

**TOISTUVAN LANNOITUKSEN
KANNATTAVUUS ETELÄ-SUOMEN
KIVENNÄISMAILLA**

Profitability of repeated fertilization on mineral soils
in southern Finland

Olavi Laakkonen

**TOISTUVAN LANNOITUKSEN KANNATTAVUUS
ETELÄ-SUOMEN KIVENNÄISMAILLA**

Profitability of repeated fertilization on mineral
soils in southern Finland

Olavi Laakkonen

*Esitetään Helsingin yliopiston maatalous-metsätieteellisen tiedekunnan suostumuk-
sella julkisesti tarkastettavaksi keskiviikkona 22. kesäkuuta 1994 klo 12 yliopiston
päärakennuksen luentosalissa XII, Unioninkatu 34, Helsinki*

Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 498
The Finnish Forest Research Institute. Research Papers 498

1994

METSÄNTUTKIMUSLAITOS
Kirjasto

Laakkonen, O. 1994. Toistuvan lannoituksen kannattavuus Etelä-Suomen kivennäismailla. Summary: Profitability of repeated fertilization on mineral soils in southern Finland. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 498. Finnish Forest Research Institute. Research Papers 498. 112 s. ISBN 951-40-1363-8, ISSN 0358-4283.

Tutkimuksessa selvitettiin toistuvan lannoituksen kannattavuutta Etelä-Suomen kangasmailla. Laskelmia tehtiin sekä metsikkö- että metsälötasolla.

Tutkimuksessa kannattavuutta puntaroiitiin kolmella mittarilla: nimellisellä sