimäärällä, jolloin saadaan $\frac{80}{46,6} = 1,72$ ha/h. Meidän pitäisi pystyä puimaan puimurilla 1,7 ha ala tunnin aikana. Päivässä puidaan $1,72 \cdot 5 = 8,6$ ha. Jos sato on 4000 kg/ha (märkä-sato), vuorokaudessa tulee kuivattavaksi $8,6 \cdot 4000 = 34,4$ tonnia viljaa.

Konekapasiteetin laskennassa pitää ottaa huomioon käytettävissä olevien työntekijöiden määrä. Jos yksi henkilö tekee kaikki työt, työvaiheet ovat peräkkäisiä. Jos työntekijöitä on useampi, töitä voidaan tehdä yhtäaikaista. Esimerkiksi kevättöissä yhden työntekijän pitäisi kerätä tekemään sekä äestys että kylvö. Jos työntekijöitä on kaksi, toinen voi äestää ja toinen kylvää samanaikaisesti. Tällöin konekapasiteetin tarve on huomattavasti pienempi.

Peltolohkojen mukainen kapasiteetti

Tilan pellot eivät ole useinkaan kaikki vierekkäin, ja vaikka olisivatkin, työt pitää tehdä pienemmissä osissa, lohkoissa. Säätielöjen tai kokemuksen mukaan on saatu tölle käytettävissä oleva kokonaisaika. Siinä voidaan ottaa huomioon lohkoille siirtymisajat ja käyttää vain pellolla oloaika. Jos siirtymiset halutaan tarkastella erikseen, silloin käytettävissä olevasta ajasta on vähennettävä siirtymisiin kuuluva aika. Yksinkertaistetaan tarkasteluja siten, että lohkoilta palataan aina tilakeskukseen ennen seuraavalle lohkolle siirtymistä. Lohkolta siirrytään toiselle monasti suoraan, mutta tämä tekee tarkastelun vaikeaksi, koska silloin joudutaan yksityiskohtaisiin käsittelyihin lohkojen sijainnista. Pidetään asia yksinkertaisena, jotta saadaan perusteet paremmin esille.

Lohkon käsittelyyn kuuluva aika muodostuu kahdesta osasta, siirtymisestä ja työstä. Lohkon käsittelyyn kuuluva aika on siten siirtymisaika + työaika, yhtälö 3.3.

$$t_i = t_{si} + t_{ti} = \frac{d_i}{v_i} + \frac{A_i}{q_i} \quad (3.3)$$

t_i	lohkon i kokonaisaika
t_{si}	lohkolle i siirtymisiin kuuluva aika
t_{ti}	lohkon i työaika
d_i	lohkon etäisyys tilakeskuksesta
v_i	siirtymisnopeus lohkolle i
A_i	lohkon i pinta-ala
q_i	lohkon i työsaavutus

Peltotyöhön jäävä aika t_p on työlle varattu kokonaisaika t_k vähennettynä siirtymisiin kuluvilla ajoilla t_{si} , $t_p = t_k - \sum t_{si}$. Tarvittava työkapasiteetti voidaan nyt laskea yhtälön 3.4 avulla. Jos kokonaisyöaika on lyhyt ja etäisyydet pitkät, voidaan joutua tilanteeseen, jossa siirtymisiin menee enemmän aikaa kuin kokonaisaika on käytettävissä. Tällöin tilanteesta tulee mahdoton. Pidemmät työpäivät kaukaisilla lohkoilla muuttavat tilannetta. Isoilla kaukaisilla lohkoilla voidaan joutua käymään useampana päivänä, jolloin siirtymisiin kuuluva aika lisääntyy.

$$q_{ko} = \frac{\sum A_i}{t_{kok} - \sum t_{si}} \quad (3.4)$$

Esimerkki 26. Tilan peltolohkot, etäisyydet ja ajonopeudet ovat seuraavat:

Lohko	Pinta-ala ha	Etäisyys tilakeskuksesta	Ajonopeus lohkolle /h	Siirtymisaika h
Lohko 1	4,7	0		
Lohko 2	12,3	0,6	10	0,00
Lohko 3	7,6	0,7	10	0,12
Lohko 4	5,5	2,1	14	0,14
Lohko 5	8,9	2,7	21	0,30
Lohko 6	15,3	5,6	25	0,26
Lohko 7	3,2	11,2	14	0,45
Lohko 8	9,8	13,1	27	1,60
Lohko 9	12,5	18,6	29	0,97
Lohko 10	16,3	22,1	35	1,28
Summa	96,1			1,26

Työpäiviä on kaikkiaan 6 vrk ja vuorokaudessa on tehokkaita työtunteja 8 h/vrk. Työhön on käytettävissä kokonaisuudessa 48 h. Minkälainen konekapasiteetti peltotyöhön tarvitaan?

Katsotaan vaikka lohkoa 6. Se on 5,6 km päässä tilakeskuksesta ja ajonopeus on 25 km/h. Edestakaiseen ajoon kuuluu $\frac{2 \cdot 5,6 \text{ km}}{25 \text{ km/h}} = 0,45 \text{ h} = 27 \text{ min}$. Vastaavasti voidaan laskea muiden peltolohkojen siirtymisajat, kun nämä summataan, saadaan siirtymisiin kulumaan 6,4 h. Kokonaispinta-ala saadaan lohkojen summana 96,1 ha. Kun siirtymiset vähennetään käytettävissä olevasta työajasta $48 \text{ h} - 6,4 \text{ h} = 41,6 \text{ h}$. Tarvittava konekapasiteetti on $q_{ko} = \frac{96,1 \text{ ha}}{41,6 \text{ h}} = 2,3 \text{ ha/h}$.

3.3 Teorettinen työsaavutus

Työsaavutuksella tarkoitetaan sitä kuinka monta hehtaaria tunnissa saadaan tehtyä tai sadonkorjuussa myös, kun satotaso otetaan huomioon, kuinka monta tonnia tunnissa korjataan. Kun työskennellään pellolla ja koneen työleveys on b , käsitelty ala on $A = b \cdot s$, s on työn aikana kuljettu matka. Kun ajonopeus on $v = \frac{s}{t}$, saadaan, että kuljettu matka on, $s = v \cdot t$. Työsaavutus ilmoitetaan aikayksikössä tehtynä työnä, perusyksikköjen mukaan se on m^2/s . Kun nämä yhdistetään, saadaan yhtälö 3.5. Kun halutaan laskea suoraan ha/h ja ajonopeus ilmoitetaan muodossa km/h, saadaan yhtälö 3.6.

$$q_t = \frac{A}{t} = \frac{bs}{t} = \frac{bvt}{t} = bv \quad (3.5)$$

$$q_t = \frac{b[m] \cdot v[\text{km/h}]}{10} \quad (3.6)$$

q_t työsaavutus
 b työkoneen työleveys
 v ajonopeus

Esimerkki 27. Peltoa äestetään 4,5 m leveällä äkeellä ja ajonopeus on 9,5 km/h. Mikä on teorettinen työsaavutus?

$$q_t = \frac{4,5 \cdot 9,5}{10} = 4,3 \text{ ha/h}$$

Kun kyseessä on satoa käsittelevä työkone, kuten niittosilppuri tai leikkuupuimuri, koneen läpi kulkeva massavirta voidaan laskea työsaavutuksen ja satotason avulla. Kun sato on s ja työsaavutus on q_t , saadaan koneen läpi menevä massavirta yhtälö 3.7 mukaisesti.

$$q_m = q_t \cdot s \quad (3.7)$$

Esimerkki 28. Leikkuupuimurin työleveys on 4 m ja ajonopeus 4 km/h. Jyväsato on 3500 kg/ha. Minkälainen massavirta kulkee puimurin läpi?

Jyväsadon lisäksi koneikon läpi kulkee myös oljet. Oletetaan, että olkisato on 60% jyväsadosta, jolloin koneikon läpi kulkee yhden hehtaarin alalta yhteensä 5600 kg jyvää ja olkea. Työsaavutus on $q_t = \frac{4 \cdot 4}{10} = 1,6 \text{ ha/h}$. Tällöin massavirta on $q_m = 1,6 \cdot 5600 \frac{\text{ha} \cdot \text{kg}}{\text{h} \cdot \text{ha}} = 8960 \text{ kg/h} = 9,0 \text{ t/h}$ ja jyvävirta $q_m = 1,6 \cdot 3500 \frac{\text{ha} \cdot \text{kg}}{\text{h} \cdot \text{ha}} = 5,6 \text{ t/h}$.

3.4 Käytännön työsaavutus

Yhtälö 3.6 antaa teoreettisen työsaavutuksen. Käytännössä ei pystytä useinkaan käyttämään koko koneen työlevyyttä hyväksi. Lisäksi aikaa kuluu käännoksiin päisteissä ja täyttöihin, tyhjennyksiin ja säätöihin. Todellinen työsaavutus voidaan laskea ottamalla huomioon nämä työntöön hyötysuhteella. Tyypillisesti nämä ovat 60 - 85 % luokkaa eli todellinen työsaavutus on 60 - 85% teoreettisesta työsaavutuksesta [ASAE D497]. Todellinen työsaavutus saadaan kertomalla teoreettinen työsaavutus työntöön hyötysuhteella η_t (työhyötysuhde, työn tehokkuus), joka tarkoittaa ajankäytön tehokkuutta (sisältäen käännookset, säädöt, täytöt jne.), ei työlevyden päällekkäisajoa. Käytettäessä eri lähteistä saatavia työhyötysuhteen arvoja, niissä ei ole useinkaan ilmoitettu onko työlevyden hyötysuhde siinä mukana. Tämä voi joissakin tilanteissa tulla kahteen kertaan laskentaan mukaan.

Rivityökoneiden ja kylvökoneiden todelliset työlevyydet ovat koneen työlevyden suuruisia. Muilla työkoneilla ajetaan yleensä hieman edellisen ajokerran päälle ristiin. Tyypillisesti päällekkäisajo on 2 - 5 % eli työlevydestä käytetään hyödyksi 95 - 98 %. Kun lasketaan todellista työsaavutusta, työlevyden vajuus pitää ottaa huomioon joko työlevyden hyötysuhteen η_b kautta tai sitten laskemalla työsaavutus käyttäen todellista työlevyyttä.

Edellisten lisäksi mukaan kannattaa ottaa koneiden luotettavuus. Hyvänä luotettavuutena pidetään 95% luotettavuutta. Jos esimerkiksi luotettavuus on 95%, tämä tarkoittaa sitä, että työajasta varataan 5% koneiden huoltoa tai korjausta varten. Usein kyse on koneketjuista, jolloin ketjun luotettavuus η_k lasketaan yhtälön 2.8 mukaan koneiden luotettavuuden tulona.

Kun nämä asiat yhdistetään, saadaan yhtälö 3.8.

$$q_{tod} = \frac{b[m] \cdot v[km/h]}{10} \cdot \eta_t \cdot \eta_b \cdot \eta_k \quad (3.8)$$

q_{tod}	käytännön työsaavutus
b	työkoneen työleveys [m]
v	ajonopeus [km/h]
η_t	työntöön hyötysuhde
η_b	työlevyden hyötysuhde
η_k	koneiden luotettavuus

Jos halutaan selvittää koko työn työsaavutus, silloin on otettava huomioon myös pellolle siirtymiset ja työssä tarvittavat kuljetukset. Näiden vaikutus voidaan laskea ajan käytön hyötysuhteen avulla eli vertaamalla työn teoreettista työaikaa työhön tarvittavaan kokonaisaikaan. Tarvittaessa työntöön hyötysuhde voidaan määrittää joko vain pellolla tapahtuvien töiden osalta tai käsittely voidaan laajentaa koskemaan esimerkiksi koko päivää (tilaa). Työjärjestelyjen hyötysuhde η_t (työhyötysuhde, työn tehokkuus) voidaan laskea yhtälön 3.9 mukaisesti.

$$\eta_t = \frac{t_t}{t_{kok}} \quad (3.9)$$

η_t	työntöön hyötysuhde
t_t	teoreettinen työaika
t_{kok}	työhön käytetty kokonaistyöaika

Työhön käytetty kokonaisaika t_{kok} voidaan laskea yhtälön 3.10 mukaisesti. Kokonaisaikaa laskettaessa työntekoon kuluva aika on laskettava todellisen työlevyden avulla. Tämä on otettu yhtälössä huomioon jakamalla teoreettinen aika työlevyden hyötysuhteella η_b . Tarkastelua voidaan laajentaa pelloilta esimerkiksi koko työpäivää koskeväksi, jolloin kulkemiset talouskeskukseen ja huoltoajat yms pitää ottaa huomioon.

$$t_{kok} = \frac{t_t}{\eta_b} + t_i \quad (3.10)$$

η_b	työlevyden hyötysuhde
t_t	teoreettinen työaika
t_i	eri aputyövaiheisiin tarvittava aika

Taulukossa 3.1 [ASAE D497] on tyypillisiä työhyötysuhteiden arvoja. Nämä arvot pätevät Pohjois-Amerikan olosuhteissa ja meillä esimerkiksi peltolohkot ovat pienempiä, jolloin työhyötysuhteiden arvot ovat vastaavasti alhaisempia.

Työhyötysuhde ei ole tarkka lukema, vaan se vaihtelee peltolohkojen ja olosuhteiden mukaan. Töiden työhyötysuhde on helppo määrittää itse omille töille ja lohkoille. Lasketaan ensin teoreettinen työsaavutus ajonopeuden ja työlevyden avulla. Sen jälkeen rekisteröidään kuinka kauan työ peltolohkolla kesti ja jaetaan

Taulukko 3.1: ASAE D497 standardin mukaisia tyypillisiä työn hyötysuhteita pellolla (kuljetukset ja tilakeskuk-
sessa tapahtuvia töitä ei ole otettu huomioon) [ASAE D497]

Työkone	Hyötysuhteen vaihtelu %	Tyypillinen hyötysuhde %
Kyntöaura	70 - 90	85
Joustopiikkiäes	70 - 90	85
Jyrsin	70 - 90	85
Kylvökone	55 - 80	70
Leikkuupuimuri	65 - 80	70
Pyöröpaalain	55 - 75	65
Niittosilppuri	60 - 85	70
Perunannostokone	55 - 70	60
Lannoitteenlevitin	60 - 80	70
Kasvinsuojeluruisku	50 - 80	65

pinta-ala työajalla. Tämä on todellinen työkapasiteetti. Jaetaan teoreettinen kapasiteetti todellisella kapasiteetilla. Tästä saadaan todellinen työhyötysuhde, jossa on mukana työleveyden hyötysuhde, päisteet, mahdolliset täytöt/tyhjennykset, pellon muoto yms asiat.

Esimerkki 29. Puimuriesimerkin 28 käännöksiin kuluu aikaa 5 min/ha ja tyhjennykseen kuluu 10 min/ha. Mikä on työsaavutus pellolla ?

Puimurin teoreettinen työsaavutus oli 1,6 ha/h, silloin hehtaari kohti käytetään $1/1,6 = 0,63$ h/ha = 37,5 min/ha. Kun otetaan huomioon työleveyden hyötysuhde 95%, saadaan työsaavutukseksi $1,6\text{ha/h} \cdot 0,95 = 1,5$ ha/h ja työajalle $\frac{37,5\text{h/ha}}{0,95} = 40,0$ min/ha. Hehtaarin kokonaistyöajaksi saadaan siten: puinti + käännökset + tyhjennykset = $40 + 5 + 10 = 55$ min/ha. Työsaavutus pellolla on siten 1,1 ha/h ja työn hyötysuhde (yhtälö 3.9) on $\frac{37,5\text{min}}{55\text{min}} = 68\%$.

3.5 Kuljetuksien ja materiaalin käsittelyn vaikutus

Maataloustöihin liittyy oleellisina materiaalien kuljettaminen. Lannoitteet, siemenet ja torjunta-aineet on vietävä pellolle ja vastaavasti sato on tuotava pellolta kuivuriin tai varastoon. Kuljetus on oleellinen osa työketjua. Jos se ei toimi kunnolla, työkoneet pysähtyvät ja työsaavutus romahtaa. Vaikutus voi olla useita kymmeniä prosentteja ja se on usein suurin kapasiteetin pienentäjä. Kuvassa 3.1 on esimerkki miten kasvinsuojeluruiskun kapasiteetti on saatu muuttumaan.

Sama koskee myös materiaalin käsittelyä. Pienitehoiset elevaattorit ja täyttölaitteet lisäävät odotusaikaa ja heikentävät työsaavutusta. Kuljetuskapasiteettiin vaikuttaa etäisyydet, kuljetusetäisyyden kasvaessa kuljetuskapasiteettia joudutaan lisäämään.

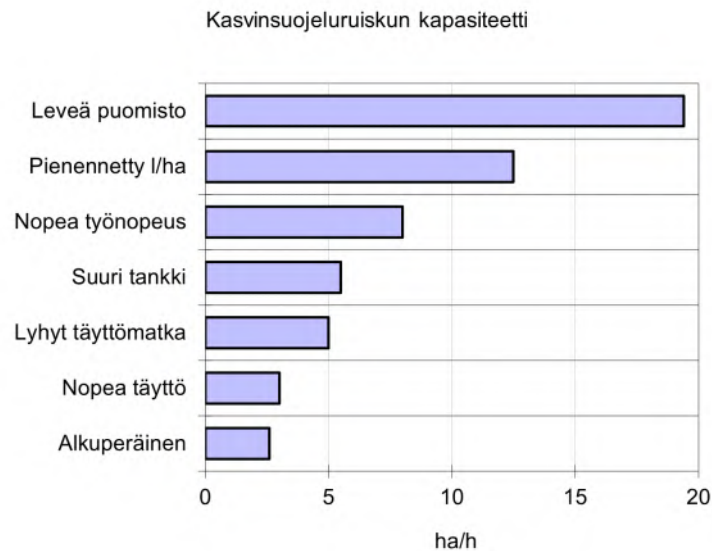
Karjataloudessa kuljetetaan paljon rehua ja lantaa. Näissä kuljetuksissa kuorman vesipitoisuus vaikuttaa kuljetustarpeeseen ja polttoaineen käyttöön. Mitä enemmän materiaalissa on vettä, sitä suurempaa massamäärää kuljetetaan. Kuivaamalla materiaalia saadaan vesimäärää vähennettyä ja kuljetuksia tehostettua. Kuvassa 3.2 on esitetty mitattuja kuormien kuiva-ainemääriä, kun käytössä on erilaisia silppureita [Tila-Artturi]. Luvuissa on melko paljon vaihtelua, koska esimerkiksi silpunnepitoisuus ja esikuivaus vaikuttavat tilavuuspainoon. Ajosilppurin osalta aineisto kattaa suppeamman kuiva-ainepitoisuusalueen kuin muilla ja sen takia käyrän muoto ei välttämättä ole oikea. Tarkkuussilppurin ja noukinvaunun osalta kuiva-ainepitoisuuden lisääntyminen lisää kuiva-ainemäärää (rehun osuutta). Tämä johtuu vähemmästä massassa olevasta vesimäärästä.

Esimerkki 30. Noukinvaunun tilavuus on 20 m^3 . Miten nurmen kosteuspitoisuus vaikuttaa kuljetuksiin?

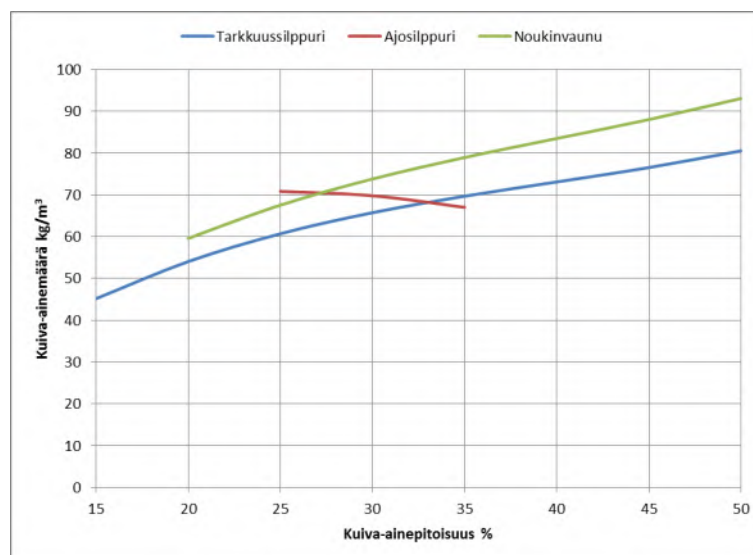
Kuvan 3.2 mukaisesti kuiva-ainepitoisuuden ollessa 15% (85% vesipitoisuus) kuiva-ainemäärä on 45 kg/m^3 ja 50% kuiva-ainepitoisuudella se on luokkaa 85 kg/m^3 . Kuormassa on kuiva-ainetta 15% pitoisuudella $20\text{m}^3 \cdot 45\text{ kg/m}^3 = 900\text{ kg}$ ja 50% pitoisuudella $20\text{m}^3 \cdot 85\text{ kg/m}^3 = 1700\text{ kg}$. Kuiva-ainemäärä on siten lähes kaksinkertainen.

3.6 Ajotavan ja peltolohkon muodon ja koon vaikutus

Peltotyössä kapasiteetti saadaan pidettyä hyvänä, kun koneet saavat työskennellä jatkuvasti. Päisteet, täytöt, tyhjennykset ja epämuotoiset lohkot aiheuttavat aina 'tuottamatonta' ajoa. Muodon vaikutukselle ei ole mi-

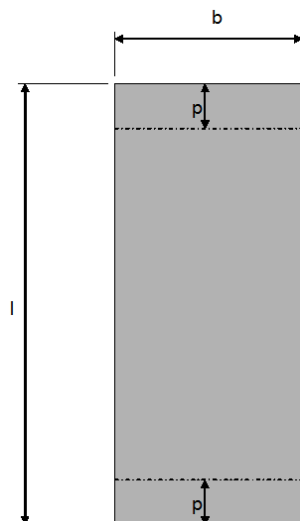


Kuva 3.1: Kasvinsuojeluruiskun kapasiteetin lisääminen



Kuva 3.2: Tuorerehun kosteuspitoisuuden vaikutus rehun kuiva-ainemäärään

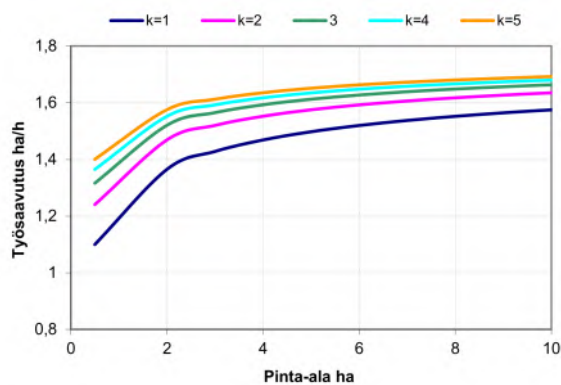
tään yleispätevää laskentatapaa, vaan se joudutaan arvioimaan tapauskohtaisesti. Tarkastellaan lohkon koon ja muodon vaikutusta suorakulmaisessa lohossa, jonka leveys on b ja pituus on l , kuva 3.3. Pellolle voidaan käyttää muotokerrointa k , joka on pellon pituuden suhde leveyteen, $k = \frac{l}{b}$. Pinta-ala on tällöin $A = lb = kb^2$ ja kun pinta-ala ja muotokerroin tunnetaan, pellon leveys $b = \sqrt{\frac{A}{k}}$ ja pellon pituus $l = kb$. Työ koostuu edestakaisesta ajosta, kääntymisestä päisteessä, mahdollisista täytöistä ja tyhjentämisistä sekä lopuksi/aluksi päisteiden ajamisesta. Mitä pidempi peltolohko on, sitä vähemmän siinä on päisteajoa ja sitä parempi on kokonaistyösaavutus. Laskennassa voidaan käyttää yhtälöiden 3.9 ja 3.10 laskentatapoja.



Kuva 3.3: Suorakulmainen peltolohko, l=pituus, b=leveys, p=päiste

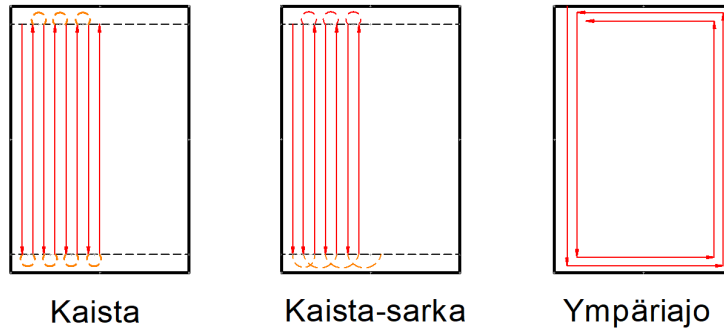
Esimerkki 31. Miten peltolohkon koko vaikuttaa kylvön työsaavutukseen, jos pellon ala on 1 ha, pellon pituuden suhde leveyteen on 2, koneen työleveys on 3 m ja ajonopeus on 7 km/h. Käännösaika päisteessä on 0,5 min ja täyttöaika on 10 min/ha.

Jätetään päisteen vaikutus muuten huomioimatta (päiste pitää kylvää erikseen) paitsi siihen tarvittava käännösaika. Lasketaan aluksi teoreettinen työsaavutus, $q = \frac{7[\text{km/h}] \cdot 3[\text{m}]}{10} = 2,1 \text{ ha/h}$ eli 0,48 h/ha. Pellon leveys $b = \sqrt{\frac{10000\text{m}^2}{2}} = 70,7 \text{ m}$ ja pituus $l = 141,4 \text{ m}$. Kun työleveys on 3 m, pellolla tarvitaan $\frac{141,4}{3} = 47$ työleveyttä eli 47 käännöstä päisteissä. Näihin kuluu aikaa 0,5 min käännöstä kohti eli kaikkiaan 24 min. Lisäksi tarvitaan 10 min/ha täyttöaika. Kokonaisaika on siten $0,48 + 0,4 + 0,17 = 1,05 \text{ h/ha}$ ja työhyötysuhde on $\eta_t = \frac{0,48}{1,05} = 46 \%$. Rajoittavana asiana tässä tapauksessa on päisteihin kuluva aika. Alla olevassa kuvassa on muutettu lohkon pinta-alaa 0,5 - 10 ha väliltä ja käytetty muotokerrointa 1 - 5. Kun lohkon koko kasvaa ja kun sen pituus suhteessa leveyteen lisääntyy, työsaavutus myös parane

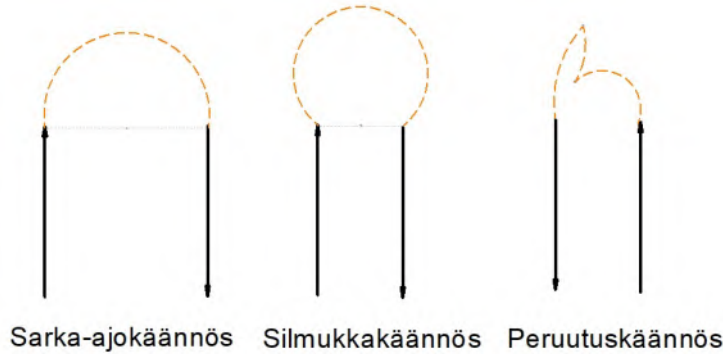


Ajotekniikat vaihtelevat työn, pellon muodon ja työntekijän mukaan. Kuvassa 3.4 on esitetty yleisimmät ajotekniikat [Klemola ym 2002].

Lohkon kulmissa kääntyminen voidaan tehdä myös eri tavoilla. Kuvassa 3.5 on esitetty erilaisia käännöstekniikkoja [Klemola ym 2002]. Lohkon kulmat eivät ole käytännössä suorakulmaisia, vaan ne voivat olla teräviä tai tylppiä. Kulmien jyrkkyys vaikuttaa myös käännösaikaan siten, että terävän kulman käännösaika on hieman pidempi. Kulmiin kuluva käännösaika on luokkaa 0,1 - 0,7 min. Ajotekniikan valinta riippuu työstä ja usein siitä miten edellisen ajokerran työjälki on näkyvissä.



Kuva 3.4: Peltolohkon ajotekniikkoja



Kuva 3.5: Lohkon kulmien käännöstekniikkoja

3.7 Kuivauskapasiteetti

Tarkastellaan aluksi kuivauksen perusteita, miten kosteus ilmoitetaan ja miten poistettava vesimäärä lasketaan. Seuraavaksi tarkastellaan kuivuriuunin periaatetta. Näiden jälkeen päästään pohtimaan miten kuivurin koko voidaan valita.

3.7.1 Materiaalien kosteuden ilmoittamistavat

Materiaalin kosteus (vesipitoisuus) ilmoitetaan veden osuutena joko kuivan materiaalin massasta tai märän materiaalin massasta. Meillä käytetään lähes yksinomaan vertailukohtana märän materiaalin määrää. Ulkomaisissa ja etenkin anglosaksisissa tutkimuksissa käytetään melko paljon vertailukohtana kuivan materiaalin määrää. Se on järkevin tapa ilmoittaa kosteus pitoisuus erilaisissa prosesseissa, koska kuivan materiaalin määrä säilyy samana läpi koko prosessin, mutta märän määrä vaihtelee jatkuvasti. Laskentaperusta ilmoitetaan niissä kirjaimilla $w_b = \text{wet basis} = \text{märkäkosteus}$ ja $db = \text{dry basis} = \text{kuiva kosteus}$.

Poistettava vesimäärä voidaan laskea viljan alkukosteuden ja viljamäärän perusteella. Viljamäärät ja sadot ilmoitetaan varastointikosteuden mukaan eli viljoilla 14 % kosteuden mukaan ja kosteusprosenttina käytetään märkäkosteutta eli vesimäärä ilmoitetaan erän kokonaispainon (kuiva aines + vesi) mukaan. Viljassa oleva vesimäärä M_{vesi} ja kuiva-aineksen määrä M_{kuiva} saadaan viljaerän kokonaismäärästä M_{koko} , kun kosteus pitoisuus on w (sadasosa) seuraavasti.

$$M_{vesi} = w \cdot M_{koko} \tag{3.11}$$

$$M_{kuiva} = (1 - w) \cdot M_{koko} \tag{3.12}$$

Yleensä tunnetaan erän tai hehtaarisadon määrä varastointikosteudessa sekä korjuu- ja varastointikosteudet. Poistettu vesimäärä voidaan laskea määrittämällä ensin varastointikosteudessa oleva kuiva-aineksen määrä. Tämä kuiva-ainesmäärä säilyy samana kosteus pitoisuuden muuttuessa, vain vesimäärä muuttuu kosteuden muuttuessa. Puintikosteudessa viljassa oleva vesimäärä $M_{vkorjuu}$ saadaan seuraavasti, kun korjuukosteus on w_{ko} .

$$M_{vkorjuu} = \frac{w_{ko} \cdot M_{kuiva}}{1 - w_{ko}} \tag{3.13}$$

Taulukko 3.2: Tavanomaisia hehtolitrainoja

Vilja	Tyypillinen hehtolitraino kg/hl
Vehnä	72 - 82
Ruis	70 - 76
Ohra	62 - 72
Kaura	50 - 58

Poistettavalle vesimäärälle voidaan johtaa yhtälö 3.14. Yhtälössä sato on ilmoitettu kuivattuna satona (kosteus w_v) ja kosteudet ovat märkäperusteisia (w_b).

$$M_{vpoisto} = M_{sato} \frac{w_{ko} - w_v}{1 - w_{ko}} \quad (3.14)$$

Vastaavasti, jos sato ilmoitetaan puintikosteudessa (w_{ko}), saadaan poistettavalle vesimäärälle yhtälö:

$$M_{vpoisto} = M_{puinti} \frac{w_{ko} - w_v}{1 - w_v} \quad (3.15)$$

$M_{vpoisto}$	Kuivauksessa poistettava vesimäärä
M_{sato}	Sadon massa varastointikosteudessa
M_{puinti}	Sadon massa puitaessa
w_{ko}	Sadon puintikosteus, sadasosa
w_v	Sadon varastointikosteus, sadasosa

Esimerkki 32. Viljasato on 4000 kg/ha varastointikosteudessa 14 % (w_b). Puintikosteus oli 22 % (w_b). Kuinka paljon öljyä tarvitaan kuivaamiseen, jos kuivauksessa tarvitaan 100 g kevyttä polttoöljyä yhden vesikilon poistamiseen? Kuinka kauan kuivuminen kestää, jos veden haihtumisnopeus on 146 kg/h?

Varastointikosteudessa yhden hehtaarin sadossa on vettä $0,14 \cdot 4000 = 560$ kg ja kuiva-ainetta $4000 - 560 = 3440$ kg. Puintikosteudessa hehtaarisadossa on vettä yhtälön 3.13 mukaisesti $\frac{0,22 \cdot 3440}{1 - 0,22} = 970$ kg ja hehtaarisato märkänä on $3440 + 970 = 4410$ kg. (Satohan ilmoitetaan varastointikosteudessa, laskussa on lähdetty tästä.) Kuivauksessa vettä poistui $970 - 560 = 410$ kg. Vedenpoistoon tarvitaan $410 \cdot 100 = 41,0$ kg kevyttä polttoöljyä. Jos polttoaineen tiheys on 830 g/l, tarvitaan 49 l öljyä. Veden poistumisnopeus on 146 kg/h, jolloin 410 kg haihduttaminen kestää $\frac{410}{146} = 2,8$ h. Kun polttoöljyn energiasisältö on 42,9 MJ/kg, kuivaamisen aikainen polttoaineteho on $\frac{41 \cdot 42,9}{2,8} = 174,5$ kW. Veden poiston lisäksi energiaan tarvitaan viljamassan lämmittämiseen kuivauslämpötilaan.

Laskuissa voidaan joutua muuttamaan puitu satotaso varastointikosteudelliseksi sadoksi tai päinvastoin. Yhtälöiden 3.16 ja 3.17 avulla voidaan laskea muutokset. Tämä on yleispätevä yhtälö ja toimii myös esimerkiksi nurmelle.

$$M_{puinti} = M_{sato} \cdot \frac{1 - w_v}{1 - w_{ko}} \quad (3.16)$$

$$M_{sato} = M_{puinti} \cdot \frac{1 - w_{ko}}{1 - w_v} \quad (3.17)$$

Esimerkki 33. Keskimääräinen satotaso varastointikosteudessa 14% 3600 kg/ha. Mikä on satotaso puitaessa, kun puintikosteus on 25%?

$s_{puinti} = 3600 \cdot \frac{1 - 0,14}{1 - 0,25} = 4128$ kg/ha. Viljassa on $4128 - 3600 = 528$ kg enemmän vettä puitaessa.

3.7.2 Hehtolitraino

Viljan hehtolitraino riippuu lajikkeesta, jyvän kunnosta, roskaisuudesta ja viljan kosteudesta. Lajikkeiden hehtolitrainot on ilmoitettu virallisten lajikekokeiden tuloksissa [Viralliset lajikekokeet]. Taulukossa 3.2 on tavanomaisia viljojen hehtolitrainoja.

Hehtolitraino muuttuu kosteuden muuttuessa, koska vesimäärä muuttuu ja myös jyvän koko muuttuu (turpoaa, kutistuu). Hehtolitrainon muutokseen voidaan käyttää yhtälöä 3.18. Siinä k_o -kerroin on jyvän koon muutoksen liittyvä kerroin.

$$hlp_2 = hlp_1 \cdot \frac{1 - w_2}{1 - w_1} \cdot \frac{1}{1 - k_o \cdot (w_1 - w_2)} \quad (3.18)$$

hlp_2	hehtolitraino kosteudessa w_2
hlp_1	hehtolitraino kosteudessa w_1
k_o	0,003 - 0,0045

Hehtolitra on 100 l eli 0,1 m³. Laskuissa tarvitaan usein kg/m³ lukua. Hehtolitraino kg/hl pitää kertoa silloin luvulla 10, jotta saadaan yksiköksi kg/m³.

Esimerkki 34. Kauran hehtolitraino oli 56 kg/hl 13 % kosteudessa. Mikä on hehtolitraino 22 % kosteudessa?

$$hlp_2 = 56 \text{ kg/hl} \cdot \frac{1-0,22}{1-0,13} \cdot \frac{1}{1-0,004 \cdot (0,22-0,13)} = 50 \text{ kg/hl} = 500 \text{ kg/m}^3.$$

3.7.3 Ilman ominaisuudet

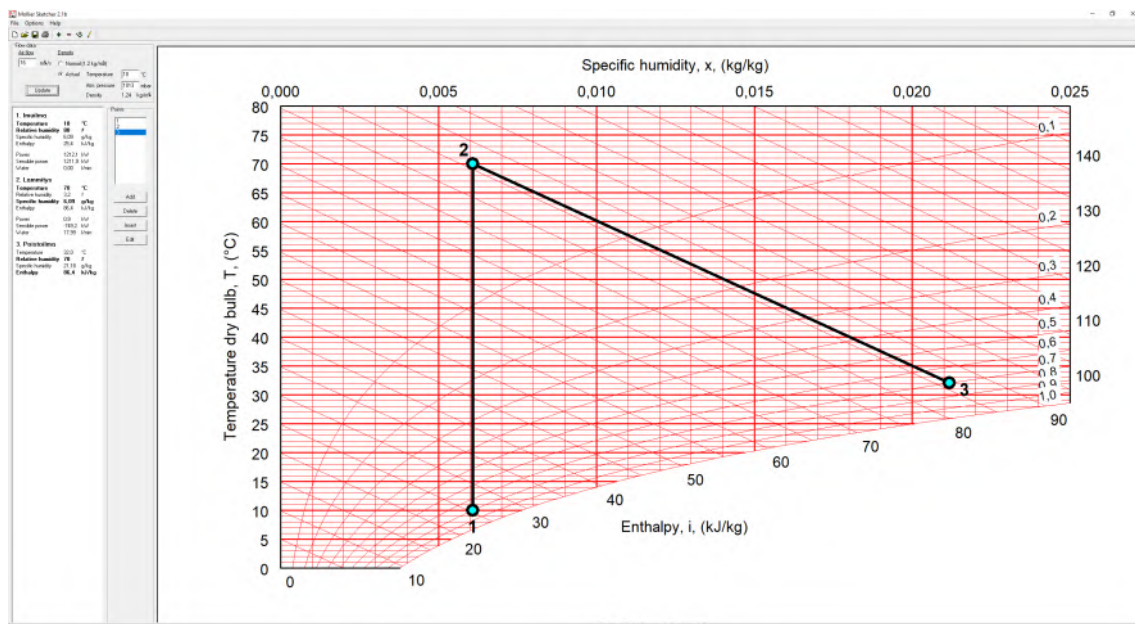
Viljassa oleva kosteus siirtyy jyvistä ilmaan ja ilma vie kosteuden kuivurista pois. Jotta tämä prosessi voidaan ymmärtää ja laskea, pitää tuntea myös ilman ominaisuudet. Koska olemme laskemassa kuivauksen kapasiteettiä, meille riittää se miten saamme ilman arvoja selville. Jos haluat tietää tarkemmin kuivauksen kulusta ja kuivausilman ominaisuuksista, ne löytyvät julkaisusta Maatilakuivurit [Hautala M. ym].

Ilmalla on seuraavat ominaisuudet, jotka pitää tuntea:

- **Suhteellinen kosteus** kuvaa sitä kuinka lähellä ollaan ilman suurinta kosteuden sitomiskykyä. Kun saavutetaan 100% kosteus ilma ei voi ottaa enempää vettä vastaan ja vesihöyry alkaa tiivistymään (kondensoitumaan) vedeksi. Lämpötila vaikuttaa siihen kuinka paljon ilma voi sisältää vesihöyryä ja mitä korkeampi lämpötila on, sitä enemmän se pystyy sitomaan vesihöyryä.
- **Kosteussuhde** (absoluuttinen kosteus) ilmaisee kuinka paljon vesihöyryä ilmassa on kuivan ilman kilogrammaa kohden. Yksikkönä voi olla vesihöyry kg/kuivailma kg tai vesihöyry g/kuivailma kg. Kuivuriuunin imemän ilman kosteussuhde pysyy samana ilman kulkiessa uunin läpi, mutta suhteellinen kosteus muuttuu.
- **Ilman tiheys** muuttuu ilmanpaineen, lämpötilan ja kosteuspitoisuuden mukaan. Kosteuden vaikutus on pieni, joten usein laskuissa käytetään kuivan ilman tiheyttä. Normaalissa ilmanpaineessa ja 15 C lämpötilassa kuivan ilman tiheys on 1,226 kg/m³. Kun ollaan ulkoilman lämpötiloissa 0 - 20 C kuivan ilman tiheys on 1,3 - 1,2 kg/m³
- **Ominaisilavuus** on tiheyden käänteisarvo, 0 - 20 C lämpötiloissa ilman ominaisilavuus on 0,77 - 0,83 m³/kg
- **Entalpia** on ilman lämpösisältö siten, että 0 C lämpötilassa entalpia on 0 kJ/kg. Entalpiaan vaikuttaa ilman lämpötila ja vesihöyrymäärä
- **Tilavuusvirtaus**, materiaalin virtaus (esimerkiksi kuivausilma, veden poistumisnopeus) ilmoitetaan tilavuuden avulla, m³/h tai m³/s.
- **Massavirtaus**, materiaalin virtaus ilmoitetaan massan avulla, esimerkiksi kg/s. Jos tilavuusvirtaus tunnetaan, massavirtaus saadaan kertomalla tilavuusvirtaus materiaalin tiheydellä.
- **Adiabaattisessa** prosessissa ilmasta ei poistuu lämpöä eikä siihen tule lisää lämpöä. Hyvin eristetty kuivuri toimii lähes adiabaattisesti, lämpöhäviöt ovat hyvin pienet.
- **Mollier** diagrammin avulla voidaan esittää ilman tilan muutokset ja siitä saadaan ilman arvot selville. Mollier diagrammin lisäksi on Carrier diagrammi, jossa samat asiat esitetään hieman toisella tavalla. Netissä hakusanoilla 'Mollier diagram', 'Carrier diagram' tai 'Psychrometric chart' voi ladata näitä diagrammeja.
- **Kuiva lämpötila** (dry bulb temperature) on normaalisti mitattu ilman lämpötila
- **Märkä lämpötila** (wet bulb temperature) saadaan, kun lämpömittari peitetään kostealla harsolla ja siihen kohdistetaan ilman virtaus. Veden haihtuminen viilentää mittarin ja tuloksena saadaan ilman märkä-lämpötila. Ennen elektronisia antureita tämä oli yleisin ilman kosteuden mittaustapa ja esimerkiksi Mollier diagrammissa on kuiva- ja märkälämpötilat ja niiden risteyskohdasta voidaan lukea ilman kosteus.

- **NTP** (Normal Temperatur and Pressure). Ilman lämpötila ja paine vaikuttavat ilman tiheyteen. Kun ilma lämpenee uunissa, se myös harvenee ja ilmavirtaus m^3/h kasvaa. Ilman massavirtaus kg/s pysyy samana. Jos puhaltimen ilmamäärät mitataan ennen tai jälkeen uunin, saadaan erilaiset arvot. Puhaltimien testauksissa arvot normioidaan normaalitilaan (NTP). Ilmanpaineena käytetään yleensä ilmakehän normaalipainetta, mutta lämpötila voi olla 0 C, 15 C tai 20 C.

Tarkastellaan kuivauksen kulkua Mollier diagrammin avulla, kuva 3.6. Imuilman lämpötila on 10 C ja kosteus on 80%, piste 1. Vasemmassa yläkulmassa näkyy imuilman lasketut arvot, kosteussuhde 6,09 g vettä/kg kuivaa ilmaa ja entalpia 25,4 kJ/kg. Uunissa ilma lämpenee 70 C lämpötilaan. Kosteussuhde pysyy samana, ilmaan ei tule lisää vettä eikä siitä poistu vettä. Suhteellinen kosteus muuttuu 3,2 prosenttiin, koska ilma pystyy sitomaan kuumana paljon enemmän vettä itseensä. Entalpia on 86,4 kJ/kg lämmittämisen takia. Piste 3 kuvaa kuvitteellista poistoilman tilaa. Poistoilman lämpötila on 32 C ja entalpia on sama kuin uunin jälkeen (adiabaattinen prosessi). Todellisuudessa kuivurin rakenteissa on lämpöhäviöitä ja piste 3 olisi enemmän vasemmalla. Poistoilman suhteellinen kosteus on nyt 70 % ja ilmassa on 21,18 g vettä/kg kuivaa ilmaa. Viljasta on siirtynyt vettä kuivausilmaan ja veden sitominen on alentanut ilman lämpötilaa.

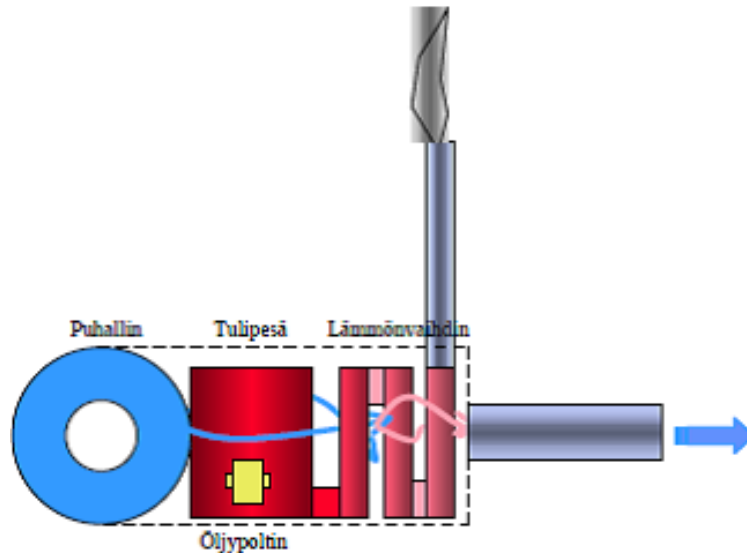


Kuva 3.6: Kuivauksen kulku Mollier diagrammissa [Mollier Sketcher]

3.7.4 Kuivuriuunit

Kuivuriuunit poikkeavat keskuslämmityskattiloista, joissa vesi on välityksineena. Kuivureissa käytetään lähes yksinomaan suoraa ilmalämmitystä. Sillä saadaan aikaan yksinkertainen ja edullinen rakenne ja jäätymisvaaraa ei ole. Kuivuriuunissa on samanlaiset osat kuin keskuslämmityskattiloissa. Tulipesä on erikseen ja samoin lämmönvaihdin on erikseen, kuva 3.7. Kuivuripuhaltimen ilma puhalletaan tulipesän ohi ja lämmönvaihtimen läpi kuivuriin. Lämpimät pinnat lämmittävät kuivausilman. Tätä uunityyppiä kutsutaan ylipaineuuniksi. Toisen vaihtoehdona on puhaltimen sijoitus kuvurisiilojen poistoputkeen, jolloin uuni ja siilot ovat puhaltimen imu puolella ja niissä on alipaine. Tyyppiä kutsutaan alipaineuuniksi.

Kuivauslämpötila valitaan kuivattavan viljan ja käytön perusteella (siemen, rehu, mallas) ja sen halutaan pysyvän tasaisena. Kuivausilma otetaan ulkoa ja sen lämpötilan muutokset vaikuttavat kuivausilman lämpötilaan. Päiväaikaan imuilma voi olla jopa 15 - 20 C ja yöaikaan voidaan liikkua nollan paikkeilla. Jotta kuivauslämpötila pysyisi tasaisena, uunin tehon on muututtava. Sitä voidaan säätää öljyuuneissa öljypoltin suuttimien kokoa vaihtamalla tai öljynpainetta muuttamalla. Tämä säätö on tehtävä käsin ja automaattiseen toimintaan päästetään, jos poltin on kaksiteho tai moduloiva poltin. Biokattiloita käytettäessä tehoa voidaan säätää polttoaineen syöttöä muuttamalla. Kuivuriuunin lämpötehon ja ilmamäärän välillä on yhtälön 3.19 mukainen yhteys. Sen mukaisesti uunin teho riippuu puhaltimen ilmamäärästä ja siitä kuinka paljon ilmaa lämmitetään kuivuriuunissa (kuivauslämpötila).



Kuva 3.7: Kuivuriuunin rakenne

$$P = q_v \cdot r_i \cdot c_i \cdot \Delta T \quad (3.19)$$

P	Uunin lämpöteho
q_v	Uunin tilavuusvirtaus
r_i	Ilman tiheys
c_i	Ilman ominaislämpökapasiteetti 1,0 kJ/(kg K)
ΔT	Kuivausilman lämpötilan nousu uunissa

Esimerkki 35. Kuivuriuunin puhallusilmamäärä on 15 000 m³/h ja uuni nostaa imuilman 10 °C lämpötilasta lämpötilaan 65 °C. Kuinka suuri on uunin lämmitysteho ?

Oletetaan ilman tiheydeksi 1,25 kg/m³, jolloin massavirraksi saadaan 15 000 m³/3600s · 1,25 kg/m³ = 5,21 kg/s. Ilman lämpökapasiteetti on 1,0 kJ/(kg·K) ja uuni nostaa lämpötilaa 55 K (65 °C - 10 °C = 55 °C). Lämmitysteho $P = 5,21 \text{ kg/s} \cdot 1,0 \text{ kJ/(kg·K)} \cdot 55 \text{ K} = 287 \text{ kW}$. Jos imuilman lämpötila muuttuu, silloin vastaavasti uunin tehon on muututtava, jos kuivausilman lämpötila halutaan pitää samana. Ilmamäärän säätö kuristamalla vähentää ilmamäärää, ja jos uunin teho pysyy samana, kuivausilman lämpötila kohoaa.

3.7.5 Veden poistumisnopeus

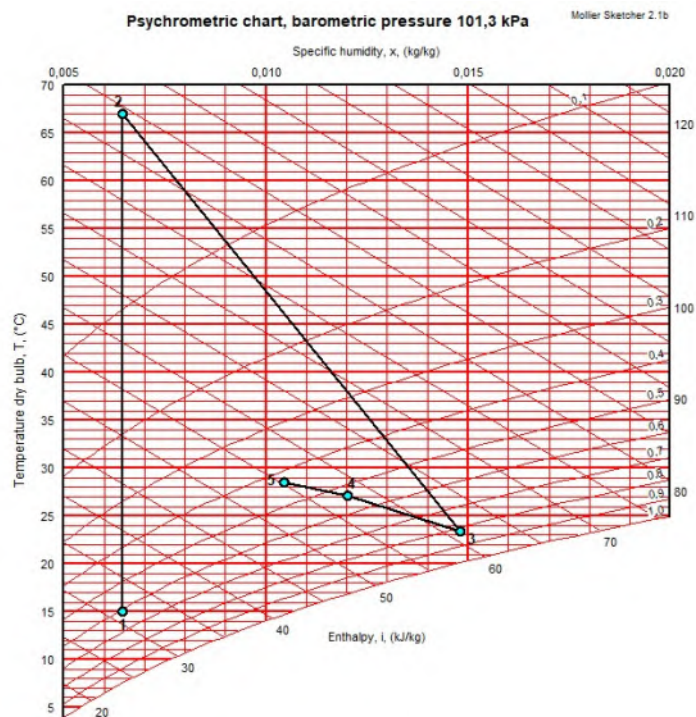
Jyvissä oleva kosteus siirtyy kuivausilmaan, joka siirtää veden kuivurista pois. Periaatteessa mitä suurempi ilmamäärä on, sitä nopeammin kosteus siirtyy kuivurista pois. Rajana on jyvien kulkeutuminen ilman mukana. Jyvät lähtevät liikkeelle kun ilman nopeus on luokkaa 7-10 m/s. Veden poistumisnopeus voidaan laskea ilman sisältämän vesimäärän mukaan. Jos esimerkiksi kuivausilman kosteussuhde on 0,008 kg vettä kuivaa ilmakiloa kohden ja kuivurista poistuvan ilman vastaava arvo on 0,023, jokaista ilmakiloa kohden vesimäärä on lisääntynyt 0,023 - 0,008 = 0,015 kg. Veden poistumisnopeus saadaan laskettua yhtälön 3.20 mukaan. Yhtälössä q_m on ilman massavirtaus ja Δx on ilman sitoma lisävesimäärä.

$$q_{H_2O} = q_m \cdot \Delta x \quad (3.20)$$

q_{H_2O}	Veden poistumisnopeus
q_m	Kuivausilman
Δx	Kuivausilman sitoma vesimäärä

Esimerkki 36. Jos esimerkiksi ilman massavirtaus olisi 4,44 kg/s (13 000 m³/h), veden poistumisnopeus on 4,44 · 0,015 = 0,067 kg/s = 240 kg/h.

Kuivauksen alussa veden poistuminen on nopeaa, jyvistä lähtee pinnalla oleva helposti irtoava vesi ensin. Kui-



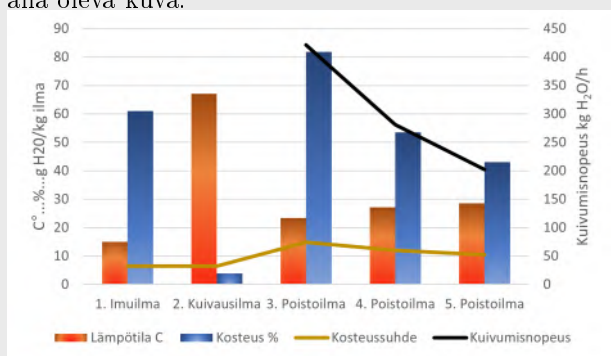
Kuva 3.8: Kuivauksen kulku

vauksen loppuvaiheessa poistumisnopeus pienenee, koska veden siirtyminen jyvän sisästä pintaan hidastaa veden poistumista jyvistä. Käytettäessä tavanomaista kuivauslämpötilaa (65 - 70 C) kuivauksen alussa poistoilman kosteus on 90 - 100% ja poistolämpötila on 5 - 10 C imuilmaa korkeampi. Kuivaus lopetetaan normaalisti kun poistoilman lämpötila on 35 - 40 C. Poistoilman kosteus on tällöin 40% luokkaa.

Koska veden siirtyminen jyvistä muuttuu kuivauksen aikana, myös kuivausnopeus muuttuu kuivauksen aikana. Kuvassa 3.8 on esitetty kuivauksen kulku Mollier diagrammissa. Kuivauksen alkuvaiheessa poistoilma on pisteen 3 mukaisessa tilassa ja kuivauksen edistessä poistoilma lämpenee ja kuivuu (pisteet 4 ja 5). Kuvan esimerkki on todellisesta kuivurista ja sen lämpöhäviöt näkyvät siinä ettei prosessi ole adiabaattinen vaan kuivurisiilon ja putkien lämpimät pinnat aiheuttavat lämpöhäviöitä. Unin jälkeen ilman entalpia on 84 kJ/kg ja pisteessä 3 poistoilmassa se on 61 kJ/kg.

Esimerkki 37. Mikä on kuvan 3.8 kuivauksessa veden poistumisnopeus kun uunin ilmamäärä on 14 kg/s?

Imuilman lämpötila on 15 C ja suhteellinen kosteus on 61%. Kun käytetään Mollier Sktecher ohjelmaa tilapisteen arvot saadaan ohjelmasta. Imuilma sisältää vettä 6,45 g jokaista kuivan ilmakilon kg kohti. Kuivausilman lämpötila on 67 C, jolloin suhteellinen kosteus on 3,8 %. Vesimäärä on sama kuin imuilmassa, 6,45 g/kg ilma. Pisteen 3 kohdalla poistoilman lämpötila on 23,4 C ja suhteellinen kosteus on 81,8 %. Kosteussuhde on 14,8 g/kg ilmaa. Ilma on sitonut viljasta vettä $14,8 - 6,45 = 8,35$ g/kg ilma. Kuivausilman massavirta oli 14 kg/s, jolloin veden poistumisnopeus on $8,35 \cdot 14 = 116,9$ g/s = 421 kg/h. Kun muutkin tilapistet lasketaan, saadaan alla oleva kuva.



3.7.6 Kuivurin mitoitus

Kuivurin koolle ja kapasiteetille on hyvin vaikeata antaa selvää valintaohjetta. Valintaan vaikuttaa viljelyala, kasvilajit ja -lajikkeet, varastointi ja mitoitetaanko kuivurin keskimääräisten vai huonojen olosuhteiden mukaisesti. Mitoitukseen vaikuttaa hyvin voimakkaasti viljan kosteus. Märkkää viljaa ei välttämättä kuivata kahta erää vuorokaudessa.

Kuumailmakuivurin kapasiteetin voidaan sanoa riippuvan seuraavista seikoista:

- Kuivurin tilavuus
- Elevaattorin siirtoteho
- Kuivuriuunin teho
- Viljan alkukosteus
- Puskurivaraston koko
- Erillisen jäähdytysiloon käyttö
- Vuotuinen satotaso

Yleensä kuivurin kokona käytetään sen tilavuutta. Tämä ei kylläkään kerro kuivurin kuivaustehoa yksinään, vaan oheislaitteet (uuni, elevaattori) vaikuttavat erän kuivausnopeuteen. Elevaattorin siirtoteho vaikuttaa kuivurin täyttö ja tyhjennysaikoihin. Jos elevaattorin teho on pieni, viljan siirtoajat voivat tulla pitkiksi, jolloin varsinainen kuivurin käyttöaste jää pieneksi. Erillisen jäähdytysiloon käyttö liittyy myös kuivurin käyttöasteen parantamiseen. Ennen kuin vilja voidaan varastoida, se on jäähdytettävä. Tämä jäähdytysvaihe kestää aikansa. Jos vilja voitaisiin siirtää erilliseen jäähdytysiloon, kuivurin käyttöastetta voitaisiin nostaa. Viljan alkukosteus ja satotaso vaikuttavat poistettavaan vesimäärään. Mitä kosteampaa vilja on, sitä enemmän vettä on poistettava ja sitä kauemmin kuivauserän kuivaus kestää.

Kuivurisiilojen koko

Otetaan kuivurin valintakriteeriksi se, että pystytään kuivaamaan päivän aikana korjattu sato seuraavan vuorokauden aikana ja vielä niin, että kuivaus tapahtuu kahdessa erässä. Tällöin normaalisti yö voidaan nukkua rauhassa. Jos leikkuupuimuri pui keskimäärin 1 ha/h tunnissa, päivässä puidaan 10 ha sato eli märkäsadon ollessa 4 t/ha saadaan päivässä 40 t viljaa. Jos kuivauseriä on kaksi, yhteen erään pitää mahtua 20 t viljaa ja esimerkiksi 60 kg hehtolitrainon mukaan tämä tarkoittaa 33 m³ kuivurisiiloa. Laitetaanpa tämä järkeily yhtälöiden muotoon. Puimurin kapasiteetti voidaan laskea yhtälöstä 3.8. Päivässä puitava viljamäärä on siten yhtälön 3.21 mukainen.

$$M_{vrk} = q_{tod} \cdot t_{vrk} \cdot s \quad (3.21)$$

M_{vrk}	päivässä puitu viljamäärä
q_{tod}	puimurin puintikapasiteetti (puintiteho)
t_{vrk}	päivittäinen puintiaika h/vrk
s	satotaso kg/ha (märkkää viljaa)

Kuivurin koko saadaan sitten sen perusteella kuinka monessa erässä puitu sato halutaan kuivata, yhtälö 3.22.

$$V_k = \frac{M_{vrk}}{n \cdot r} \quad (3.22)$$

V_k	kuivurin kennoston tilavuus m ³
r	viljan tilavuuspaino kg/m ³
n	vuorokaudessa kuivattavien viljaerien määrä, 1 - 3 kpl

Esimerkki 38. Tilalla on 100 ha viljalla ja puimurin työleveys on 3,5 m. Kuinka suuri kuivuri tilalle kannattaa hankkia?

Mitoitetaan kuivuri sen mukaan kuinka paljon puimuri pystyy puimaan päivässä. Jos puimurin ajonopeus on 5 km/h, työsaavutus on, kun käytetään puinnin työhyötysuhteena 70% ja työleveyden hyötysuhteena 95%, $q_A = \frac{5 \cdot 3,5}{10} \cdot 0,7 \cdot 0,95 = 1,2$ ha/h. Jos satotaso on 4000 kg/ha, tilavuuspaino on 600 kg/m³ ja puintiaika on 8 h, saadaan päivän puintimääräksi $M_{ork} = 1,2 \cdot 8 \cdot 4000 = 38400$ kg. Kuivurin tilavuus on tällöin, jos kuivataan kaksi erää vuorokaudessa, $V = 38400/2/600 = 32$ m³. Kun kyseessä on 100 ha tila, kaikkiaan saadaan 4000 kg/ha sadon mukaisesti 400 000 kg kokonaissato. Tämä puiminen kestää 100 ha/1,2 ha/h = 83 h eli reilut 10 vrk. Kaikkiaan kuivauseriä on 400 000 kg/600 kg/m³/32m³ = 21 kpl.

Lämminilmakuivurin vastaanottokapasiteetti ei etenkin märkää viljaa kuivattaessa ole riittävä. Kapasiteettia voidaan parantaa puskurivarastolla, joka on joko kylmäilmakuivuri tai tuuletettu siilo. Nämä takaavat viljan säilymisen puskurissa ja se voidaan purkaa kuumailmakuivurilla. Märän viljan alkukuivaus puskurissa nostaa varsinaisen kuivurin kapasiteettia, koska vilja kuivuu siinä jo jonkin verran. Puskurivarastojen avulla voidaan myös pienentää kuivurin kokoa edellä olevan laskuesimerkin antamasta tuloksesta, sillä on todennäköistä, että puinti jossain vaiheessa keskeytyy. Kun puskurivarastoja puretaan taukojen aikana, paranee myös varsinaisen kuivurin käyttöaste. Sadonkorjuukauden lopuksi puskurivarastoja voidaan käyttää viljan varastointiin normaalien siilojen tavoin.

Kuivuriuunin koko

Määritetään ensin uunin tilavuusvirtauksen tarve. Kuivurin kennoston tilavuus on V_k . Kennostoon mahtuvan viljan massa on tällöin $M_k = r \cdot V_k$, jossa r on märän viljan tilavuuspaino. Märän viljan tilavuuspaino on 5 - 10 % alhaisempi kuin kuivan viljan tilavuuspaino (hehtolitrapaino). Kuivuessa viljaerä kutistuu tämän takia. Seuraavaksi voidaan laskea yhtälöllä 3.15 poistettava vesimäärä. Tämä vesimäärä pitäisi saada poistettua halutussa ajassa. Näistä saadaan kuivurin ilmavirtaukselle yhtälö 3.23.

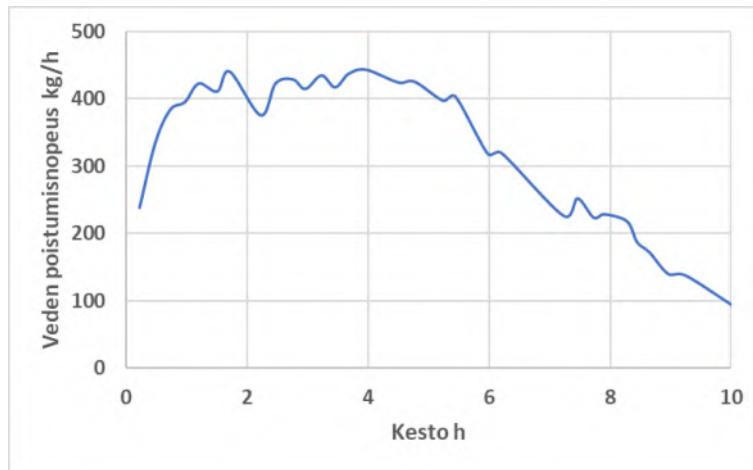
$$q_m = \frac{q_{H_2O}}{\Delta x} = \frac{r_k \cdot V_k}{t \cdot \Delta x} \cdot \frac{w_k - w_v}{1 - w_v} \quad (3.23)$$

q_m	puhaltimen massavirta
V_k	kuivurin kennoston tilavuus m ³
r_k	viljan tilavuuspaino puitaessa kg/m ³
t	erän haluttu kuivausaika h
Δx	kuivausilman sitoma vesimäärä

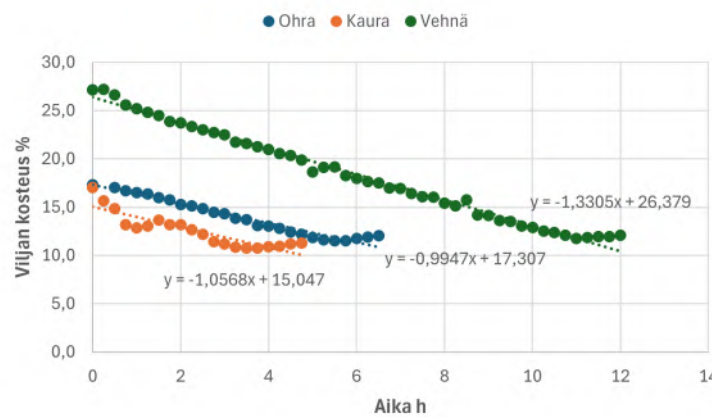
Yhtälö 3.23 antaa keskimääräisen puhallusilman tarpeen. Viljan kuivausnopeus ei kuitenkaan ole vakio, vaan se vaihtelee kuivauksen aikana, kuva 3.9. Alussa osa uunin lämmöstä kuluu viljan ja kuivurin rakenteiden lämmittämiseen. Sen jälkeen tullaan vaiheeseen, jossa veden poistumisnopeus pysyy tasaisena. Jyvän kuivuessa kosteuden pitää siirtyä sisältä pintaan. Tämä hidastaa kuivumista loppuvaiheessa. Kuvan esimerkissä tasaisen vaiheen nopeus on 35% suurempi kuin keskimääräinen nopeus. Yhtälön 3.23 antama keskimääräinen nopeus on kuivauksen kannalta hieman liian alhainen ja käytännössä pitää käyttää suurempia arvoja. Vilja määrittää lopulta kuinka se luovuttaa kosteutta ja oikein valitun ilmamäärän voi todeta mittaamalla poistoilman kosteuden. Kun veden poistuminen on nopeimmillaan poistoilman kosteuden pitäisi olla 90 - 95 %. Alhaisempi lukema tarkoittaa turhan suurta ilmamäärää ja korkea lukema liian pientä ilmamäärää. Kuivauksen energiatehokkuutta voitaisiinkin parantaa säätämällä virtausta kuivauksen aikana. Jokiniemi [Jokiniemi 2016] sai kokeissa ilmanvirran säädöllä 5 - 14 % energiasäästön. Uunin antama lämpöteho voidaan laskea yhtälöstä 3.19.

Esimerkki 39. Kuivurin kennoston tilavuus on 32 m³. Yhden erän kuivausajaksi halutaan 5 h, kun puidaan viljaa, jonka kosteus on 22% ja tilavuuspaino puitaessa on 650 kg/m³. Ilman oletetaan pystyvän sitomaan 16 g vettä/kg ilmaa ja kuivauksen loppukosteus on 14%. Ilman tiheys on 1,25 kg/m³. Kuinka suuri pitää uunin antaman tilavuusvirtauksen olla?

Kuivattava viljaerä on $32 \cdot 650 = 20800$ kg. Poistettava vesimäärä on $20800 \frac{22 - 14}{100 - 14} = 1935$ kg. Tämä pitää kuivata 5 h aikana, jolloin vettä pitäisi poistua $\frac{1935}{5} = 387$ kg/h. Yksi ilmakilo pystyy sitomaan 16 g vettä, jolloin tarvitaan koko vesimäärän poistoon 120 938 kg ilmaa ja $\frac{120938}{5} \approx 24200$ kg/h. Suoraan yhtälöön sijoitettuna saadaan $q_m = \frac{650 \cdot 32}{5 \cdot 0,016} \frac{22 - 14}{100 - 14} \approx 24200$ kg/h $\Rightarrow 19400$ m³/h. Käytännössä kannattanee hankkia 20 - 30 % suurempi virtausmäärä, joka ottaa huomioon suurimman ja keskimääräisen veden poistonopeuden eron. Tähän mitoitukseen liittyy melkoisesti epävarmuuksia, esimerkiksi siihen kuinka paljon vettä vilja luovuttaa.



Kuva 3.9: Esimerkki veden poistumisnopeudesta kuivauserän aikana



Kuva 3.10: Viljan kosteusprosentin muutos kuivumisen aikana

3.7.7 Kuivumisaika käytännössä

Kun tarkastellaan viljan kuivumista sen mukaan kuinka viljan kosteus muuttuu kuivumisen aikana, saadaan kuvan 3.10 mukainen tulos. Kosteusprosentti laskee melko suoraviivaisesti kuivauksen aikana. Ainoastaan loppuvaiheessa, kun vilja on kuivaa, kuivuminen hidastuu. Tätä on helppo käyttää kuivumisaikojen arviointiin omassa kuivurissa. Rekisteröidään viljan alkukosteus ja aloitusaika. Kuivauksen loputtua rekisteröidään loppukosteus ja loppuaika. Tämän perusteella voidaan laskea kuinka monta prosenttiyksikköä vilja kuivui tunnissa. Tulokseen vaikuttaa kuivausilman lämpötila, ilmamäärä, jos se on säädettävä, viljalaji ja viljan kunto. Pitkän seurannan tuloksena nämäkin saadaan arvioitua.

Esimerkki 40. Viljan alkukosteus oli 25 % ja kuivurin pysähtyessä mitattu viljan kosteus oli 13 %. Kuivaus kesti 8 tuntia. Kosteutta poistui keskimäärin $\frac{25-13}{6,5} = 1,5$ %/h.

3.8 Työketjut

Sama työ voidaan usein tehdä usealla eri tavalla ja työtehtävään kuuluu harvoin vain yksi kone, vaan se muodostuu koneketjuista. Koneistuksen lisääminen ja koneiden suurentaminen lisää työsaavutusta, mutta samalla myös kustannukset lisääntyvät ja maaperän tiivistymisriski lisääntyy.

Työn kapasiteetin määrittämisessä on tärkeää määritellä työntekijöiden ja koneiden määrä. Yksin tehtynä työt joudutaan tekemään peräkkäin, kun taasen useamman työntekijän ja koneen järjestelmä mahdollistaa yhtäaikaisen (rinnakkaisen) työn teon. Jos työt ovat peräkkäisiä, esim. äestys kahteen tai kolmeen kertaan ja kylvö, silloin kokonaistyösaavutus on näiden osien summa. Jos töitä tehdään samaan aikaan rinnakkain, silloin kullekin vaiheelle riittää sama kapasiteetti. Käytännössä töitä joudutaan usein lomittamaan ja silloin malli on eräänlainen sekamalli.

Maataloustyöt voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen, tilakeskuksen työt, kuljetukset ja peltotyöt. Kokonaiskapasiteetti on tällöin se, jolla näistä on pienin kapasiteetti. Silloin kun työvaihe seuraa toista, esimerkiksi puintia seuraa sadon kuivaaminen, pitäisi muistaa prosessiteollisuuden perusperiaate, seuraavan työvaiheen pitäisi olla aina hieman nopeampi kuin edellinen. Tällöin ei synny ruuhkautumia.

3.8.1 Peräkkäiset työvaiheet

Kun meillä useita peräkkäisiä työvaiheita, kokonaisaika muodostuu eri työvaiheiden osa-aikojen summasta, yhtälö 3.24.

$$t_{työ} = \sum \frac{v_i \cdot b_i \cdot \eta_i}{A} = \frac{1}{A} \sum v_i \cdot b_i \cdot \eta_i \tag{3.24}$$

Jokaisella koneella on oma työleveytensä ja ajonopeutensa ja kokonaisajassa nämä tulevat mukaan. Koneiden koon valinnan perusteena voidaan käyttää vetokoneen eli traktorin kokoa ja valitaan sen mukaan sopivat työkooneet. Usein hankitaan uusia koneita jo valmiina oleviin koneketjuihin, jolloin valinnassa on muitakin vaikuttavia seikkoja.

Esimerkki 41. Tilalla on peltoa 75 ha ja kevättyöt halutaan tehdä 10 vrk aikana. Tilalla on yksi työntekijä, joka tekee kaikki työt. Kevättyöt tehdään traditionaalisesti, tasausäestys, äestys ja kylvä. Valitse sopivat kevättyökoneet, kun käytettävissä on 10 vrk työhön, päivässä on äestykseen 10 h tehokasta työaikaa ja kylvöön 8 h. Koneiden luotettavuus on 0,95 ja työleveyden hyötysuhde on 0,95. Työhyötysuhde äestyksessä on 0,85 ja kylvössä 0,7.

Ratkaistaan tämä lineaarisena optimointina ja käytetään apuna Excelin Solver ominaisuutta. Jotta laskut onnistuisivat, ensiksi pitää antaa koneiden ajonopeudet, hyötysuhteet sekä jokin työleveys koneille. Optimoinnin laskennassa löydetään myöhemmin näille oikeat leveydet. Solussa E47 on kokonaisaika vuorokausina. Annetaan Solverille ehto, että tämän pitää olla 10 vrk eli soluun C10 annettu kevättöiden aika. By Changing Variable Cells: annetaan muuttujat eli työleveydet. Sitten asetetaan näille rajoitteet (Subject To Constraints). Tasausäkeen työleveyden halutaan (solu C17) halutaan olevan vähintään 5 m ja enintään 10 m. Äkeen työleveyden (solu C26) halutaan olevan vähintään 4 m ja enintään 10 m. Kylvökoneen työleveyden (solu C40) halutaan olevan vähintään 3 m ja enintään 6 m. Sitten painetaan Solve nappulaa ja Excel etsii tälle ratkaisun ja sijoittaa lasketut arvot suoraan kyseisiin soluihin.

Perustiedot	Pinta-ala	75 ha	Konekapasiteetti	7,5 ha/vrk
	Työpäivien määrä	10 vrk		
Äestys	Työaika pelolla päivässä	10 h/vrk		
	Tasausäestys nopeus	12 km/h	työsaavutus	8,7 ha/h
	leveys	10,0 m	työaika	8,6 h
	työhyötysuhde	0,85		0,9 vrk
	työleveyden hyötysuhde	0,95		
	äkeen luotettavuus	0,95		
	traktorin luotettavuus	0,95		
	äestyskerrota	1		
	Äestys nopeus	10 km/h	äestysken työsaavutus	3,6 ha/h
	leveys	4,0 m	työsaavutus äestyskerrota huomioiden	1,8 ha/h
	työhyötysuhde	0,85	työaika	41,7 h
	työleveyden hyötysuhde	0,95		4,2 vrk
	äkeen luotettavuus	0,95		
	traktorin luotettavuus	0,95		
	äestyskerrota	2		
	Tasausäestys + äestys kesto	50,3 h		5,0 vrk
Kylvä	Työaika pelolla päivässä	8 h/vrk		
	Kylvön nopeus	7 km/h	työsaavutus	1,5 ha/h
	leveys	3,4 m	työaika	49,7 h
	työhyötysuhde	0,7		
	koneen luotettavuus	0,95		
	traktorin luotettavuus	0,95		
	Kylvön kesto	49,7 h		6,2 vrk
Yhteenveto	Kokonaisaika	100,0 h		11,2 vrk
	Työsaavutus	0,75 ha/h		6,7 ha/vrk

Tulokseksi saadaan tasausäkeelle 10,0 m leveys, äkeelle 5,3 m leveys ja kylvökoneelle 4,0 m leveys. Koneiden rajoitteita voitaisiin muuttaa tai jos meillä on jo olemassa kone, sitä ei laitekaan muuttujaksi (variable), jolloin saadaan lasketua hankittavan koneen työleveys. Lisäksi voisimme kiinteän ajonopeuden sijasta käyttää ajonopeuksia muuttujina. Jos rajoitteet asettaa liian tiukoiksi, silloin Solver ei löydä tulosta. Muuttamalla niitä voi löytää ratkaisun.

Excelin eri versioissa Solverin käyttöliittymä voi olla erilainen. Solvereita voi myös olla kaksi, toinen Home välilehdellä ja toinen Data välilehdellä. Solverin käyttö voidaan myös automatisoida käyttämällä sitä makron kautta.

3.8.2 Rinnakkaiset työvaiheet

Jos käytettävissä on useita traktoreita, kuljettajia ja koneita, silloin voidaan tehdä useaa työtä yhtä aikaa. Tällöin koneiden kapasiteettia voidaan pienentää peräkkäisiin työvaiheisiin verrattaessa, koska jos jokaisella työllä on oma kone ja kuljettaja, yhdellä koneella on käytettävissä yhtä paljon työaika kuin peräkkäisessä koko ketjulla.

Esimerkki 42. *Tilalla on peltoa 75 ha ja kevättyöt halutaan tehdä 10 vrk aikana. Vuorokaudessa 10 h tehokasta työaika. Tilalla on kaksi työntekijää ja työt on jaettu siten, että toinen äestää ja toinen kylvää. Kevättyöt tehdään traditionaalisesti, tasausäestys, äestys kahteen kertaan ja kylvö.*

Nyt kummallakin traktorilla on aikaa 10 vrk tehdä omat työnsä. Kun lasketaan samoilla arvoilla kuin edellisessä esimerkissä, saadaan äestykseen kuluva ajaksi 5 vrk eli puolet verrattuna edelliseen esimerkkiin. Kylvölle samoin saadaan kestoajaksi 5 vrk.

3.8.3 Koneketjut eri töissä

Hyvin harvoin koko työ on yhden koneen tekemää. Usein on kyseessä koneketjut eli yhtä työvaihetta seuraa seuraava vaihe. Työt voidaan myös tehdä erilailla. Kylvötöissä voidaan käyttää perinteisiä menetelmiä tai siirtä suorakylvöön, sato voidaan kuivata tai säilöä. Kaikki nämä vaikuttavat sekä kapasiteettiin, kustannuksiin ja energian käyttöön. Tässä kappaleessa käydään muutaman esimerkin kautta erilaisia koneketjuja ja niiden osien koon valintaa. Käytännössä pellot ovat lohkoissa ja ne ovat eri etäisyyksillä tilakeskuksesta. Menetelmiä voi soveltaa omaan tilaan laskemalla esimerkiksi keskimääräisten etäisyyksien avulla kuljetusaikoja tai sitten käyttämällä keskimääräisiä arvoja.

Laskennassa on paljon muuttujia, jotka vaikuttavat lopputulokseen. Esimerkiksi nurmen korjuussa tilavuuspainot (kuormapainot) vaihtelevat laajasti. Myös ajonopeudet, työlevydet ja satotaso vaikuttavat tuloksiin. Laskennalla saadaan suuntaviivoja kapasiteetille ja sen perusteella voidaan miettiä omia valintoja. Laskemalla voi myös kokeilla eri syöttöarvojen vaikutusta lopputulokseen eli sillä voi tehdä herkkyysanalyysin.

Kylvötyöt

Edellisissä esimerkeissä tarkasteltiin vain pellolla tapahtuvia töitä. Kylvötyöt pitää kuitenkin tarkastella kokonaisuutena ja siihen kuuluvat:

- Päivittäiset huollot ja materiaalien (siemen, lannoite) kuormaukset
- Siirtymiset pellolle
- Peltotyöt

Jos pellot ovat lähellä tilakeskusta, silloin siirtymisiin ei kulu paljoakaan aikaa. Kauempana oleville peltolohkoille siirtymisiin kuluu enemmän aikaa. Etenkin jos vain yksi henkilö tekee työt, lohkolle on saatava kylvön yhteydessä siemenet ja lannoitteet. Vaunun täyttämiseen kuluu oma aikansa. Ongelmaksi tulee myös se, että lohkolle pitää viedä täyttövaunu erikseen, jolloin pitää siirtyä takaisin tilakeskukseen hakemaan kylvökoneita tai jossa niissä on eri traktorit, työntekijän pitää siirtyä itse takaisin tilakeskukseen.

Siirtymiset ja päivittäiset huollot ja materiaalien kuormaukset voidaan ottaa huomioon käyttämällä pelto-työssä vain pellolla työskentelyn aikaa.

Suorakylvössä säästetään aikaa, kun kylvö tehdään muokkaamattomaan maahan. Äestykseen kuluva aika jää tällöin pois.

Esimerkki 43. Kylvötyöt tehdään joko perinteisellä tavalla tai käytetään suorakylvöä. Mikä on suorakylvökoneen koko ja kustannus verrattuna perinteiseen. Jatketaan laskentaa siten, että perinteisen rinnalle otetaan suorakylvövaihtoehto. Suorakylvön laskussa käytetään 2,5 m työleveyttä ja 6 km/h ajonopeutta, tulokseksi saadaan 9,5 ha/vrk. Kapasiteetti on perinteistä 7,5 ha/vrk suurempi, koska työvaiheita on vähemmän. Kustannuksiltaan suorakylvö on kalliimpi. Kustannukset on laskettu Työtehoseuran keräämien urakointihintojen perusteella [Palva 2024]. Hinnossa voi olla paljonkin eroa sen mukaan, mitä urakointihintaan on kuulunut. Konekustannuksia voi laskea myös TTS-Kone tai Koneen tuntihinta- ja urakkalaskurilla.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
9	Perustiedot		Pinta-ala	75 ha	Tarvittava kapasiteetti, q_p	7,5 ha/vrk							
10			Työpäivien määrä	22 vrk									
14	Perinteinen tapa		Laskelehtiä		työsaavutus								
15			nopeus	12 km/h	työsaavutus	8,7 ha/h	$q_{p0}=(v_0/b_0) \cdot \eta_0$						
16			työleveys	10,0 m	työsaavutus bestytkerrat huomioiden	8,7 ha/h							
17			työtyösuhte	0,85	työaika	8,7 ha/vrk							
18			työnopeuden työtyösuhte	0,95	työaika	8,6 h	$t_{k0} = q_p / v_0$						
19			traktorin kotelletaus	0,95	kustannus	678 €							
20			ajoneuvon kotelletaus	0,95									
21			laskelehtien	3									
22			turkkusääntäminen	70 €/ha									
23													
24													
25													
26			Äestys		työsaavutus								
27			nopeus	10 km/h	työsaavutus	3,8 ha/h	$q_{p0}=(v_0/b_0) \cdot \eta_0$						
28			työleveys	4,0 m	työsaavutus bestytkerrat huomioiden	1,8 ha/h							
29			työaika	10,0 h/vrk	työaika	18 ha/vrk							
30			työtyösuhte	0,85	työaika	42,0 h	$t_{k0} = q_p / v_0$						
31			työnopeuden työtyösuhte	0,95	kustannus	4,2 vrk							
32			traktorin kotelletaus	0,95	kustannus	3318 €							
33			ajoneuvon kotelletaus	0,95									
34			äestyskertoja	3									
35			turkkusääntäminen	70 €/ha									
36													
37			Siilo		työsaavutus								
38			nopeus	7 km/h	työsaavutus	1,5 ha/h	$q_{p0}=(v_0/b_0) \cdot \eta_0$						
39			työleveys	3,4 m	työaika	15 ha/vrk							
40			työaika	10,0 h/vrk	työaika	48,9 h	$t_{k0} = q_p / v_0$						
41			työtyösuhte	0,95	työaika	5,0 vrk							
42			traktorin kotelletaus	0,95	kustannus	3961 €							
43			koneen kotelletaus	0,95									
44			turkkusääntäminen	80 €/ha									
45													
46			Kokonaissika perinteisellä	199,5 h		19,0 vrk							
47			Kokonaiskustannus	7996 €									
48													
49													
50													
51													
52													
53													
54													
55													
56													

	Perinteinen	Suorakylvö
Kokonaissika h	199	66
Kokonaissika vrk	49	7
Työsaavutus ha/h	9,7	1,1
Työsaavutus ha/vrk	7,5	9,5
Kustannus €	7996	7915

Perinteisessä menetelmässä kapasiteetti on 7,5 ha/vrk ja suorakylvössä 9,6 ha/vrk käytetyillä alkuarvoilla. Tulokseen vaikuttaa voimakkaasti se, kuinka pitkä on tehollinen työskentelyaika pellolla ja myös laskuissa käytetyt ajonopeudet.

Nurmisato

Nurmisato ilmoitetaan silloin, kun halutaan vertailukelpoista lukemaa kuiva-ainesatona. Eri korjuuvaihtoehtoisissa on tietyt nurmen kosteudet, joissa työ on tehtävä. Käsiteltävä määrä riippuu siitä, kuinka paljon sadossa on vettä. Erilaisissa laskelmissa tarvitaan kuiva-satona tai korjuuhetken satona. Laskuissa joudutaan usein muuttamaan satomäärää kosteuden mukaan. Kuiva-ainemäärä pysyy samana, mutta vesimäärä vaihtelee kosteuden mukaan. Niittokosteus on luokkaa 75 - 85%, esikuivattu säilörehu on 60 - 70 % ja kuivaheinä 15 - 20 %.

Merkataan 1 alaviittauksella alkuperäistä tilannetta ja 2 alaviittauksella muuttunutta tilannetta. Niitossa kuiva-ainemäärä on $m_{ka} = m_1 \cdot (1 - w_1)$. Kuiva-ainemäärä ei muutu kosteuden muuttuessa, jolloin uusi massa on kosteuden muuttuessa $m_2 = m_1 \frac{1-w_1}{1-w_2}$. Tämän perusteella saadaan kosteuden muutokselle yhtälö

$$s_2 = s_1 \frac{1 - w_1}{1 - w_2} \tag{3.25}$$

- s_2 sato kosteudessa w_2
- s_1 sato kosteudessa w_1
- w_1 sadon s_1 kosteus desimaaliosina (wb)
- w_2 sadon s_2 kosteus desimaaliosina (wb)

Nurmisadon korjuu siiloon tai aumaan

Nurmisadon siiloon korjuussa ja kuivaheinän korjuussa on kummassakin kolme päävaihetta:

- Pellolla tapahtuvat työt
- Kuljetukset
- Varastointityöt

Hitain näistä vaiheista määrää koneketjun toiminnan. Oikein suunniteltuna seuraavan vaiheen pitäisi olla hieman edellistä nopeampi, jolloin tuotantoon ei tule pullonkauloja. Pellolla tapahtuvat työt riippuvat siitä kuinka kuivana sato korjataan. Kun korjataan esikuivattua satona, tavanomainen kuivumis aika on vuorokausi ja kuivalla ja aurinkoisella säällä viisi tuntia voi jo johtaa liialliseen kuivumiseen [Säilörehun säilöntäopas]. Säilörehun

Taulukko 3.3: Nurmen tilavuuspainoja (kuormapainoja), kuiva-ainepitoisuus 20 - 30 %

Korjuutapa	Tilavuuspaino kg/m ³
Ajosilppuri	150 - 300
Tarkkuussilppuri	250 - 300
Noukinvaunu	150 - 300

laadun kannalta siinä on oltava riittävästi kosteutta, jotta maitohappobakteerit toimivat ja nurmi pitää saada hapettomaan tilaan. Liian kuivassa nurmessa maitohappobakteerien toiminta on hidasta ja kuiva massa ei tiivisty kunnolla. Lisäksi kuivan sadon hävikit lisääntyvät lehtien murentuessa pölyksi.

Satomäärä ilmoitetaan kiloissa ja kuljetuksissa vaunujen tilavuuden ovat kuutiometriä. Nurmen käsittelystä ja kuivumisesta johtuen tilavuuspainot vaihtelevat, taulukko 3.3. Tilavuuspainojen vaihtelut ovat yleensä suuria, useita kymmeniä prosentteja. Kuiva-ainepitoisuuden lisääntyessä tilavuuspainot alenevat ja kuorman kuiva-ainemäärä lisääntyy.

Koneketjut ja korjuutavat vaihtelevat suuresti. Lisäksi koko alaa ei korjata yhtä aikaa, koska ensimmäinen niitto voi kuivua liikaa ennen korjuuta. Työ tapahtuu lomittaisten työvaiheiden kautta, kun vanhaa lohkoa korjataan, uutta lohkoa voidaan niittää. Seuraava kapasiteetin arviointi antaa suuntaviivoja kapasiteetin valinnalle.

1. **Kokonaiskapasiteetti.** Sää tiedoista haetaan oman kriteerin mukaan se kuinka monta päivää sadonkorjuu voi kestää. Arvioidaan kuinka monta tuntia päivässä pellolla yleensä ollaan. Tämän perusteella saadaan laskettua tarvittava kapasiteetti, yhtälö 3.2
2. **Peltotyöt.** Pellolla on kolme työvaihetta: niitto, esikuivaus ja sadon korjuu.
 - (a) **Niitto.** Niiton työsaavutus saadaan työlevydestä, ajonopeudesta, työhyötysuhteesta ja koneiden luotettavuudesta (η), $q_{tod}[ha/h] = \eta \frac{v[km/h] \cdot b[m]}{10}$ ja niittoon kuluva aika $t_{niitto} = \frac{A[ha]}{q_{tod}}$.
 - (b) **Esikuivaus.** Esikuivaus kestää sääoloista riippuen muutamasta tunnista vuorokauteen. Jos karhoa pöyhitään, se kuuluu osana esikuivauksen kokonaisaikaan. Karhotus voi olla myös osana esikuivausaikaa tai se voidaan ottaa erillisenä työnä. Karhotuskapasiteetti ja aika lasketaan samalla lailla kuin niitossa.
 - (c) **Sadon korjuu.** Sadon korjuukapasiteetti saadaan samalla lailla kuin niitossa. Sen lisäksi lasketaan korjuun massavirtaus $q_m = q_t s$. Massavirtauksen avulla voidaan laskea kuljetustarve.
3. **Kuljetus.** Kuljetuksen laskennassa lähdetään siitä, että kuljetuksen massavirtauksen pitää olla vähintään yhtä suuri kuin sadonkorjuun massavirtaus.
4. **Purku.** Lastin purun pitää olla vähintään yhtä nopea kuin kuljetusten. Esimerkiksi laakasiilon tiivistämiseen kuluu aikaa 2 - 3 min rehutonna kohden.

Esimerkki 44. Tilan nurmiala on 40 ha, kuivasato on 3000 kg/ha ja se suunnitellaan korjattavaksi 5 vrk sisällä. Tuossa ajanjaksossa on keskimäärin 3 korjuukelpoista päivää. Katsotaan ketjun toimivuutta tilalla olevien koneiden ja työtapojen avulla.

Työpäivä on kolme ja arvioidaan, että pellolla työskennellään keskimäärin 10 h/pv. Tämän perusteella saadaan kokonaiskorjuuajaksi 30 h ja kapasiteetin tarve on $\frac{40}{30} = 1,3$ ha/h.

Niitto. Koneille valitaan seuraavat luotettavuudet: traktori 0,95, niittokone 0,95. Hyötysuhteille valitaan niitto 0,8 ja työleveys 0,95. Työleveys on 6 m ja ajonopeus on 12 km/h. Tämän perusteella saadaan kapasiteetiksi $0,95 \cdot 0,95 \cdot 0,8 \cdot 0,95 \cdot \frac{12 \text{ km/h} \cdot 6 \text{ m}}{10} = 4,9$ ha/h ja niittoaika on $\frac{40}{4,9} = 8,1$ h.

Esikuivaus. Esikuivausajaksi arvioidaan 5 h, jonka jälkeen tehdään karhoitus. Traktorin ja karhottimen luotettavuus on 0,95 ja työleveyden hyötysuhde on 0,95 ja peltotyön 0,8. Työleveys on 7 m ja ajonopeus 12 km/h. Kapasiteetti on $0,95 \cdot 0,95 \cdot 0,8 \cdot \frac{12 \text{ km/h} \cdot 7 \text{ m}}{10} = 5,8$ ha/ha ja karhotusaika 6,9 h. Kaikkiaan kuivaukseen kuluu $5 + 6,9 = 11,9$ h.

Korjuu. Työleveys määräytyy tässä karhotuksen perusteella, ajonopeutena käytetään 8 km/h ja traktorin sekä korjuukoneen luotettavuutena 0,95. Peltotyön hyötysuhde on 0,8. Ajonopeutena käytetään 8 km/h. Työsaavutus on $0,95 \cdot 0,95 \cdot 0,8 \cdot \frac{8 \text{ km/h} \cdot 7 \text{ m}}{10} = 4,0$ ha/h ja korjuuaika on 9,9 h. Märkäsato on, kun sadon kuiva-ainepitoisuus on 30% $\frac{3000}{0,3} = 10000$ kg/ha ja massavirta $4,0 \text{ ha/h} \cdot 10000 \text{ kg/ha} = 40,4$ t/h.

Kuljetus. Perävaunun tilavuus on 40 m^3 , kuorman tilavuuspaino on 200 kg/m^3 , kuorman paino on $200 \text{ kg/m}^3 \cdot 40 \text{ m}^3 = 8000$ kg. Kun kuljetusmatka yhteen suuntaan on 2 km ja keskimääräinen ajonopeus on 15 km/h, edestakaiseen ajoon kuluu aikaa $\frac{2 \cdot 2 \text{ km}}{15 \text{ km/h}} = 0,27$ h. Kun purkuaika on 10 min (0,17 h) ja kuljetuskaluston luotettavuus 0,9, saadaan kokonaisajaksi $\frac{0,27 \text{ h} + 0,17 \text{ h}}{0,9} = 0,48$ h. Yhden kuorman massavirtaus on $\frac{40 \text{ m}^3 \cdot 200 \text{ kg/m}^3}{0,48 \text{ h}} = 16,7$ t/h. Sadon korjuussa massavirta oli 40,4 t/h. Kuljetuskalustoa tarvitaan $\frac{40,4}{16,7} = 2,4$ kpl.

Kaikkiaan työhön käytetään $8,1 + 11,9 + 9,9 = 29,9$ h eli kalusto pystyy tekemään työt halutussa 30 h ajassa, kunhan kuljetuskalustoa on riittävästi.

Noukinvaunu

Noukinvaunua käytettäessä korjuu pysähtyy siirron ajaksi. Tämä pienentää kapasiteettiä sitä enemmän mitä pidempi kuljetusmatka on. Korjuun ja kuljetuksen kapasiteetti saadaan laskemalla kuinka paljon aikaa kuluu yhden vaunullisen korjuuseen, kuljetukseen ja purkuun. Tämän avulla voidaan laskea työsaavutukset ja alan korjuuseen kuluvat ajat. Noukinvaunun etuna on vähäinen työvoiman tarve.

Esimerkki 45. Muutetaan esimerkin 44 tilannetta siten, että korjuu ja kuljetus hoidetaan noukinvaunulla. Käytetään karhotusleveytenä 10 m. Työsaavutus korjuussa on $0,95 \cdot 0,95 \cdot 0,95 \cdot 0,8 \cdot \frac{8 \text{ km/h} \cdot 10 \text{ m}}{10} = 5,5$ ha/h ja koko alan korjuuaika on 7,3 h. Perävaunun tilavuus on 40 m^3 , kuorman tilavuuspaino on 200 kg/m^3 , kuorman paino on $200 \text{ kg/m}^3 \cdot 40 \text{ m}^3 = 8000$ kg. Märkäsato on, kun sadon kuiva-ainepitoisuus on 30%, $\frac{3000}{0,3} = 10000$ kg/ha ja massavirta $5,5 \text{ ha/h} \cdot 10000 \text{ kg/ha} = 55,0$ t/h. Kuormausaika on $\frac{8 \text{ t}}{50,5 \text{ t/h}} = 0,15$ h. Kun kuljetusmatka yhteen suuntaan on 2 km ja keskimääräinen ajonopeus on 15 km/h, edestakaiseen ajoon kuluu aikaa $\frac{2 \cdot 2 \text{ km}}{15 \text{ km/h}} = 0,27$ h. Kun purkuaika on 10 min (0,17 h), saadaan kokonaisajaksi $0,15 + 0,27 + 0,17 = 0,59$ h. Korjuun ja kuljetuksen massavirtaukseksi saadaan, kun kuormallisen paino on 8000 kg, $\frac{8000 \text{ kg}}{0,58 \text{ h}} = 13800$ kg/h. Koko alan märkäsato on $40 \text{ ha} \cdot 10000 \text{ kg/ha} = 400$ t ja alan korjuuaika on $\frac{400 \text{ t}}{13,8 \text{ t/h}} = 30$ h ja korjuun ja kuljetuksen kapasiteetti on $\frac{40}{30} = 1,3$ ha/h. Esimerkin 44 mukaan niittoon tarvittiin 8,1 h, karhottamiseen kuluu 4,9 h ja kuivumiseen 5 h. Näihin lisätään noukinvaunun korjuun ja kuljetuksen aika, $8,1 + 9,9 + 29,0 = 47$ h. Työkapasiteetti on $\frac{40 \text{ ha}}{47 \text{ h}} = 0,9$ ha/h. Kapasiteetti väheni huomattavasti ja haluttuun 30 h korjuuajakaan ei päästy. Yksistään korjuu ja kuljetus kestävät 29 h. Noukinvaunun työ saisi kestää: haluttu korjuuaika - niitto - esikuivaus - karhoitus = $30 - 8,1 - 5 - 4,9 = 12$ h. Noukinvaunun kapasiteetin pitäisi olla $\frac{40}{12} = 3,3$ ha/h. Kahdella vaunulla päästäisiin jo lähelle tätä vaatimusta.

Nurmisadon paalaus ja käärintä

Paalauksessa ja paalien käärintä sadon kuljetus voidaan tehdä myöhemmin eikä tarvita erillisiä varastosiloja. Korjuuketjun kapasiteetti saadaan siten niitosta, esikuivauksesta ja sadon korjuusta (paalauksesta). Pyöröpaalaimen työhyötysuhde pellolla on taulukon 3.1 mukaan 55 - 75 % ja tyyppillisesti 65 %. Käytetään laskennassa paalainkäärijä yhdistelmää ja työhyötysuhde on käärintän takia pelkkää paalainta alhaisempi. Paalien painot vaihtelevat paalin koon ja kuiva-ainepitoisuuden mukaan 600 - 1000 kg.

Esimerkki 46. *Vaihdetaan esimerkin 44 koneistusta siten, että korjuu tehdään paalainkäärijä yhdistelmäkoneella. Käytetään tämän työhyötysuhteena 0,5. Niittoon kuluu 4,9 h ja esikuivaukseen ja karhotukseen 11,9 h. Korjuussa traktorin ja paalaimen luotettavuus on 0,95 ja työhyötysuhde on 0,5. Karhottimen työleveys oli 7 m ja paalainkäärijän ajonopeus on 7 km/h. Paalainkäärijän työsaavutus on $0,95 \cdot 0,95 \cdot 0,5 \cdot \frac{7 \text{ km/h} \cdot 7 \text{ m}}{10} = 2,2 \text{ ha/h}$. Koko alan työaika on $\frac{40 \text{ ha}}{2,2 \text{ ha/h}} = 18,1 \text{ h}$. Kokonaistyöaika on $4,9 + 5 + 6,9 + 18,1 = 34,9 \text{ h}$ ja työsaavutus on $1,1 \text{ ha/h}$. Tavoitteena oli 30 h työaika, tästä jäätii hieman.*

Kuivaheinän korjuu

Kuivaheinän korjuussa heinän kuivumisen lisäksi pitäisi olla muutama poutapäivä, jonka aikana pystytään siirtämään sato suojaan. Tämä kiristää ennestään korjuun onnistumista, koska tarvitaan kuivumista pidempi poutajakso. Jos heinät kuivataan koneellisesti, silloin säävaatimus on pienempi, mutta kuivaaminen on hidasta. Tilalla pitäisi olla tuuletettavaa varastotilaa riittävästi, jonne ainakin suurin osa sadosta saadaan nopeasti kuivumaan.

Viljasadon korjuu

Viljasadon korjuussa hitain vaihe määrää koko ketjun kapasiteetin. Viljan kosteus vaihtelee vuosittain, joka vaikuttaa voimakkaasti kuivauskapasiteettiin ja sitä kautta koko korjuuketjun kapasiteettiin. Viljasadon korjuussa on kolme eri vaihetta.

1. **Kokonaiskapasiteetti.** Sää tiedoista haetaan oman kriteerin mukaan se kuinka monta päivää sadonkorjuu voi kestää. Arvioidaan kuinka monta tuntia päivässä pellolla yleensä ollaan. Tämän perusteella saadaan laskettua tarvittava kapasiteetti, yhtälö 3.2. Puimurin säiliön ja perävaunun koko ilmoitetaan kuutioissa, mutta satotaso kilogrammoina. Laskuja varten tarvitaan hehtolitrapaino ja myös puintikosteus. Hehtolitrapaino riippuu viljan kosteudesta, muutos voi olla suurimmillaan 10% luokkaa. Tätä vaikutusta ei oteta huomioon. Jos tarkastellaan koko tilaa, tyypillisesti siellä viljellään useita viljoja, jolloin hehtolitrapainona voi käyttää arvioitua keskimääräistä arvoa.
2. **Puinti.** Puinnin työsaavutus saadaan työleveydestä, ajonopeudesta, työhyötysuhteesta ja koneiden luotettavuudesta (η), $q_{tod}[\text{ha/h}] = \eta \frac{v[\text{km/h}] \cdot b[\text{m}]}{10}$. Massavirta (jyvävirta) saadaan satotasosta ja työsaavutuksesta, $q_m = q_t \cdot s$. Viljasäiliön (tilavuus V_s ja viljan kuutiopaino r) täyttymisaika saadaan $t_s = \frac{V_s \cdot r}{q_m}$. Päivässä puitava määrä saadaan kertomalla massavirta pellolla oloajalle.
3. **Kuljetus.** Kuljetuksen laskennassa lähdetään siitä, että kuljetuksen massavirtauksen pitää olla vähintään yhtä suuri kuin puinnin massavirtaus. Toisaalta pitkillä kuljetusmatkoilla voi käydä niin, että perävaunua ei saada ajoissa takaisin pellolle, jolloin puinti keskeytyy. Perävaunun (V_{pv}) ja puimurin viljasäiliön tilavuuksien avulla voidaan laskea kuinka monta viljasäiliöllistä kuormaan tarvitaan $n = \frac{V_{pv}}{V_s}$. Kuljetusmatkan s ja keskimääräisen ajonopeuden v avulla saadaan siirtymisiin kuluva aika $t = \frac{s}{v}$. Tähän pitää lisätä kuorman tyhjennysaika. Kuljetuskapasiteetti on silloin kuorman paino jaettuna aikaan pellolta takaisin pellolle. Jos sama työntekijä pui ja kuljettaa viljan pois, silloin kokonaispuintiaika vähenee ja työsaavutus heikkenee.
4. **Kuivaus.** Kuivauksen massavirtauksen pitää olla vähintään yhtä suuri kuin sadonkorjuun massavirtaus. Kuivurin kapasiteetti voidaan laskea erämäärän, kuivurin tilavuuden, keskimääräisen viljan kosteuden alenemisen ja jäähditys-, täyttö- ja tyhjennysaikojen avulla. Kuivurin käyttöaika on pidempi kuin puintiaika, jolloin tuntikapasiteetti ei ratkaise sen toimintaa, vaan vuorokausikapasiteetti.

Esimerkki 47. Tilalla on 80 ha puitavaa alaa. Lasketaan puintikapasiteetti tilan koneiden ja työtapojen perusteella.

Kokonaiskapasiteetti. Arvioidaan keskisadoksi 3500 kg/ha viljan ollessa 14% kosteudessa ja keskimääräiseksi hehtolitrainoksi 70 kg/hl. Puintikaudella on säätetöjen mukaan odotettavissa 10 puintikelpoista päivää ja päivässä arvioidaan olevan puintikelpoisia tunteja 5 h. Lasketaan ensin puitavan viljan satotaso. Arvioidaan puintikosteudeksi 22%. Yhtälön 3.16 mukaan $s_{\text{puinti}} = 3500 \cdot \frac{1-0,14}{1-0,22} = 3859 \text{ kg/ha}$. Työtunteja on kaikkiaan $10\text{pv} \cdot 5 \frac{\text{h}}{\text{pv}} = 50 \text{ h}$. Tarvittava kapasiteetti on $\frac{80\text{ha}}{50\text{h}} = 1,6 \text{ ha/h}$. Päivässä puidaan $5\text{h} \cdot 1,6\text{ha/h} \cdot 3859\text{kg/ha} = 30872 \text{ kg}$. Jos käytetään hehtolitrainona 70 kg/hl, saadaan $\frac{30872\text{kg}}{700\text{kg/m}^3} = 44 \text{ m}^3$.

Puinti. Puimurin luotettavuus on 0,95, työleveys 3,5 m, työleveyden hyötysuhde on 0,95, viljasäiliön koko on 7 m^3 , säiliön tyhjennysaika on 3 min, ajonopeus on 6 km/h ja työhyötysuhde pellolla on 0,8. Puinnin kokonaisyötysuhde on $\eta = 0,95 \cdot 0,95 \cdot 0,8 = 0,72$. Työsaavutus on $q_{\text{tod}} = 0,72 \cdot \frac{6 \cdot 3,5}{10} = 1,5 \text{ ha/h}$. Hehtolitrainolla 70 kg/hl säiliöön mahtuu $7 \cdot 700 = 4900 \text{ kg}$. Puinnin massavirta on $q_m = 3859 \text{ kg/ha} \cdot 1,5 \text{ ha/h} = 5789 \text{ kg/h}$ ja säiliö täyttyy $\frac{4900\text{kg}}{5789\text{kg/h}} = 0,8 \text{ h} = 48 \text{ min}$. Päivässä puidaan $5\text{h} \cdot 5789\text{kg/h} = 28945 \text{ kg}$ ja sen tilavuus on $\frac{28945\text{kg}}{700\text{kg/m}^3} = 41 \text{ m}^3$.

Kuljetus. Perävaunun kuormatilavuus on 11 m^3 ja sen ja traktorin yhteinen luotettavuus on 0,9. Kuljetusmatka on 3 km ja keskimääräinen ajonopeus on 12 km/h. Purkuaika on 15 min. Kuorman paino on $11\text{m}^3 \cdot 700\text{kg/m}^3 = 7700 \text{ kg}$. Puimurin säiliö oli 7 m^3 ja vaunun tilavuus on 11 m^3 , yhteen kuormaan tarvitaan $\frac{11}{7} = 1,6$ puimurin säiliöllistä. Siirtymäaika on $\frac{3\text{km}}{12\text{km/h}} = 0,25 \text{ h}$. Yhden kuorman kuljetus kestää 2siirtymäaika + purkuaika = $2 \cdot 0,25 + \frac{15}{60} = 0,75 \text{ h} = 45 \text{ min}$. Kuljetuksen massavirtaus on $\frac{7700\text{kg}}{0,75\text{h}} = 10267 \text{ kg/h}$. Kuljetuskapasiteetti on lähes kaksinkertainen verrattuna puintikapasiteettiin 5789 kg/h. Säiliöllisen puintiaika oli 48 min ja kuljetukseen kuluu 45 min eli kärry kerkeää pellolle ennen kuin puimurin säiliö täyttyy.

Kuivaus. Kuivurin säilon koko on 25 m^3 ja vuorokaudessa kuivataan kaksi erää. Kosteus alenee kuivattaessa 1,2 %/h. Kaikkiaan kosteus alenee $22\% - 14\% = 8\%$ yksikköä. Kuivaus kestää $\frac{8\%}{1,2\%/h} = 6,7 \text{ h}$. Jäähdytys kestää 1 h ja täyttö sekä tyhjennys kumpikin 40 min, yhteensä erään kuluu $6,7 + 1 + \frac{40}{60} + \frac{40}{60} = 9 \text{ h}$. Jos kuivataan kaksi erää, kuivurin kapasiteetti on $\frac{2 \cdot 25\text{m}^3 \cdot 700\text{kg/m}^3}{9\text{h}} = 3889 \text{ kg/h}$. Kuivuri on käynnissä yhteensä 18 h, jonka takia sen kapasiteetti ei rajoita puintia.

Jos lasketaan vuorokautisia tilavuusvirtoja, niin puinnin tilavuusvirta on 42, kuljetusten 73 ja kuivauksen $50 \text{ m}^3/\text{vrk}$. Korjuuketju toimii hyvin, koska kaikki puitava vilja pystytään käsittelemään vuorokauden aikana. Oletuksena tässä on kaksi työmiestä, toinen pui ja toinen kuljettaa.

3.8.4 Koneinvestoinnit

Tilakoon suuretessa tarvitaan yhä suuremmat työkoneet. Tämä tarkoittaa hinnaltaan kalliita investointeja. Väärän kokoiset ja työketjuun sopimattomat koneet aiheuttavat ongelmia. Joko töitä ei keretäkään tekemään ajoissa tai investointikustannukset heikentävät taloutta. Koska investointikustannukset ovat korkeat, ne pitää suunnitella etukäteen. Kahta suurta samanaikaista investointia ei pysty tekemään. Koneiden huolto- ja korjauskustannuksia seuraamalla voidaan arvioida milloin työkone on uudistettava tai sille on tehtävä peruskorjaus. Tässä monisteessa on keskitetty kapasiteetin valintaan. Koneiden koot, hinnat ja toimintatavat tarkoittavat investointeja ja erisuuruisia käyttökustannuksia. Hankinnassa pitää tarkastella kokonaisuutta ja etsiä sitä kautta sopivaa ratkaisua.

Esimerkki 48. Muutetaan esimerkin 41 määrittelyä siten, että halutaan mahdollisimman halvat koneet. Sitä varten haetaan laskuja varten koneiden tuntihinnat Työteho-seuran julkaisusta [Palva 2024]. Kevättöiden kustannus on nyt solussa C54. Tämän halutaan olevan mahdollisimman alhainen eli valitaan Min kohta Solverin valinnoista. Muuttujina ovat tässäkin tapauksessa koneiden työlevyydet. Koneiden työleveyksille annetaan rajoitteen ja niiden lisäksi myös työajalle (solu E52) annetaan rajoite. Sen pitää olla solun C10 suuruinen.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
9	Perustiedot	Pinta-ala	75 ha													
10		Työpäivien määrä	10 vrk													
13	Äestys	Työaika pellolla päivässä	10 h/vrk													
15		Tasausäestys														
16		nopeus	12 km/h	työsaavutus	5,2 ha/h	gko=(v*b/10)*η										
17		leveys	6,0 m	työaika	14,3 h	t=A/gko										
18		työhyötysuhde	0,85													
19		työlevyden hyötysuhde	0,95	kustannus	1,4 vrk											
20		äkeen luotettavuus	0,95													
21		traktorin luotettavuus	0,95													
22		tuntikustannus	50 €/h													
23		äestyskertoja	1													
24																
25		Äestys														
26		nopeus	10 km/h	äestyskerran työsaavutus	3,6 ha/h											
27		leveys	5,0 m	työsaavutus äestyskerrat huomioiden	1,8 ha/h											
28		työhyötysuhde	0,85	työaika	41,2 h											
29		työlevyden hyötysuhde	0,95	kustannus	4,1 vrk											
30		äkeen luotettavuus	0,95													
31		traktorin luotettavuus	0,95													
32		tuntikustannus	50 €/h													
33		äestyskertoja	2													
34																
35		Tasausäestys + äestys kesto	55,5 h		5,5 vrk											
36	Kylvö															
38		Työaika pellolla päivässä	8 h/vrk													
41		Kylvön nopeus	7 km/h	työsaavutus	2,1 ha/h											
42		leveys	4,8 m	työaika	35,6 h											
43		työhyötysuhde	0,7	kustannus	2494 €											
44		koneen luotettavuus	0,95													
45		traktorin luotettavuus	0,95													
46		tuntikustannus	70 €/h													
47																
48		Kylvön kesto	35,6 h		4,5 vrk											
49																
50																
51																
52	Yhteenveto	Kokonaisaika	91,1 h		10,0 vrk											
53		Työsaavutus	0,82 ha/h		7,5 ha/vrk											
54		Kustannus	5267 €		70 €/ha											
55																

Tasausäkeen työleveudeksi tuli 6,0 m, äkeen 5,0 m ja kylvökoneen 4,8m. Tämä esimerkki näyttää miten optimointia voidaan käyttää myös investoinneista päätettäessä.

3.9 Urakointi

Lähdetään katsomaan urakointia yksinkertaisen esimerkin avulla. Otetaan esimerkiksi vaikka kevättyöt. Karjatilalla on 20 ha rehuviljaa. Kevättyöt pitäisi pystyä tekemään mieluiten yhden viikon aikana. Tilalla on vain yksi työntekijä, jolloin hänen pitää tehdä kaikki työt itse. Valitaan tämän takia suorakylvö, jolloin työt on helpompi järjestää.

Päivässä on 8 h tehollista työaika, kun kaikki tauot otetaan huomioon ja lisäksi työntekijä huolehtii karjasta. Lisäksi varataan tuolle viikolle sään puolesta 80% todennäköisyys. Tämän perusteella toukokuutyöt pitäisi tehdä $8h/vrk \cdot 7vrk \cdot 0,8 \approx 45$ h aikana. Tilalla on 4 m leveä äes ja kun äestetään 9 km/h nopeudella 80 % työhyötysuhteella, saadaan työsaavutukseksi $\frac{4m \cdot 9km/h}{10} \cdot 0,8 = 2,9$ ha/h työsaavutus ja 20 ha äestämiseen kuluu n 7 h. Suorakylvökoneen työleveys 3 m ja työnopeus 6 km/h. Työsaavutus on 60 % työhyötysuhteella $\frac{3m \cdot 8km/h}{10} \cdot 0,6 = 1,4$ ha/h ja kylvöön kuluu aikaa $\frac{20ha}{1,4ha/h} = 14$ h. Tällä koneistuksella kylvötyöt keretään tekemään hyvin ja aikaa jää vaikka heinämaiden hoitoonkin.

Jos suorakylvökone maksaa 31 000 € ja sitä pidetään 10 vuoden ajan, käyttötunteja kertyy 140 h ja tuntihinnaksi tulee 110 €/h ja hehtaarihinnaksi 155 €/ha. 20 vuoden käyttöajalla hehtaarihinnaksi tulee 78 €/ha. Suorakylvön urakointihinta on 64 - 91 €/ha [Palva 2024]. Koneita täytyy pitää vähintään 20 vuotta, jotta pääomakustannukset vuotta kohden olisivat lähes samat kuin urakointihinta. Pääomakustannusten lisäksi pitää ottaa huomioon korko- sekä korjaus- ja huotokustannukset sekä traktorin kustannukset. Ostamalla kylvö urakoinnilla säästetään kustannuksia ja työtä. Kymmenen vuoden pitoaika kerryttää vain 140 käyttötuntia.

Suomen olosuhteissa sekä kylvökausi että sadonkorjuukausi ovat lyhyitä, jolloin konekapasiteetin pitää olla suurempi kuin esimerkiksi Keski-Euroopassa. Kertyneet konetunnit jäävät vähäisiksi ja koneet vanhenevat teknisesti ennen kuin niiden käyttöikä tulee täyteen. Edellä olleessa esimerkissä 10 vuoden aikana tuli 140 käyttötuntia. Tällaisten koneiden kestoaikat ovat 1500 h luokkaa (taulukko 2.13) eli tällä koneella pitäisi tehdä vuosittain n 110 ha kylvöt, jos kokonaiskäyttöikä on 10 v ja 1500 h. Keski-Euroopassa käytetään runsaasti syysviljaa ja puinnit ajoittuvat heinäkuulta lokakuuhun, jolloin käytettävissä on enemmän aikaa ja konekapasiteetti voi olla pienempi. Urakoinnilla voidaan etenkin suomalaisessa maataloustuotannossa säästää kustannuksissa ja työajassa. Urakoinnin varjopuolena on riippuvuus urakoitsijasta, jolloin säiden muuttumisen takia ei ehkä pys-

tytä käyttämään parhaita säätä hyväksi ja seurauksena voi olla laatuhävikkejä tai sadon alenemista. Koneiden käyttömäärää voidaan lisätä myös yhteiskoneilla ja koneketjuilla.

3.10 Tiivistelmä

Konekapasiteetilla tarkoitetaan koneen tai koneketjun kykyä suorittaa tarvittava työ annetussa ajassa. Konekapasiteettiin vaikuttavat tekijät:

- Viljeltävä pinta-ala (A , ha)
- Työjakson pituus (N_{pv} , vrk)
- Päivittäinen työaika (t_{pv} , h/vrk)
- Sääolosuhteet (työkelpoisten päivien määrä)
- Koneiden luotettavuus
- Työnteon tehokkuus (päisteet, täytöt, tyhjennykset)
- Työntekijöiden määrä (peräkkäinen vs. rinnakkainen työ)

Keskeiset yhtälöt

$$\begin{array}{l}
 \text{Teoreettinen työsaavutus} \\
 \text{Todellinen työsaavutus} \\
 \text{Tarvittava konekapasiteetti}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 q_t = \frac{b[m] \cdot v[km/h]}{10} \\
 q_{tod} = \frac{b[m] \cdot v[km/h]}{10} \cdot \eta_t \cdot \eta_b \cdot \eta_k \\
 q_{ko} = \frac{A}{N_{pv} \cdot t_{pv}}
 \end{array}$$

Keskeiset havainnot

- Suuri kone ei auta, jos kuljetukset tai täytöt rajoittavat työtä.
- Peltolohkon koko ja muoto vaikuttavat työsaavutukseen.
- Useampi työntekijä pienentää tarvittavaa konekapasiteettia ratkaisevasti.
- Sadonkorjuuketjut on mitoitettava ketjuna – pullonkauloja syntyy helposti.
- Säätiedoista saa todennäköisyyden työpäivien ja työtuntien määrälle.

Luku 4

Koneiden kokojen yhteensopivuus

Koneet hankitaan aina ketjun osiksi. Traktorikäyttöisten työkoneiden osalta on varmistuttava, että työkoneen koko on traktorille sopiva tai joskus voidaan toimia toisinpäin eli valita traktori työkoneen koon mukaan. Tässä kappaleessa selvitämme miten koneiden fyysiset koot valitaan. Maanmuokkaus on siitä harvinainen työvaihe, ettei siihen liity kuljetuksia. Kylvöön, lannoitukseen, kasvinsuojeluun ja sadonkorjuuseen liittyy aina kuljetuksia ja useampia vaihteita. Tällöin koneketjujen toiminta pitää sovittaa. Tässä periaate on yksinkertainen, seuraavan lenkin pitää olla aina hieman edellistä nopeampi. Toisin sanoen, kun pellolla työskennellään, siihen ei saisi tulla katkoksia. Kuljetukset, täytöt, tyhjennykset yms pitäisi toimia niin, että varsinaisen työn keskeytykset ovat lyhyitä.

4.1 Traktorin vetovoima ja vetoteho

Traktorin riittävä vetovoima tarkoittaa sitä, että se saa työkoneen liikkeelle. Riittävä vetoteho taas tarkoittaa sitä, millä nopeudella traktori pystyy vetämään työkonetta.

Vetovoimaan vaikuttaa eniten traktorin paino. Renkaan aikaansaama voima perustuu maan lujuuteen ja renkaan kantamaan massa. Nelivetoiselle traktorilla pätee yhtälö 4.1.

$$F_t = (\mu - f) \cdot G \quad (4.1)$$

F_t	vetovoima
μ	kehävoimakertoimen
f	vierimisvastuskerroin
G	traktorin paino (painovoima N)

Kehävoimakertoimen riippuu renkaan luistosta kuvan 4.1 mukaisesti. Kuva on tehty ASAE standardin mukaisesti renkaalle, jonka leveys on 53cm ja halkaisija 1,5 m [ASAE D497]. Kuvan esimerkki on laskettu ASAE D497 standardin mukaisesti [ASAE D497, Ahokas]. Lähtökohtana on Cone Index arvo (CI), pehmeän maan CI arvo on 500 kPa, muokatun pellon 700 kPa ja kuivan pellon 1400 kPa [Kurjenluoma ym]. Kulkukykä varten CI-arvo annetaan 0-15 cm syvyyden keskiarvona. Työssä luisto ei saa olla liian suuri, jos se ylittää 20 %, peltoon jää luistourat. Työkoneen veto on tehoikkaimmillaan raskaassa vetotyössä normaaliolosuhteissa, kun pyörien luisto on 8 - 15 % luokkaa, kuva 4.2. Kulkukykyn voit tutustua tarkemmin Koneiden kulkukyky monisteessa [Ahokas].

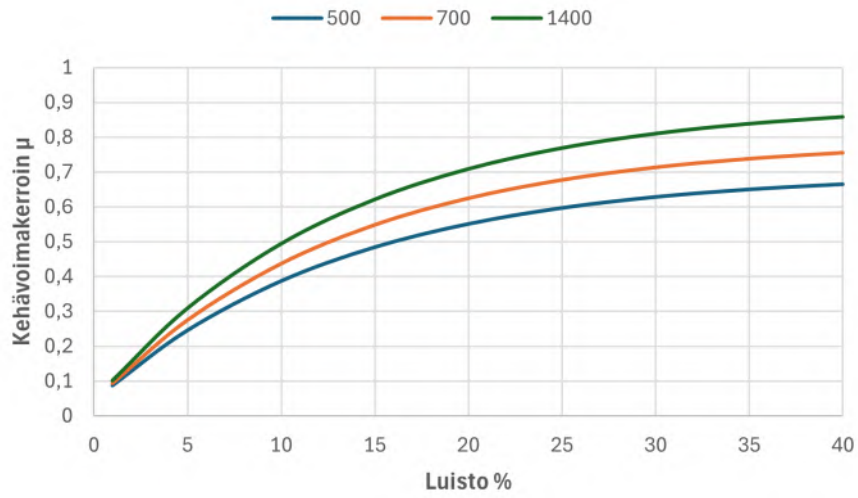
Vierimisvastuskertoimia on taulukossa 4.1.

Vetämiseen tarvittava traktorin paino saadaan ratkaisemalla yhtälöstä 4.1 traktorin massa, yhtälö 4.2

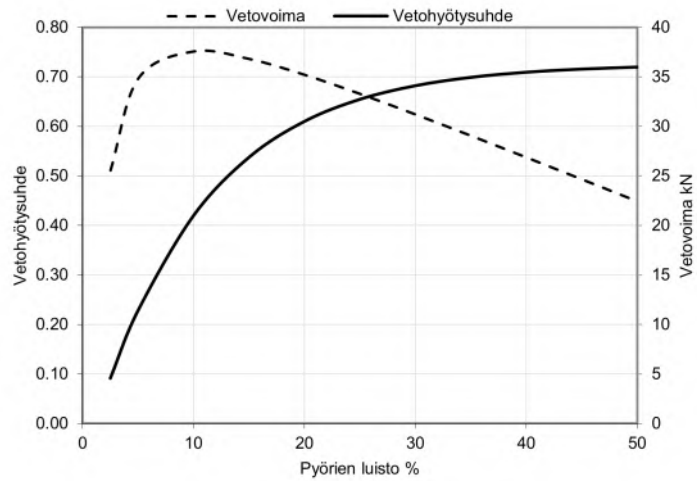
$$G = m \cdot g = \frac{F_t}{\mu - f} \Rightarrow m = \frac{F_t}{(\mu - f) \cdot g} \quad (4.2)$$

Taulukko 4.1: Tyypillisiä vierimisvastuskertoimien arvoja

Alusta	Vierimisvastuskerroin
Asfaltti	0,02
Soratie	0,04 - 0,05
Normaali pelto	0,07 - 0,10
Pehmyt pelto	0,1 - 0,3



Kuva 4.1: Renkaan kehävoimakertoin luiston funktiona. 500 = pehmeä pelto, 700 muokattu pelto ja 1400 = kuiva ja kantava pelto



Kuva 4.2: 5500 kg painavan traktorin vetovoima ja vetohyötysuhde pellolla.

Jos liikutaan rinnepellolla, silloin mukaan tulee rinnevastus eli traktorin on noustava rinne ylös. Vetovoima pienenee ylämäessä yhtälön 4.3 mukaisesti. Yhtälössä α on rinteen jyrkkyys. Jos työkoneen ve pyörien luisto on liian suurta, silloin traktoriin voidaan lisätä lisäpainoja. Tämä onnistuu niin kaun, kunnes pyörät uppoavat maahan.

$$F_t = G[(\mu - f)\cos\alpha - \sin\alpha] \quad (4.3)$$

Traktorin vetoteho saadaan vetovoiman ja ajonopeuden tulosta, yhtälö 4.4

$$P_v = F_t \cdot v \quad (4.4)$$

Moottoritehon pitää olla vetotehoa suurempi, koska siinä on mukana traktorin oma liikkuminen. Lisäksi traktorin lisälaitteet voivat viedä osan moottoritehosta. Normaalisti tarvitaan 1,4 - 2 kertainen moottoriteho vetotehoon verrattuna, yhtälö 4.5.

$$P_m = k_m \cdot P_v \quad (4.5)$$

P_m	traktorin moottoriteho
P_v	vetoteho
k_m	kerroin (1,4 - 2)

Mistä tuo kerroin k_m sitten tulee? Edellä käsitelimme vetohyötysuhdetta ja saimme sille parhaimmillaan 60 - 70 % arvoja. Vetohyötysuhde on vetotehon ja akselitehon suhde. Jos liikutaan tasaisella pellolla ja rinnevastusta ei ole, silloin kerroin k_m on vetohyötysuhteen käänteisluku. Esimerkiksi 65% vetohyötysuhde vastaa kerrointa $\frac{1}{0,65} = 1,5$.

Kun työkoneita vedetään tai lasketaan koneiden omaan liikkumiseen tarvittavaa voimaa tai tehoa, niin tämä saadaan aikaiseksi renkaiden kautta ja vetohyötysuhde näyttää kuinka paljon akselille tulevasta tehosta saadaan käytettyä työhön. Loppusosa hukkaantuu maan ja renkaan muodonmuutoksiin ja renkaiden luistoon. Kun käytetään voimanottoakselikäyttöisiä työkoneita, tällöin voimansiirto tulee suoraan moottorista ja mitään kertoimia ei silloin käytetä.

Koneiden ajonopeudet ilmoitetaan yksiköissä km/h ja laskuissa tarvitaan yksikköä m/s. Yksikkö m/s saadaan jakamalla km/h lukema luvulla 3,6. Tämä tulee siitä, että kilometrissä on 1000 m ja tunnissa on 3600 s, $\frac{1000}{3600} = \frac{1}{3,6}$.

Kun koneiden kokoa kasvatetaan, silloin pitää kasvattaa myös traktorin kokoa. Jos kone on liian suuri traktoriin nähden, tarvittaessa lisäpainoilla voidaan lisätä vetovoimaa. Jos moottoriteho on liian pieni, se rajaa työnopeuden ja joudutaan työskentelemään hitaammalla ajonopeudella. Työsaavutus on ajonopeus kertaa työleveys eli työsaavutus voi kuitenkin säilyä kohtuullisena. Traktorimoottoria voidaan myös 'virittää', mutta suurempi teho heikentää kestävyyttä eli vaurioitumistiheys kasvaa.

Esimerkki 49. Kuinka painava traktori tarvitaan vetämään äestä, jonka moottoritehon tarpeeksi on ilmoitettu 150 kW? Ajonopeus on 10 km/h, vierimisvastuskerroin on 0,08, pyörien luisto on 15% ja moottoritehon suhde vetotehoon on 1,7.

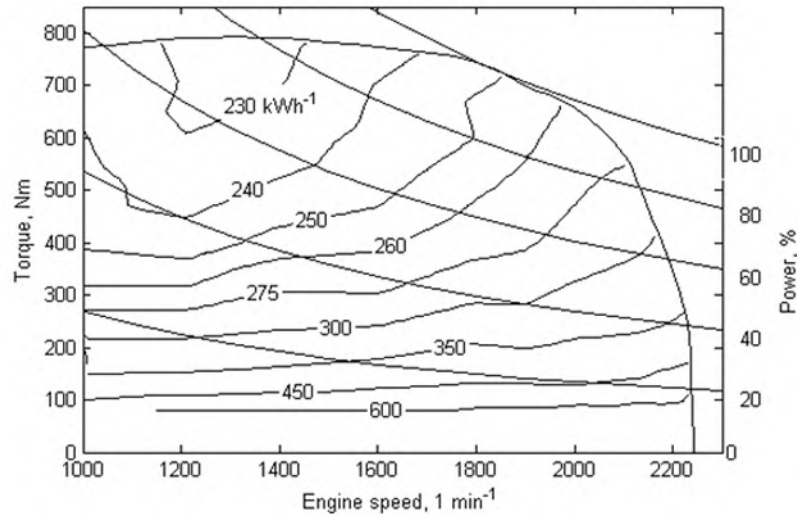
Kuvasta 4.1 katsotaan muokatun pellon (CI 700) 15% luiston kohdalta kehävoimakertoimen arvo $\mu=0,55$ ja taulukosta 4.1 vierimisvastuskertoimen arvo $f=0,07$. Työkoneen vetotehon tarve on $P_t = \frac{150kW}{1,7} = 88 \text{ kW}$. Tämän jälkeen voidaan laskea vetovoiman tarve $F_t = \frac{88kW}{10km/h} = 32 \text{ kN}$. Tarvittava traktorin paino on $m \cdot g = \frac{F_t}{\mu-f} = \frac{32000}{0,55-0,07} = 67 \text{ kN}$ ja $m = \frac{67000N}{9,81m/s^2} = 6800 \text{ kg}$

Kun moottoriteho on tiedossa, polttoaineen kulutus voidaan arvioida moottorin ominaiskulutuksen avulla. Traktorimoottoreiden ominaiskulutukset (q_{om}) nimellistehon kohdalla ovat luokkaa 220 - 300 g/kWh. Ominaiskulutus riippuu moottorin kuormituksesta, kuvassa 4.3 on esimerkki traktorimoottorin ominaiskulutuskäyrästä (simpukkakäyrä). Jos traktori ei kuormitu täysin, silloin ominaiskulutus on suurempi.

Moottorin polttoaineen kulutus on $q[g/h] = P_m \cdot q_{om}$. Moottoritehon tarve työssä on $P_m = k_m \cdot F_t \cdot v$. Hehtaarikohtainen kulutus on tällöin yhtälön 4.6 mukainen.

$$q_{ha} = \frac{P_m \cdot q_{om}}{r \cdot q_t} \quad (4.6)$$

q_{ha}	kulutus [l/ha]
P_m	traktorin moottoriteho [kW]
q_{om}	moottorin ominaiskulutus [g/kWh]
r	polttoaineen tiheys [g/l]
q_t	työsaavutus [ha/h]



Kuva 4.3: Moottorin suorituskäyrästä [Jokiniemi ym 2016]

Kun polttoaineen kulutus on tiedossa, voidaan laskea myös päästömäärät. Päästökertoimia on löydettävissä netistä [Polttoaineluokitus] ja esimerkiksi Traficomien dieselmootoreille käyttämä kerroin on 2,99 kg CO_{2e}/l [Ojala ym]. Hiilidioksidiekvivalenttipäästö voidaan laskea yhtälön 4.7 avulla.

$$q_{CO_{2e}ha} = q_{ha} \cdot k_{CO_{2e}} \quad (4.7)$$

$q_{CO_{2e}ha}$ hiilidioksidin ekvivalenttipäästö [CO_{2e}/ha]
 $k_{CO_{2e}}$ dieselmootorin päästökerroin [kg CO_{2e}/l]

Esimerkki 50. Auran vetovastus on 28 kN, työveveys on 1,6 m ja kyntönopeus on 7 km/h. Kuinka paljon tarvitaan polttoainetta hehtaaria kohden ja mikä on kyntön hiilidioksidiekvivalenttipäästö?

Käytetään laskuissa moottorin ominaiskulutukselle arvoa 270 g/kWh, polttoaineen tiheydelle arvoa 830 g/l ja kertoimelle k_m arvoa 1,5. Työsaavutus on $q_t = \frac{7 \text{ km/h} \cdot 1,6 \text{ m}}{10} = 1,1 \text{ ha/h}$. Vetotehon tarve on $P_v = 28 \text{ kN} \cdot \frac{7 \text{ km/h}}{3,6} = 54,4 \text{ kW}$ ja moottoritehon tarve on $P_m = 1,5 \cdot 54,4 \text{ kW} = 81,7 \text{ kW}$. Polttoaineen kulutus on $q = \frac{81,7 \text{ kW} \cdot 270 \text{ g/kWh}}{830 \text{ g/l}} = 26,6 \text{ l/h}$ ja hehtaarikulutus on $q_{ha} = \frac{26,6 \text{ l/h}}{1,1 \text{ ha/h}} = 23,7 \text{ l/ha}$. Hiilidioksidiekvivalenttipäästö on $q_{CO_{2e}ha} = 23,7 \text{ l/ha} \cdot 2,99 \text{ kg/l} = 70,9 \text{ kg CO}_{2e}/\text{ha}$.

4.2 Liikkumisvastus ja -teho

Koneiden liikkumiseen vastus muodostuu kahdesta osasta, vierimisvastuksesta ja rinnevastuksesta, yhtälö 4.8. Liikkumisvastus ja -teho pitää ottaa huomioon, kun pellolla liikutaan raskailla koneilla tai suurilla kuormilla.

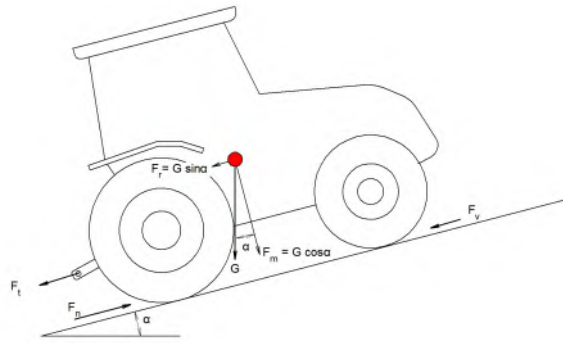
$$F_k = F_{vv} + F_r \quad (4.8)$$

F_k kulkuvastus
 F_{vv} vierimisvastus
 F_r rinnevastus

Vierimisvastus voidaan laskea yhtälön 4.9 avulla. Yhtälön F_m tarkoittaa rinnettä vastaan kohtisuoraan olevaa voimaa. Rinteessä maan vetovoima jakaa traktorin ja työkonen painon kahteen komponenttiin, rinteeseen suuntaiseen ja rinnettä vastaan kohtisuoraan, kuva 4.4. Rinteeseen suuntainen komponentti on rinnevastus F_r . Rinne aiheuttaa myös sen, että maata vasten kohtisuora voima hieman pienenee ja sitä kautta myös vierimisvastusvoima pienenee. Tämän vaikutus on vähäinen ja se voidaan jättää huomioimatta.

$$F_{vv} = f \cdot G_k \quad (4.9)$$

f vierimisvastuskerroin
 G_k yhdistelmän kokonaispaino
 α rinnekulma



Kuva 4.4: Traktorin paino jakautuu rinteessä kahteen komponenttiin

Rinteen suuntainen voima (rinnevastus F_r) saadaan yhtälöstä 4.10. Koska peltorinteet ovat melko loivia, rinnevastus voidaan myös laskea yhtälöstä $F_r = G \cdot 0,0174 \cdot \beta$, jossa β on joko rinnekulma tai kaltevuusprosentti.

$$F_r = G \cdot \sin \alpha \tag{4.10}$$

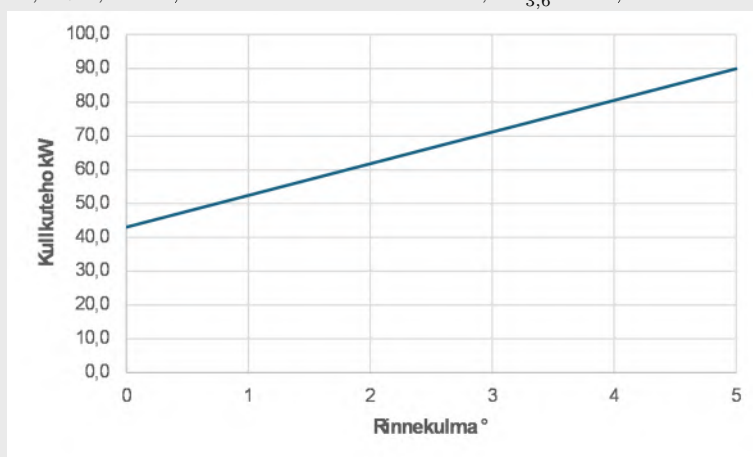
F_r rinnevastus
 α rinnekulma

Traktorin ja työkonene renkaat ovat erisuuria ja sen takia myös niiden vierimisvastuskertoimet ovat erisuuria. Jos tämän haluaa ottaa huomioon, silloin voi käyttää ASAE standardin mukaista vierimisvastuskertoimen laskentatapaa [ASAE D497]. Tässä asioita on yksinkertaistettu ja traktori-työkoneyhdistelmälle käytetään samaa kerrointa.

Liikkumiseen tarvittava teho P_k voidaan laskea kulkuvastuksesta F_k ja ajonopeudesta v kertomalla ne keskenään, yhtälö 4.11.

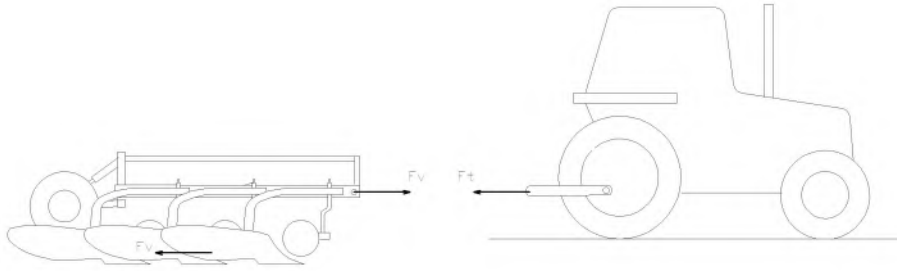
$$P_k = F_k \cdot v \tag{4.11}$$

Esimerkki 51. Traktori painaa 6500 kg ja noukinvaunu 9700 kg. Noukinvaunun tilavuus on 60 m³ ja nurmen tilavuuspaino on 200 kg/m³. Vierimisvastuskerroin on 0,08 ja ajonopeus on 7 km/h. Kuinka suuri on liikkumistehon tarve? Noukinvaunun kokonaispaino kuorman kanssa on 9700 + 60 · 200 = 21700 kg. Lisätään tähän traktorin paino 6500 kg, jolloin yhdistelmän kokonaispaino on 28200 kg. Vierimisvastusvoima on $F_{vv} = 0,08 \cdot 28200 \cdot 9,81 = 22,1$ kN. Lasketaan rinnevastus 2^o rinteessä. Rinteen suuntainen vastusvoima $F_r = 28200 \cdot \sin(2^o) \cdot 9,81 = 9,7$ kN ja kokonaisvastus on 22,1 + 9,7 = 31,8 kN. Nousuun tarvitaan $31,8 \cdot \frac{7}{3,6} = 61,8$ kW.



4.3 Vetovastus ja vetoteho

Nimityksiä vetovastus, vetovoima ja vetoteho käytetään tavallisessa kielenkäytössä melko vapaasti kuvaamaan työkonene käytön voimantarvetta. Fysikaalisessa mielessä pitää erottaa voiman ja tehon käsite, koska ne ovat eri suureita. Voima voi olla staattinen tilanne ja vaikka voima vaikuttaa ei kuitenkaan vielä tapahdu liikettä.



Kuva 4.5: Traktorin on tuotettava työkoneneen vetoon tarvittava voima F_v

Vetotehoon sen sijaan liittyy liike, voima on riittävän suuri ja työkonene on saatu liikkeelle, työtä tehdään. Vetovastuksen ja vetovoiman ero on oikeastaan siinä kummalta suunnalta asiaa tarkastellaan. Vetovastus on koneen vetämiseen tarvittava voima. Vetovoima on taasen traktorin aikaansaama voima ja työkonetta vedettäessä sen on oltava vetovastuksen suuruinen. Vetovastusta voidaan myös kutsua työkoneneen tarvitsemaksi vetovoimaksi. Vetoteho taasen on työkoneneen vetämiseen tarvittava teho. Kun työkonene liikkuu pellolla, sen liikuttamiseen tarvitaan vetovoimaa. Kone aiheuttaa vetovastuksen. Työkoneneen vetoon tarvittava vetovoima F_t (kuva 4.5) riippuu:

- tehtävästä työstä
- maalaajista
- maan kosteudesta
- työleveydestä
- työsyvyydestä
- työkoneneen painosta
- ajonopeudesta
- työkoneneen säädöistä
- työkoneneen kunnosta

Yleisimmin koneen koon yhteydessä ilmoitetaan kuinka suuritehoinen traktori tarvitaan koneen vetämiseen. Jos vetovastusta halutaan tutkia tarkemmin ja selvittää erilaisten koneiden toimintaa, silloin mitataan tai määritetään vetovastus esimerkiksi työleveyttä kohti tai piikkiä/vannasta kohti. Arviointi voidaan tehdä vielä tarkemmin ottamalla huomioon esimerkiksi piikkien muoto. Tässä kappaleessa käsitellään eri vetovastuksen arvioinneissa käytössä olevia tapoja.

Hydralisylintereitä käytettäessä käyttöaika on usein lyhyt, jolloin niiden tarvitsema teho ei ole jatkuvaa ja usein se on myös vähäistä. Hydraulimootorit tarvitsevat jatkuvaa tehoa, suurimmillaan kyse voi olla 20 - 30 kW tehosta. Sähkö on usein pienitehoista.

4.4 Työkoneneen ja traktorin koon yhteensovittaminen

Traktorin ja työkoneneen koon valintaa voidaan tehdä kahteen suuntaan, valitaan työkonetta traktoriin tai valitaan traktori työkoneneen koon mukaan. Työkonenevalmistajat ilmoittavat tyypillisesti kuinka suuren moottoritehon työkonene tarvitsee. Katsotaan kuitenkin hieman tarkemmin valintaa. Traktorin tai työkoneneen koon valinnassa on kaksi perusasiaa:

1. Riittävä vetovoima. Traktorin on aikaansaattava työkoneneen vetoon tarvittava vetovoima. Tämä tarkoittaa riittävää traktorin painoa tai traktorille sopivaa työkoneneen kokoa. Kun valitaan traktoriin työkonetta, lähdetään traktorin vetovoimasta. Sopiva pyörien luisto on 8 - 15 %, valitaan luisto tältä väliltä. Seuraavaksi valitaan halutaanko arvio laskea pehmällä (CI 500 kPa), muokatulla (CI 700 kPa) vai kantavalla pellolla (CI 1400 kPa). Katsotaan kuvasta 4.1 kehävoimakertoin ja taulukosta 4.1 vierimkisivastuskertoin. Lasketaan yhtälön 4.1 tai 4.3 avulla traktorin vetoima. Tämän perusteella valitaan työkonene, jonka traktori pystyy vetämään. Jos halutaan valita työkoneneen vetovastuksen mukainen traktori, tarvittava traktorin paino voidaan laskea yhtälöstä 4.2.

2. Riittävä vetoteho ja voimanottoakseliteho. Moottoriteho ratkaisee sen millä nopeudella työtä voidaan tehdä. Moottoritehoa pitäisi olla riittävästi, jotta saadaan normaali työnopeus aikaiseksi. Traktorin vetoteho saadaan laskettua moottoritehosta yhtälön 4.5 avulla, $P_m = k_m \cdot P_v \Rightarrow P_v = \frac{P_m}{k_m}$. Kun tämä on laskettu, voidaan laskea millä nopeudella traktori pysyy vetämään työkonetta. Yhtälöstä 4.4 ratkaistaan ajonopeus, $P_v = F_t \cdot v \Rightarrow v = \frac{P_v}{F_t}$. Tämä näyttää mikä on suurin nopeus, jonka traktori pystyy saamaan aikaiseksi.

4.5 Muokkaukoneiden tehontarve

Muokkaukoneiden vetovastus koostuu seuraavista osista: maan leikkaaminen, maan murtaminen, maan siirtäminen ja siirtämisessä tarvittava kiihdyttäminen, työkoneneen kitka- ja liikkumisvastukset (mukaan lukien mäki- vastus) sekä mahdolliset käytön aikaisten hydraulisten tai sähköisten säätöjen tarvitsemat tehot. Suurin näistä on maan leikkaamisesta ja murustamisesta johtuva vastus. Vastus annetaan joko työleveyttä kohti tai vannasta/piikkiä kohti. Koneissa, joissa on piikit tai vantaat näiden väli voi olla säädettävissä tai se on asetettavissa halutuksi. Tällöin piikkiä tai vannasta kohti annettu arvo on täsmällisempi kuin työleveyttä kohti annettu lukema.

Vetovastuslukemien ongelmana on maalajien ja maan kosteuden aiheuttamat vaihtelut. Sen takia saadut arvot eivät ole tarkkoja, vaan niissä on helposti muutaman kymmenen prosentin epävarmuus. Ajonopeus vaikuttaa hitausvoimien kautta vetovastukseen, samoin siihen vaikuttaa työsyvyys. Nämä kaikki vaikutukset tulevat parhaiten huomioon otetuksi käyttämällä ajonopeuden suhteen toisen asteen yhtälöä. Esimerkkinä tällaisesta systemaattisesta tarkastelusta on ASAE D497 standardin mukainen yhtälö 4.22.

Mitä lähemmäs käytäntöä mennään sitä yksinkertaisempaa vetovoiman- ja vetotehontarpeen ilmoitustapaa käytetään. Edellä olevasta tavasta yksinkertaisempi tapa on laskea vetovastus tai -teho suoraan työleveyyden metriä tai vannasta kohti. Tällöin oletetaan, että työsyvyys on tavanomainen, samoin kuin ajonopeus. Työkoneneiden esitelehtisissä annetaan yleensä kullekin koneen koolle suositeltava traktorin moottoriteho.

4.5.1 Yleisiä vetovastuksen laskentatapoja

Vetovastus Söhnen mukaan

Maan leikkaamiseen ja murtamiseen on kehitetty useita eri malleja. Näihin voi tutustua esim. Upadhaya ym kirjoittamassa katsauksessa [Ypadhyaya 2009]. Näiden yhtälöiden käyttö on usein vaativaa ja sen takia tässä on käytetty hieman 'yksinkertaisempaa' mallia. Söhnen kehittämä malli on 'lähes' analyyttinen tapa ratkaista maassa kulkevaan levyyn kohdistuvia voimia. Käytetyt yhtälöt ovat pitkiä, mutta esimerkiksi, kun ne saa kirjoitettua taulukkolaskentaohjelmaan, alkuarvoja muuttamalla saadaan laskettua erilaisi vaikutuksia. Söhnen yhtälöiden hyvänä puoleena on, että niiden avulla voidaan tarkastella esimerkiksi piikin mittojen ja asennon vaikutusta voimiin. Tämä menetelmä on kuvattu tarkemmin Srivastava et al oppikirjassa [Srivastava et al 1993] ja periaate on esitetty myös Maamekaniikka julkaisussa [Ahokas & Oksanen 2015].

Söhne tarkasteli maassa liikkuvaa levyä ja muodosti sille tasapainolausekkeet sekä pysty- että vaakasuunnassa, jolloin saadaan vaakavoimalle F_x yhtälö 4.12.

$$F_v = \frac{m \cdot g}{Z} + \frac{F_a + F_c}{Z \cdot (\sin\gamma + \tan\phi \cdot \cos\gamma)} \quad (4.12)$$

F_v	vaakavoima (vastusvoima)
m	levyn päällä olevan maan massa
Z	parametri
F_a	maan kiihdyttämiseen tarvittava voima
F_c	maan koheesiovoima
γ	maan leikkautumiskulma
ϕ	maan sisäinen kitkakulma

Vastaavasti pystyvoimalle saadaan yhtälö 4.13. Yhtälössä μ on maan ja terän välinen kitkakulma.

$$F_y = F_v \cdot \frac{\cos\alpha - \mu \cdot \sin\alpha}{\sin\alpha + \mu \cdot \cos\alpha} \quad (4.13)$$

Parametri Z saadaan yhtälöstä 4.14.

$$Z = \frac{\cos\gamma - \tan\phi \cdot \sin\gamma}{\sin\gamma + \tan\phi \cdot \cos\gamma} + \frac{\cos\alpha - \mu \cdot \sin\alpha}{\sin\alpha + \mu \cdot \cos\alpha} \quad (4.14)$$

Kulma γ saadaan yhtälöstä 4.15.

Taulukko 4.2: Peltomaan koheesio- ja kitka-arvoja maanmuokkauksessa

Maalaji	Koheesio c kPa	Kitkakulma ¹ ϕ °	Maan ja terän välinen kitkakerroin μ	Tilavuuspaino ² kg/m ³
Kostea hiesusavi	40 - 60	30 - 20	0,10 - 0,25	1600
Normaali hiesusavi	60 - 90	30 - 20	0,20 - 0,35	1300
Kuiva hiesusavi	100 - 190	30 - 15	0,30 - 0,45	1500

¹Kitkakulma suurenee koheesio- ja kitka-arvojen pienessä, koska maan kosteus lisääntyy

²Tilavuuspaino riippuu kosteudesta ja maan rakenteesta, nämä ovat likiarvoja

$$\gamma = \frac{90 - \phi}{2} \quad (4.15)$$

Koheesiovoima saadaan yhtälöstä 4.16.

$$F_c = c \cdot \frac{b \cdot t}{\sin \gamma} \quad (4.16)$$

F_c maan koheesioista johtuva voima
 c maan koheesio
 b terän leveys
 t

Kiihdytysvoima saadaan yhtälöstä 4.17.

$$F_a = \rho_t \cdot b \cdot t \cdot v^2 \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha + \gamma)} \quad (4.17)$$

F_a maan kiihdyttämisestä johtuva voima
 ρ_t maan tilavuuspaino
 v ajonopeus

Levyn päällä olevan maan massa m saadaan yhtälöistä:

$$m = \rho_t \cdot t_e \cdot b \cdot \left(L_o + \frac{L_1 + L_2}{2} \right) \quad (4.18)$$

t_e levyn päällä olevan maamassan paksuus, yhtälö 4.19
 L_o terän (vantaan) pituus
 L_1, L_2 maamassan pituusmittoja, yhtälöt 4.20 ja 4.21

$$t_e = t \cdot \frac{\sin(\alpha + \gamma)}{\sin(\gamma)} \quad (4.19)$$

$$L_1 = t \cdot \frac{\cos(\alpha + \gamma)}{\sin(\gamma)} \quad (4.20)$$

$$L_2 = t_e \cdot \tan(\alpha) \quad (4.21)$$

Laskuissa tarvitaan maan lujuusarvoja, koheesioita c ja sisäistä kitkakulmaa ϕ sekä maan ja terän välistä kitkaa μ . Taulukossa 4.2 on esimerkkejä pellon kitka- ja koheesioarvoista.

Esimerkki 52. S-piikin terälevyn leveys on 35 mm ja pituus 220 mm. Piikin kulma maahan nähden on 44° . Maalajina on normaali savi, jonka tilavuuspaino on 1300 kg/m³. Kuinka suurina ovat piikkivoimat, kun työsyvyys on 7 cm, ajonopeus on 10 km/h ja terän ja maan välinen kitkakulma on 0,25 ?

Katsotaan taulukosta 4.2 saven arvoja. Valitaan koheesioarvo 70 kPa ja kitkakulma 25° . Lasketaan voimat taulukkolaskennan avulla, jolloin saadaan alla oleva tulos. Piikin vastusvoima on 300 N ja piikkiin kohdistuva pystyvoima on 187 N. Positiivinen pystyvoima tarkoittaa sitä, että piikki on maahakuinen ja pyrkii menemään syvemmälle maahan. Negatiivinen pystyvoima tarkoittaisi piikin pyrkimystä nousta ylemmäksi. Tukielimillä ja painoilla saadaan työsyvyys pysymään haluttuna.

Piikit ovat yleensä joustopiikkejä. Tämä tarkoittaa sitä, että kuormitettuna piikki taipuu taaksepäin, jolloin työsyvyys muuttuu ja teräkulmat muuttuvat. Esimerkiksi S-piikin työsyvyys pienenee kuormitettaessa 1 - 2 cm ja leikkukulma 5 - 10°. Äkeessä on piikkien lisäksi pyöriä, latoja ja jyriä, jotka lisäävät vetovastusta.

Taulukko 4.3: ASAE D497 mukaisia kertoimia

Työkone	Yksikkö	A	B	C	M ₁	M ₂	M ₃
Jankkuri, kapea terä	Terä	226	0	1,8	1,0	0,7	0,45
Jankkuri, hanhenjalka	Terä	294	0	2,4	1,0	0,7	0,45
Siipiaura	m	652	0	5,1	1,0	0,7	0,45
Lautasäes, sänkimuokkaus	m	309	16	0	1,0	0,88	0,78
Lautasäes, kylvömuokkaus	m	216	11,2	0	1,0	0,88	0,78
Kultivaattori, sänkimuokkaus	Terä	46	2,8	0	1,0	0,85	0,65
Kultivaattori, kylvömuokkaus	Terä	32	1,9	0	1,0	0,85	0,65
Kylvökone < 3,7 m	Vannas	300	0	0	1,0	1,0	1,0
Kylvökone > 3,7 m	Vannas	200	0	0	1,0	1,0	1,0
S-piikki	Terä	15	1,1	0			

Vetovastus ASAE D497 mukaan

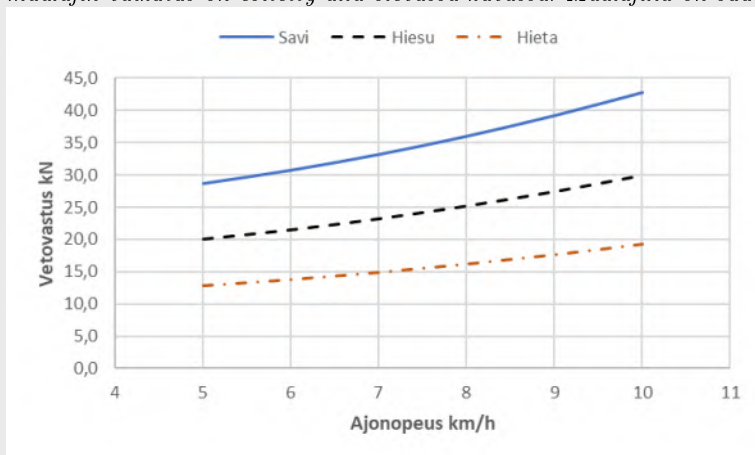
ASAE D497 [ASAE D497] käyttää työkoneiden vetovastuksille yhtälöä 4.22. Yhtälö ottaa huomioon maalajin, työleveyden, työsyvyyden ja ajonopeuden. Nämä tekijät vaikuttavat eniten vetovastukseen. Äkeiden ja vantaiden kohdalla työleveyden sijaan standardissa käytetään piikkiä tai vannasta. Maalajiluokituksia on kolme, savimaa, hiesu ja hiekka/sora. Taulukossa 4.3 on tämän standardin mukaisia kertoimia. Jos 'Yksikkö' = Terä/Vannas, b korvataan terien/vantaiden lukumäärällä. Standardissa on myös annettu vastuksen epävarmuus, joka on luokkaa 20 - 50%. Tämä osoittaa olosuhteiden vaihtelun vaikutusta.

$$F_v = M \cdot (A + B \cdot v + C \cdot v^2) \cdot b \cdot t \quad (4.22)$$

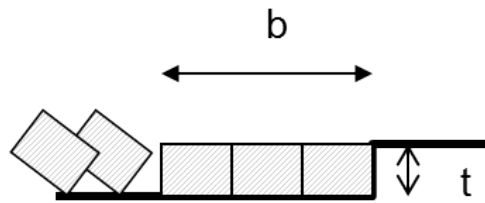
- F_v vetovastus [N]
 M Maalajikerroin, M_1 = savimaa, M_2 = hiesumaa ja M_3 = hiekkamaa
 A, B ja C konekohtaisia kertoimia
 v ajonopeus [km/h]
 b työleveys [m]
 t [cm]

Esimerkki 53. Miten kyntöauran vetovastus muuttuu työsyvyyden ja ajonopeuden muuttuessa?

Valitaan maalajiksi hiesu, jolloin kerroin $M=0,7$. Työsyvyytenä käytetään 23 cm, työleveytenä 1,6 m ja ajonopeutena 7 km/h. Tämän perusteella saadaan vetovastus $F_v = 0,7 \cdot (652 + 0 \cdot 7 + 5,1 \cdot 7^2) \cdot 1,6 \cdot 23 = 23,2$ kN. Ajonopeuden ja maalajin vaikutus on esitetty alla olevassa kuvassa. Maalajilla on suurin vaikutus vastusarvoihin.



Vetotehon tarve on $P_v = 23,2 \cdot \frac{7}{3,6} = 45,2$ kW. Kun käytetään moottoritehokerrointa $k_m=1,6$, saadaan tarvittavaksi moottoritehoksi $45,2 \cdot 1,6 = 72$ kW. Kun pyörien luistona käytetään 15%, saadaan kovalla pellolla kehävoimakertoimeksi $\mu = -10,70 \cdot 0,15^2 + 5,83 \cdot 0,15 = 0,63$. Tarvittava traktorin paino on $m = \frac{23200}{(0,63-0,06) \cdot 9,81} = 4150$ kg



Kuva 4.6: Kynnön poikkipinta-ala

Taulukko 4.4: Muokkausvälineiden tyypillisiä ominaisvastuksia

Muokkausväline	Nopeus km/h	Ominaisvastuskerroin k_o kN/m ²		
		Raskas maa	Keskiraskas maa	Kevyt maa
Kyntö [kN/m ²]	5	80	50	35
Lautasäes, perusmuokkaus [kN/m ²]	9	70	60	50
Lautasäes, kylvömuokkaus [kN/m ²]	9	40	35	30
Äkeen etulata [kN/m] ¹		1,3		0,6
Varpajyrä [kN/m] ¹		0,6		

¹ Työleveyttä kohti

4.5.2 Yksinkertaisia vetovastuksen laskentatapoja

Maan ominaisvastuskerroin

Kappaleessa 4.5.1 muokkauspiikkejä tarkasteltiin teoreettisesti ja sitä tapaa käytetään käytännössä harvemmin. Maanmuokkauslaitteiden vetovastus voidaan ilmoittaa työkonene käsittelemää poikkipinta-alaa kohden. Töille on määritetty ominaisvastuskertoimia k_o ja vetovastus voidaan laskea yhtälön 4.23 avulla. Yhtälössä t on työsyvyys ja b on työleveys. Näiden tulo on laitteen käsittelemä poikkipinta-ala. Kuvassa 4.6 on esitetty kynnön poikkipinta-ala.

$$F_v = k_o \cdot t \cdot b \quad (4.23)$$

Todellisuudessa ajonopeus vaikuttaa vetovastukseen, samoin syvään äestettäessä tai kynnettäessä kyntöantura lisää vastusta. Yhtälö 4.23 pätee normaalia ajonopeutta ja työsyvyyttä käytettäessä. Taulukossa 4.4 on eri muokkauslaitteiden ominaisvastuksia. Luvut ovat keskimääräisiä lukuja ja ne vaihtelevat tilanteen mukaan. Laskentatavalla ei saada kovin tarkkoja tuloksia, mutta suuruusluokka saadaan.

Vastusvoima voidaan myös laskea piikkiä/terää tai vannasta kohden. Tätä tapaa käytetään, koska terävälit voivat vaihdella. Silloin ominaisvastuksessa on mukana vain työsyvyys, yhtälö 4.24. Ominaisvastuskertoimia on taulukossa 4.5.

$$F_v = k_t \cdot t \quad (4.24)$$

Esimerkki 54. Perusmuokkauksen vaihtoehtoina on kyntö tai lautasäestys. Kyntöauran työsyvyys on 20 cm ja lautasäkeen 13 cm. Kuinka suuri on 1,6 m auran ja 3 m lautasäkeen vetovastus? Ajonopeus on 7 km/h kummallakin. Moottoritehoeroin on 1,7. Maa on kova maa.

Taulukon 4.4 mukaisesti, kun kyseessä on keskiraskas maa, auran ominaisvastus on 50 kN/m² ja lautasäkeen ominaisvastus on 59 kN/m². Kynnön teoreettinen työsaavutus on $\frac{1,6 \cdot 7}{10}$ on 1,1 ha/h ja vetovastus on $F_v = 1,6 \text{ m} \cdot 0,2 \text{ m} \cdot 50 \text{ kN/m}^2 = 16 \text{ kN}$. Lautasäkeen työsaavutus on $\frac{3 \cdot 7}{10}$ on 2,1 ha/h ja vetovastus $F_v = 3 \text{ m} \cdot 0,13 \text{ m} \cdot 59 \text{ kN/m}^2 = 23 \text{ kN}$. Auran vetotehon tarve on $16 \cdot \frac{7}{3,6} = 31 \text{ kW}$ ja lautasäkeen $23 \cdot \frac{7}{3,6} = 45 \text{ kW}$. Moottoritehon tarve on auralla $1,7 \cdot 31 = 53 \text{ kW}$ ja lautasäkeellä 77 kW. Vetämiseen tarvitaan auralla 2900 - 3550 ja lautasäkeellä 4120 - 5100 kg painava traktori. Kovalla ja tasaisella maalla tarvitaan pienempi paino kuin pehmeällä tai rinteisellä pellolla.

Taulukko 4.5: Terien ja vantaiden ominaisvastuksia

Muokkausväline	Nopeus km/h	Ominaisvastuskerroin k_t kN/(m·terä)		
		Raskas maa	Keskiraskas maa	Kevyt maa
Kultivaattori, perusmuokkaus	8	8,8	7,5	5,8
Kultivaattori, kylvömuokkaus	8	6,1	5,3	4,0
S-piikki, 1. ajokerta	7	4,8		2,3
S-piikki, 2. ajokerta	7	3,3		1,5
S-piikki, 2. ajokerta	10	4,3		1,8

4.5.3 Äkeen varusteiden vaikutus vetovastukseen

Äes tarvitsee tukielimet, jotta äestyssyvyys pysyy haluttuna. Äkeen paino ja terien maahakuisuus painavat äestä syvemmälle maahan. Tuennan lisäksi äkeessä voi olla etu- ja takalata, erilaisia jyriä ja jälkihara. Näiden vastusvoimat vaihtelevat sen mukaan kuinka paljon kukin osa kantaa äkeen painosta ja pystyvoimista. Pyörät ovat traktoriin verrattuna pienempiä, jolloin niiden vierimisvastuskerroin on luokkaa 0,1 - 0,2. Jyrien vierimisvastuskertoimet ovat luokkaa 0,4 - 0,6. Äkeen kokonaisvastus voidaan arvioida yhtälöstä 4.25.

$$F_{vk} = F_v + f_t \cdot (G_{äes} + F_y) \quad (4.25)$$

- F_{vk} äkeen kokonaisvastus
- F_v terien vastus
- f_t tukielinten vierimisvastuskerroin
- F_y terien pystyvoima

Esimerkki 55. S-piikkiäkeen työleveys on 7,8 m ja siinä on 77 piikkiä. Äkeessä on tukipyörät ja takana varpajyrä. Mikä on äkeen vetovastus?

S-piikin terälapun leveys on 40 mm ja pituus 190 mm. Vedossa teräkulma on 45°. Äkeen paino on 5600 kg. Käytetään kappaleen 4.5.1 laskutapaa. Saadaan normaalilla hiesusavella, kun työsyvyys on 7 cm ja ajonopeus 9 km/h, vaakavoima on 427 N ja pystyvoima 183 N. Piikkien yhteinen vastus on $77 \cdot 427 = 32,9$ kN. Piikit ovat maahakuiset ja niiden yhteinen alaspäin suuntautuva voima on $77 \cdot 183 = 11,4$ kN. Arvioidaan vierimisvastuskertoimen keskiarvoksi 0,2. Äkeen kokonaisvastus on $32900N + 0,2 \cdot (5600 \cdot 9,81 + 11400) = 46,2$ kN. Vetotehon tarve on $46,2 \cdot \frac{9}{3,6} = 116$ kW, ja jos tehokerroin k_m on 1,4, moottoritahon tarve on $1,4 \cdot 116 = 162$ kW. Tarvittavan traktorin painon laskentaan tarvitaan ensin traktorin kehävoima- ja vierimisvastuskerroin. Valitaan ne muokatun pellon mukaan (CI 700, kuvan 4.1 $\mu = 0,6$ ja $f=0,09$. Tarvittava paino on $m = \frac{46200}{(0,6-0,09) \cdot 9,81} = 9200$ kg.

4.6 Voimanottoakselikäyttöisten koneiden tehontarve

Voimanottoakselikäyttöiset ja itsekulkevat koneet käsittelevät materiaalia ja tehon tarve riippuu siitä, kuinka paljon materiaalia koneen läpi kulkee kg/s tai kuinka paljon esimerkiksi jyrsimet käsittelevät maata. Ajonopeus ja työleveys määrittävät tämän, yhtälö 3.7. Näille koneille ei ole löydettävissä paljoakaan tietoa, yleisin laskentatapa on ASAE D497 standardin mukainen tapa, yhtälö 4.26. Massavirta saadaan laskettua yhtälön 3.7 avulla. Massavirta pitää laskussa määrittää teoreettisen työsaavutuksen avulla (yhtälö 3.6), koska se kuvaa koneikon läpi menevää hetkellistä massavirtaa.

$$P_{pro} = P_0 + K_b \cdot b + K_m \cdot q_m \quad (4.26)$$

Taulukko 4.6: ASAE D497 standardin mukaisia tehokertoimia

Työkone	P_0 kW	K_b kW/m	K_m kWh/t
Pyöröpaalain, kiinteä kammio	2,5	0	1,8
Pyöröpaalain, muuttuva kammio	4	0	1,1
Leikkuupuimuri	20	0	3,6 ¹
Niittosilppuri	6	0	4 ²
Lautasniittokone	0	5	0
Lautasniittomurskain	0	8	0
Sormipalkkiniittomurskain	0	4,5	0
Sormipalkkiniittokone	0	1,2	0
Pyöröharava	0	2	0
Pöyhin/karhotin	0	1,5	0
Noukinvaunu	0	0	1,5 ³
Lietelannanlevitin	0	0	0,2

¹Oljen massavirtauksen mukaan ²Kuiva-ainemassavirta ³[Jokiniemi ym 2021]

P_{pro}	prosessointitehon tarve [kW]
P_0	tyhjäkäyntiteho [kW]
K_b	työleveyden kerroin [kW/m]
b	työleveys [m]
K_m	massavirran kerroin [kWh/t]
q_m	koneen käsittelemä massavirta [t/h]

Laskentakertoimia on taulukossa 4.6. Nämä kertoimet pätevät Pohjois Amerikan olosuhteissa ja siellä käytettäville koneille.

Niittokone ja niittomurskain

Niittokoneiden ja niittomurskainten tarvitsema käyttöteho riippuu taulukon 4.6 mukaan työ leveydestä. Pelkässä niitossa tehontarve on pieni, 1,2 - 5 kW metriä kohden. Murskaus lisää tehontarvetta ja esimerkiksi lautasniittomurskaimen tehontarve on 8 kW/m. Silloin 10 m työleveydellä tarvitaan 80 kW voimanottoakseliteho. Liikkumisteho voidaan laskea kappaleen 4.2 mukaisesti.

Silppuri

Silppurin tehontarve riippuu taulukon 4.6 tyhjäkäyntitehosta ja kuiva-ainemassavirtauksesta. Jos halutaan laskea myös liikkumisteho, niin se voidaan tehdä kappaleen 4.2 mukaisesti.

Esimerkki 56. Nurmen sato on 8000 kg/ha ja satoa vastaava kuiva-ainepitoisuus on 20%. Silppurin karho on koottu 8 m leveydeltä ja työnopeus on 7 km/h. Mikä on käyttötehon tarve?

Silppurin tehokerroin on annettu kuiva-ainemassavirran suhteen. Kuiva-ainesato on $0,2 \cdot 8000 = 1,6$ t/ha. Työsaavutus on $\frac{7 \cdot 8}{10} = 5,6$ ha/h ja kuiva-ainemassavirta $5,6 \text{ ha/h} \cdot 1,6 \text{ t/ha} = 9,0$ t/h. Voimanottoakselitehontarve on $6 \text{ kW} + 4 \text{ kWh/t} \cdot 9,0 \text{ t/h} = 42$ kW.

Paalain

Paalaimen voimanottoakseliteho voidaan laskea yhtälön 4.26 avulla. Liikkumiseen tarvitaan myös tehoa, joka voidaan laskea kappaleen 4.2 mukaisesti.

Esimerkki 57. Pyöröpaalaimen työleveys on 2,1 m ja ajonopeus on 8 km/h. Sato on karhotettu 7 m leveydeltä. Nurmen märkäsato on 12 t/ha. Kuinka paljon paalain tarvitsee voimanottoakselitehoa, kun kyseessä on muuttuvakammioinen paalain?

Teoreettinen työsaavutus on $\frac{8 \cdot 7}{10} = 5,6$ ha/h. Käytetään työhyötysuhteena 65% (taulukko 3.1), jolloin todellinen työsaavutus on $0,65 \cdot 5,6 = 3,6$ ha/h. Tehontarpeen laskussa käytetään teoreettista työsaavutusta, koska se kuvaa todellista tehontarvetta korjuun aikana. Koneen läpi kulkema massavirta on $q_m = 12 \text{ t/ha} \cdot 5,6 \text{ ha/h} = 67,2$ t/h. Voimanottoakseliteho on $P_{pro} = 4 + 0 \cdot 2,1 + 1,1 \cdot 67,2 = 77,9$ kW.

Noukinvaunu

Noukinvaunun käytössä tarvitaan voimaa ja tehoa sekä vaunun käyttöön, että liikkumiseen. Noukinvaunujen painot ja tilavuudet ovat suuria, jolloin liikkumiseen tarvitaan riittävästi voimaa ja tehoa. Tämä teho voidaan laskea kappaleen 4.2 mukaisesti ja voimanottoakseliteho yhtälöstä 4.26.

Esimerkki 58. Noukinvaunun tilavuus on 60 m^3 , omapaino on 9700 kg , nurmen tilavuuspaino kuormassa on 200 kg/m^3 , korjuuskosteudessa satotaso on 8000 kg/ha , ajonopeus on 7 km/h ja karho on tehty 8 m leveydeltä. Kuinka paljon tarvitaan tehoa työntekoon 2° vastarinteessä, kun traktorin paino on 8000 kg ?

Kuorman paino on $60 \text{ m}^3 \cdot 200 \text{ kg/m}^3 = 12000 \text{ kg}$. Kokonaispaino, traktori + perävaunu + kuorma = $8000 + 9700 + 12000 = 29700 \text{ kg}$. Pelto voidaan olettaa kovaksi, jolloin vierimisvastuskerroin on $0,07$. Vierimisvastus on $F_{vv} = 0,07 \cdot 29700 \cdot 9,81 = 23,3 \text{ kN}$. Rinnevastus on $F_r = G \cdot \sin\alpha = 29700 \cdot 9,81 \cdot \sin(2^\circ) = 10,2 \text{ kN}$ ja kokonaisvastus $23,3 + 10,2 = 33,5 \text{ kN}$. Liikkumiseen tarvittava teho on $33,5 \cdot \frac{7}{3,6} = 65,1 \text{ kW}$. Käytetään moottorin tehokertoimena $1,5$, jolloin moottoritehon tarve on 98 kW . Voimanottoakselitehon tarve lasketaan yhtälön 4.26 mukaisesti. Noukinvaunun työsaavutus on $\frac{7 \cdot 8}{10} = 5,6 \text{ ha/h}$ ja massavirta on $5,6 \text{ ha/h} \cdot 8 \text{ t/ha} = 44,8 \text{ t/h}$. Kerroin $K_b = 0$ ja $K_m = 1,5 \text{ kWh/t}$ Tehontarve on $1,5 \text{ kWh/t} \cdot 44,8 \text{ t/h} = 67,2 \text{ kW}$. Tämä Kokonaistehon tarve on $98 + 67 = 165 \text{ kW}$. Voimanottoakselitehon tarpeessa ei käytetä tehokerrointa, koska se saa käyttövoiman suoraan moottorista. Tehokerroin ottaa huomioon rengashäviöt eli vetämiseen liittyvät häviöt.

4.7 Tiivistelmä

Koneet	valitaan ketjuna, ei yksittäin. Seuraavan koneen kapasiteetin tulee olla hieman edellistä suurempi. Kuljetusten ja täyttöjen ei tule keskeyttää varsinaista työtä. Traktori ja työkone mitoitetaan aina yhdessä.
Paino	ratkaisee vetovoiman. Traktorin vetovoima määräytyy pääasiassa painon perusteella. Liian kevyt traktori → luisto kasvaa → vetokyky heikkenee. Optimaalinen luisto peltotyössä on 8–15 %.
Moottoriteho	ratkaisee työnopeuden. Paino määrää voidaanko vetää ja mikä on luisto . Teho määrää kuinka nopeasti vedetään
Vetovastus	riippuu työolosuhteista, eniten vaikuttaa maalaji, työsyvyys ja työleveys
Liikkumiseen	tarvittava teho voi olla merkittävä erityisesti raskailla kuormilla ja rinteessä. Noukinvaunuissa ja kuljetuksissa liikkumisteho voi muodostaa suuren osan kokonaistehosta.
Voimanottoakselikäyttöiset	työkoneet mitoitetaan läpi kulkevan massavirran perusteella. Tehontarve riippuu läpikulkevasta materiaaalivirrasta (t/h).
Käytännön mitoitusjärjestys	<ol style="list-style-type: none"> 1. Laske työkoneen vetovastus 2. Tarkista riittävä traktorin vetovoima (paino) 3. Laske vetoteho ja vetoon tarvittava tarvittava moottoriteho (moottoritehokerroin) 4. Laske liikkumisteho ja liikkumiseen tarvittava tarvittava moottoriteho (moottoritehokerroin) 5. Lisää tarvittaessa voimanottoakselitehon tarve, näin saat tarvittavan moottoritehon

Luku 5

Maan tiivistyminen

Konekapasiteettiä lisätään suurentamalla koneita, jolloin myös niiden massa lisääntyy. Pellon kestävyys vaikuttaa koneista maahan kohdistuva pintapaine ja peltoon kohdistuva kokonaiskuorma. Maan lujuteen vaikuttaa eniten sen kosteus. Kuiva maa kestää paljon suuremman kuormituksen kuin märkä maa. Maan märkyyteen voidaan vaikuttaa ojituksella. Toistuva kuormitus lisää joka kerralla tiivistymistä. Tämän takia työmenetelmät pitäisi valita niin, että liikennöinti pellolla olisi mahdollisimman vähäistä. Ajonopeus vaikuttaa maahan kohdistuviin paineisiin. Maan rakkuloissa on vettä ja ilmaa ja jos kuormitus on lyhytaikainen, rakkulat eivät ehdi painua kasaan (rakkuloiden ilma ja vesi ei ehdi poistua niistä). Suurempi ajonopeus aiheuttaa siten pienemmät rasitukset maahan.

Työkoneiden veto aiheuttaa traktorin pyörien luistoa. Jos luisto on liiallista, renkaat kaivautuvat maahan ja aiheuttavat vaurioita. Samoin työkoneen väärä säätö tai kuluneet terät voivat aiheuttaa tiivistymistä. Ne eivät tunkeudu kunnolla maahan, vaan 'höyläävät' maan pinnan ja samalla painonsiirto heikkenee ja traktorin pyörien luisto lisääntyy.

Jos koneiden renkaista maahan kohdistuva pintapaine on maan kantavuutta alhaisempi, kone ei uppoa ja maan pinta säilyy. Jos pintapaine on kantavuutta suurempi, renkaat uppoavat ja peltoon jää ajourat. Renkaan aiheuttama keskimääräinen pintapaine saadaan lisäämällä renkaan ilmanpaineeseen renkaan runkorakenteesta johtuva 'runkopaine'. Traktorirenkaiden rengaspaineet ovat normaalisti 0,6 - 2 bar ja runkopaineet 0,1 - 0,5 bar. Renkaan runkopaine kasvaa, kun kudoskerrosluokka suurenee. Vyörenkaan runkopaine on yleensä ristikudosrenkaan painetta alhaisempi. Jotta pellon pintavauriot olisivat mahdollisimman vähäiset, pitäisi pyrkiä mahdollisimman alhaisiin rengaspaineisiin eli traktorit, työkoneet ja näiden renkaat pitäisi valita alhaisia rengaspaineita suosien.

Myös renkaan luisto tuhoaa maan rakennetta ja aiheuttaa vaurioita. Tämän takia pitäisi välttää suuria, yli 20 % luistoja.

Vaikka pellon pinta ei vaurioituisi, painavat koneet tiivistävät maata syvemmältä. Tämän takia koneiden akselipainoja pitää rajoittaa liikuttaessa pellolla. Suositukset liikkuvat 4 - 6 t luokassa yksittäisille akseleille ja 8 - 10 t luokassa teliakseleille. Suositukseen vaikuttaa maalaji ja maan kosteus.

Luku 6

Laskuesimerkit ja analysointivihjeitä

6.1 Laskuesimerkit

Esimerkit antavat viitteitä siitä, miten eri asioita voidaan suunnitella. Laskentatuloksen tarkkuus riippuu siitä, miten hyvin lähtöarvot kuvaavat todellista tilannetta. Peltö, koneet ja sää tuovat niihin epätarkkuuksia. Joihinkin laskuesimerkkeihin on lisätty linkki, joka avaa pdf tiedostoon upotetun tiedoston. Nämä avautuvat taulukkolaskentaohjelmalla (Excel tiedosto). Laskuissa ei ole tarkistusta sille, mitä käyttäjä antaa lähtötietoina. Huonot lähtötiedot antavat älyttömän tuloksen tai kaatavat laskennan.

6.2 Tilasto-ohjelman käyttö poutapäivien haussa

Tilasto-ohjelman avulla voidaan taulukkolaskentaohjelmaan verrattuna melko helposti käsitellä ja suodattaa säädätaa. Tilasto-ohjelmia on saatavissa lukuisia, sekä maksullisia että ilmaisia. Tässä on esimerkki miten ilmaisohjelma Jaspilla voi käsitellä säätietoja.

Haetaan Ilmatieteen laitokselta halutulta paikkakunnalta päivittäiset säätiedot Excel muodossa. Avataan tiedosto Jasp ohjelmalla. Säätiedoissa arvo -1 = ei sadetta, arvo 0 = sadetta alle 0,1 mm. Poutapäivien luokittelussa käytetään usein sateen rajana alle 0,2 tai 0,3 mm/vrk sadetta.

Seuraavaksi suodatetaan data. Valitaan kuvan mukainen suodatusratti.

Havaintosessa	Vuosi	Kuukausi	Päivä	Aika (Päikäläinen aika)	Sademäärä [mm]	Ilman keskilämpötila [C]
1	Jyväskylän lentosauna	1970	1	02:00	7.2	-6.5
2	Jyväskylän lentosauna	1970	2	02:00	2.7	-9.3
3	Jyväskylän lentosauna	1970	3	02:00	2.1	-7.8
4	Jyväskylän lentosauna	1970	4	02:00	3.4	-6
5	Jyväskylän lentosauna	1970	5	02:00	0.2	-8.7
6	Jyväskylän lentosauna	1970	6	02:00	0.1	-12.5
7	Jyväskylän lentosauna	1970	7	02:00	0.1	-13.7
8	Jyväskylän lentosauna	1970	8	02:00	0.1	-18.4
9	Jyväskylän lentosauna	1970	9	02:00	0.1	-18.4
10	Jyväskylän lentosauna	1970	10	02:00	0.2	-15.1
11	Jyväskylän lentosauna	1970	11	02:00	0	-7.1
12	Jyväskylän lentosauna	1970	12	02:00	-1	-10.9
13	Jyväskylän lentosauna	1970	13	02:00	0.1	-9.9
14	Jyväskylän lentosauna	1970	14	02:00	-1	-19
15	Jyväskylän lentosauna	1970	15	02:00	0.1	-22.2

Suodattimeen laitetaan kuukausi, jota halutaan analysoida ja sen jälkeen alkupäivä ja loppupäivä. Tämän jälkeen poutapäivät saadaan laittamalla sateen rajaksi vaikka 0,2 mm. Jokaisen suodattimen jälkeen painetaan Apply pass-through filter. Haluttaessa voidaan poistaa näytöstä poissuodatetut tiedot. Kun suodatus on tehty, Valitaan Analysis, Descriptives ja sieltä Descriptive Statistics.

Suodatusehdot

- Kuukausi = 5
- Päivä ≥ 10
- Päivä ≤ 30
- Sademäärä [mm] < 0.2

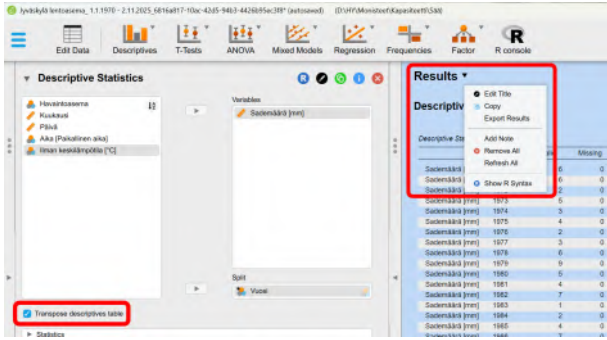
Poistuu

Näytä/piilota suodatetut arvot

Käytä suodatinta

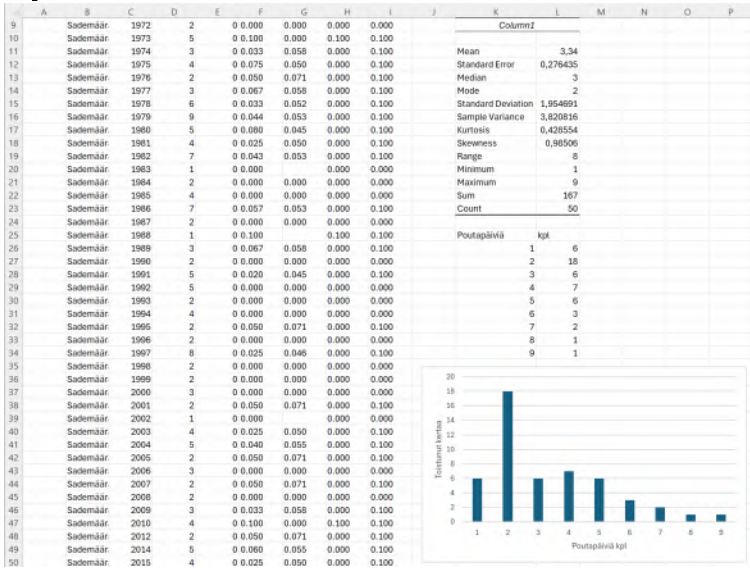
Apply pass-through filter

Descriptive Statistics osassa Variables kohtaan valitaan Sademäärä [mm] ja Split muuttujaksi valitaan vuosi. Ruksataan myös kohta Transpose descriptive table. Results sanan jälkeen ▼ valitaan Copy.

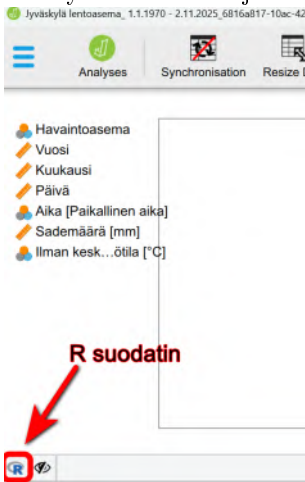


Liitetään luvut Exceliin, koska ne on usein helpompi käsitellä siellä. Luvuista oikeita ovat suodatuksen takia vain Vuosi ja Valid, joka on poutapäivien määrä. Valitaan Excelissä Data -> Data Analysis -> Descriptive Statistics.

Valitaan Valid (= poutapäivät) arvot ja valitaan tulostussolu ja ruksataan Summary statistics. Lisäksi Descriptive statistics osasta valitaan Histogram kohta, jolloin saamme lukemanpoutapäivien määrästä ja jakaumasta. Alla olevassa kuvassa keskiarvo, mediaani ja moodi ovat melko lähellä toisiaan, jakauma on oikealle vino ja kaksi poutapäivää on ollut useimmin toistunut määrä 50 vuoden aikana.



Kun hakujako ulottuu kahden kuukauden taitteeseen, silloin yllä esitetty tapa ei toimi. Jaspissa joudutaan silloin käyttämään R-ohjelman suodatinta.



Koodilla ((Kuukausi == 5 & Päivä >= 10) | (Kuukausi == 6 & Päivä <= 10)) & (Sademäärä [mm] < 0.2) haetaan toukokuun 10 ja kesäkuun 10 päivän välisiä poutapäiviä.

```
generatedFilter ← rep(TRUE, rowcount)

# Above you see the code that JASP generates for both value filtering and the drag&drop filter.
# This default result is stored in 'generatedFilter' and can be replaced or combined with a cus
# To combine you can append clauses using '&': 'generatedFilter & customFilter & perhapsAnother
# Click the (i) icon in the lower right corner for further help.
#

((Kuukausi = 5 & Päivä >= 10) | (Kuukausi = 6 & Päivä <= 10)) & (Sademäärä [mm] < 0.2)
```

6.3 Excel taulukkolaskentaohjelman käyttö tietojen käsittelyssä

Exceliä voidaan käyttää monilla eri tavoilla säätietojen käsittelyyn. Siinä voi kuitenkin joutua käyttämään vähemmän käytettyjä funktioita ja myös soluviittausten kanssa on oltava erittäin tarkkana. Jos soluviittaus menee väärin, myös laskenta menee väärin. Tässä on yksi esimerkki analysistä. Ilmatieteen laitoksen säätiedoista on haettu päiväkohtaiset sademäärät ja ilman keskilämpötilat vuodesta 1970 hakupäivään asti (1.11.2025). Tiedostossa 20935 riviä eli tiedot 20934 päivältä. Jos valitset muut suureet, kuin alla olevassa kuvassa, silloin soluviittaukset ovat erilaiset.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Havainto	Vuosi	Kuukausi	Päivä	Aika [Paikallinen aika]	Sademäärä	Ilman keski	Edellinen päivä	sade		Päivä	Kuukausi
2	Jyväskylä l	1970	1	1	1.1.1970	7,2	-6,5	0,0	Työn aloitus		25	6
3	Jyväskylä l	1970	1	2	2.1.1970	2,7	-9,3	7,2	Työn lopetus		10	7
4	Jyväskylä l	1970	1	3	3.1.1970	2,1	-7,6	2,7				
5	Jyväskylä l	1970	1	4	4.1.1970	3,4	-6	2,1	Poutaraja työpäivänä		0,2	nm/vrk
6	Jyväskylä l	1970	1	5	5.1.1970	0,2	-8,7	3,4	Edellisen päivän saderaja		1	nm/vrk
7	Jyväskylä l	1970	1	6	6.1.1970	0,1	-12,5	0,2				
8	Jyväskylä l	1970	1	7	7.1.1970	0,1	-13,7	0,1	Tulokset			
9	Jyväskylä l	1970	1	8	8.1.1970	0,1	-18,4	0,1	Vuosi			
10	Jyväskylä l	1970	1	9	9.1.1970	0,1	-16,4	0,1		1970		6
11	Jyväskylä l	1970	1	10	10.1.1970	0,2	-10,1	0,1		1971		7
12	Jyväskylä l	1970	1	11	11.1.1970	0	-7,1	0,2		1972		8
13	Jyväskylä l	1970	1	12	12.1.1970	-1	-10,9	0,0		1973		12
14	Jyväskylä l	1970	1	13	13.1.1970	0,1	-9,9	-1,0		1974		4
15	Jyväskylä l	1970	1	14	14.1.1970	-1	-19	0,1		1975		12
16	Jyväskylä l	1970	1	15	15.1.1970	0,1	-22,2	-1,0		1976		8
17	Jyväskylä l	1970	1	16	16.1.1970	0,1	-16,8	0,1		1977		4
18	Jyväskylä l	1970	1	17	17.1.1970	-1	-11	0,1		1978		4
19	Jyväskylä l	1970	1	18	18.1.1970	0,2	-18,1	-1,0		1979		3
20	Jyväskylä l	1970	1	19	19.1.1970	0	-14,2	0,2		1980		11
21	Jyväskylä l	1970	1	20	20.1.1970	0	-12,2	0,0		1981		5
22	Jyväskylä l	1970	1	21	21.1.1970	-1	-6,2	0,0		1982		11
23	Jyväskylä l	1970	1	22	22.1.1970	0,1	-5,1	-1,0		1983		7

- Tarvitsemme päiväyssarakkeen Excelin omassa muodossa. E sarakkeeseen on tallennettu alunperin kellon-aika. Sitä ei tarvita ja laskemme niiden päälle päiväyksen käskyllä $=DATE(B2;C2;D2)$. Tämä kopioidaan joka riville kaksoisklikkaamalla solun oikean alareunan pistettä.
- Haluamme mukaan myös tiedon siitä, onko edellisenä päivänä satanut. Soluun H2 kirjoitetaan 0 tai se jätetään tyhjäksi. Emme tiedä onko edellisenä päivänä satanut. Soluun H3 kirjoitetaan yhtälö $=F2$ ja tämä kopioidaan kaikille riveille.
- Työajan rajausta varten kirjoitamme soluun K2 mikä on työn alkupäivä ja soluun L3 mikä on kuukausi. Soluun K3 kirjoitamme lopetuspäivän ja L3 lopetuskaukauden. Tämä mahdollistaa kuun vaihteen kah-tapuolen tapahtuvan suodatuksen. Jos mennään vuoden vaihteen yli, tämä ei toimi. Voit muuttaa näitä arvoja ja ohjelma hakee aina uudet tiedot.
- Soluun K5 kirjoitamme mikä on päivän poutaraja ja K6 kuinka paljon edellisenä päivänä on saanut sataa.
- J10 sarakkeesta alaspäin kirjoitamme analysointivuodet. Tässä tapauksessa aloitus oli vuonna 1970 ja lopetus vuonna 2025.

F. K10 sarakkeeseen kirjoitamme yhtälön $=\text{COUNTIFS}(E:E; ">=" & \text{DATE}(J10; \$L\$2; \$K\$2); E:E; "<=" & \text{DATE}(J10; \$L\$3; \$K\$3); F:F; "<"& \$K\$5; H:H; "<"& \$K\$6)$. Tämä kopioidaan alas. Käsky etsii annettujen ehtojen avulla poutapäivien lukumäärän vuosittain. Sarakeviittaukset ovat käskyssä muotoa E:E, F:F ja H:H, mikä tarkoittaa koko saraketta ja rivimäärät menevät oikein, vaikka tiedostossa olisi eri määrä tietoja.

Tämä laskenta onnistuu, jos kaikki viittaukset menevät oikein. Tämän jälkeen voimme jatkaa analysointia Excelissä esimerkiksi edellisen Jasp esimerkin mukaisesti.

6.4 Markovin ketjun analysointi

Markovin ketjun käyttö Excelissä suoraan on hankalaa, joten ChatGPT teki siihen makron. Käytä tätä makroa säädätän kanssa. Säädätän sarakkeiden pitää olla alla olevan kuvan mukaiset, jotta makro löytää oikeat tiedot. Makro suoritetaan aina siinä välilehdessä, jossa säädätat ovat.

Turvallisuussyistä johtuen makrojen ja makrollisten tiedostojen siirtäminen voi olla rajoitettu. Nettivulla on pakattuna Markovin analyysi.zip tiedosto. Siinä on säädätää Jyväskylästä sekä Markovin makro. Pura tiedosto ja avaa se Excelissä. Hyväksy makrot, valitse Developer -> Macros. Aja (Run) MarkovPouta_Ajanajksolta.

Exceliin ilmestyy uusi välilehti, joka alkaa Markov-xxxx sanalla. Sieltä löydät tulokset.

P on pouta ja S on sade.

1. Kuinka monta kertaa valitulla ajanjaksolla pouta ja sade ovat vaihtuneet. P?P on poudasta poutaan, P?S on poudasta sateeseen, S?S on sateesta sateeseen ja S?P on sateesta poutaan.
2. Mitkä ovat todennäköisyydet seuraavan päivän säälle. Poudasta poutaan todennäköisyys on 68 % ja sateesta sateeseen 65 %.
3. Ehdollinen sarake näyttää todennäköisyyden poutapäiville, jos aloitat työt poutapäivinä. Edellisessä sarakkeessa on poutajakson pituus. Esimerkiksi 3 poutapäivän todennäköisyys on 47% ja kahden päivän 68%. Stationäärinen sarakkeessa on vastaavat luvut, kun alkupäivä on satunnainen.

1.		2.	
Siirtymäluvut		Markov-matriisi	
P?P	293	Nyky P	0,6830
P?S	136	Nyky S	0,3504
S?P	144		
S?S	267		
3.		Stationäärinen jakauma	
Ehdollinen: P(P...P tänään P)	Stationäärinen: P(tänään alkaen k poutapäivää)	p(P)	0,5250
1	1,0000	p(S)	0,4750
2	0,6830		
3	0,4665		
4	0,3186		
5	0,2176		

Jos haluat laskea arvot toiselle ajanjaksolle, palaa välilehdelle, jossa säädätat ovat ja suorita makro uudelleen.

Kirjallisuutta

- [Ahokas] Ahokas J. Koneiden kulkukyky. <https://www.agrotekno.fi/koneiden-kulkukyky/>, 11.12.2025
- [Ahokas & Oksanen 2015] Ahokas J. & Oksanen T. Maamekaniikka, 2. painos. Maataloustieteiden laitos julkaisuja 40. Helsingin yliopisto, Maataloustieteiden laitos. Helsinki 2015. <https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/153954/Maamekaniikka-%202015.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [Ahokas ja Mikkola] Ahokas J. ja Mikkola H. Traktorin polttoaineen kulutukseen vaikuttavia seikkoja. VAKOLAn tutkimusselostus nro 43. Vihti 1986.
- [Alakukku 2006] Alakukku, L. 2006. Emergence of small grain cereals at different water potentials of clay and sandy soil. In: Soil Management for Sustainability (eds. Horn, R., Fleige, H., Peth, S. & Peng, X.). Advances in Geocology 38, 175–180
- [Andersson ja Winklert 1972] Andersson, S., Winklert, P. 1972. Om de vattenhällande egenskaperna hos svenska jordarter. Grundförbättring. Vol. 25 s. 53-143.
- [ASAE D497] ASAE D497.6, Agricultural Machinery Management Data. American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- [Calcante et al] Calcante A., Fontanini L. & Mazzetto F. Repair and maintenance costs of 4WD tractors and self propelled combine harvesters in Italy. Journal of Agricultural Engineering 2013; volume XLIV
- [Ilmatieteen laitos] Havaintojen lataus. Ilmatieteen laitos. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus>
- [Hellstedt ja Virkkunen(2020)] Hellstedt, M. & Virkkunen, E. 2020. Karjatiloiilla muodostuvat säilörehun puristenesteet, pesuvedet sekä jaloittelualueiden ja turkistarhojen valumavedet. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 100/2020. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 25 s.
- [Hulkkonen ja Kaila] Hulkkonen i. ja Kaila E. Maatalouskoneiden kunnossapitokäytännöt. TTS: n julkaisuja 456, Työteho-seura 2021.
- [Ilmastokatsaus] Suomessa kesäsateet harvenevat, mutta muuttuvat rankemmiksi. Ilmatieteen laitos, Ilmastomuutos, Teematietoa. <https://www.ilmastokatsaus.fi/2025/09/19/suomessa-kesasateet-harvenevat-mutta-muuttuvat-rankemmiksi/> 21.10.2025
- [Jokiniemi 2016] Jokiniemi T. Energy efficiency in grain preservation. University of Helsinki Department of Agricultural Sciences, 2016. <https://researchportal.helsinki.fi/publications/energy-efficiency-in-grain-preservation>
- [Jokiniemi ym 2016] Jokiniemi T., Suokannas A. ja Ahokas J. Energy consumption in agriculture transportation operations. Engineering in Agriculture, Environment and Food, Volume 9, Issue 2, April 2016, Pages 171–178.
- [Jokiniemi ym 2021] Jokiniemi T., Mikkola H., Hakojärvi M. ja Alakukku L. Comprehensive model for predicting the fuel consumption in various harvesting methods of grass silage. Agricultural and Food Science (2021) 30: 8–23.

- [Järvenpää ja Laurola] Järvenpää M. ja Laurola H. Puintiopas. Työtehoseuran julkaisuja 290, Helsinki 1987
- [Karpe] KARPE-hanke, <http://www.karpe.fi/darvoennuste.php>, 10.1.2026
- [Klemola ym 2002] Klemola E., Karttunen J., Kaila E., Laaksonen K. & Kirkkari A-M. Lohkon koon ja muodon taloudelliset vaikutukset. Työte- hoseuran julkaisuja 386, Helsinki 2002
- [Kurjenluoma ym] Kurjenluoma J., Alakukku L. & Ahokas J. Rolling resistance and rut formation by implement tyres on tilled clay soil. *Journal of Terramechanics* 46 (2009) 267–275
- [Laine 1996] Laine A. Konekapasiteetin mitoitus ja konekustannukset viljan ja nurmirehun korjuussa. Työtehoseuran julkaisuja 349, 1996
- [Laine ja Peltonen] Laine A. ja Peltonen M. Maataloustraktorin kesto, kunnossapito ja luotettavuus. Työtehoseuran maataloustiedote 9/1997 (487)
- [Lips ja Burose(2012)] Lips M. & Burose. Repair and Maintenance Costs for Agricultural Machines. *International Journal of Agricultural Management*, Volume 1 Issue 3
- [Lips] Lips M. Repair and maintenance costs for nine agricultural machine types. *Transactions of the ASABE*, Vol. 56(4): 1299-1307, 2013
- [Lorencowicz & Uziak] Lorencowicz E. & Uziak J. Repair cost of tractors and agricultural machines in family farms. *Agriculture and Agricultural Science Procedia* 7 (2015) 152 – 157
- [Ostohintaindeksi] Maatalouden tuotantovälineiden ostohintaindeksi. Tilastokeskus, <https://stat.fi/tilasto/ttohi>, 10.1.2025
- [Hautala M. ym] Hautala M. Jokiniemi T, Ahokas J. Maatilakuivurit. Maataloustieteiden laitoksen julkaisuja 28. Helsingin Yliopisto Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta 2013.
- [Mollier Sketcher] <https://www.ivprodukt.com/software/mollier-sketcher>
- [NurmiArtturi] Hävikit kuriin ja säilörehun laadunvaihtelu hallintaan, NurmiArtturi lehti kesäkuu 2014
- [Ojala ym] Ojala K., Rantala J., Kärkinen T., Korkeamaa A. ja Soivio T. Päästölaskentaohjeistus tieliikenteen kuljetusten päästöjen arvioimiseksi Suomessa. Osa 2: Ohjeraportti. Traficom julkaisuja 13/2025, https://traficom.fi/sites/default/files/media/publication/Osa2_Ohjeraportti.pdf, 11.12.2025
- [Palva 2024] Palva R. Konetyön kustannukset ja tilastolliset urakointihinnat 2024. TTS Työtehoseuran julkaisu 487
- [Palva] Palva R. Säilörehun tiivistäminen. Nurmesta tulosta - hanke, Tietokortti 2, https://www.proagria.fi/uploads/nurmestatulostatietokortti_2.pdf, 28.1.2026
- [Peltonen ym] Peltonen S., Känkänen H. ja Peltonen-Sainio P. Maanpeitekasvien valinta. Tietokortti Luonnonvarakeskus 2023. <https://jukuri.luke.fi/server/api/core/bitstreams/81bcace8-ed0d-4f18-b479-6b783bfa03b1/content>, 20.10.2025
- [Polttoaineluokitus] Tilastokeskus, polttoaineluokitus. <https://stat.fi/fi/tilastot/tietoa-teemoittain/kasvihuonekaasuinventaario/polttoaineluokitus>, 17.2.2026
- [Sadetta ja poutaa] Sadetta ja poutaa, Ilmatieteen laitos. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/sade>, 20.10.2025
- [Srivastava et al 1993] Srivastava A.K., Goering C.E. & Rohrbach R.P. Engineering Principles of Agricultural Machinery. ASAE Textbook Number 6. American Society of Agricultural Engineers, 1993. s. 183 - 192.

- [Säilörehun säilöntäopas] Säilörehun säilöntäopas, Tuottava nautatilan nurmi - hanke, https://www.atriatuottajat.fi/globalassets/alkutuotanto/hankkeet/atriatuottajat_sailorehun_sailontaopas_b5_highres.pdf, 27.1.2026
- [Tamm 2009] Tamm K.. The dependence on the structure of machinery and the locality of plots on cereal farm work activities. Institute of Technology, Eesti Maaülikool, Estonian University of Life Sciences. 2009
- [Terminen kasvukausi] Terminen kasvukausi, Ilmatiteen laitos, <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/terminen-kasvukausi>, 9.1.2026
- [Tila-Artturi] TilaArtturi-hanke. <https://portal.mtt.fi/portal/page/portal/Artturi/Artturikirjasto/TilaArtturi-hanke>. 8.12.2014
- [Toro ja Hansson 2004a] Toro de A. & Hansson P.-A. Machinery Co-operatives - a Case Study in Sweden. *Biosystems Engineering* (2004) 87 (1), 13—25
- [Toro ja Hansson 2004b] Toro de A. ja Hansson P.-A. Analysis of field machinery performance... *Agricultural Systems* 79 (2004)
- [Ypadhyaya 2009] Upadhyaya S., Andrade-Sanchez P., Sakai K., Chancellor W., Godwin R. Soil Tillage, *Advances in Soil Dynamics Vol. 3, Chapter 3*, s. 273 - 359. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2009
- [Viralliset lajikekokeet] Viralliset lajikekokeet mittaavat lajikkeiden viljelyvarmuutta, Luke. <https://www.luke.fi/fi/luonnonvaratieto/tiedetta-jatietoa/viralliset-lajikekokeet/viralliset-lajikekokeet-mittaavat-lajikkeiden-viljelyvarmuutta#tulokset-kaikkien-hyodynnettavissa>, 9.1.2026
- [Äijö ym(2016)] Paasonen-Kivekäs M., Peltomaa R., Vakkilainen P. ja Äijö H. Maan vesi- ja ravinnetalous, Ojitus, kastelu ja ympäristö. *Salaojayhdistys ry, 2. täydennetty painos, 2016*. https://www.salaojayhdistys.fi/wp-content/uploads/2022/05/web_maanvesijaravinnetalous_B5_2016.pdf, 18.10.2025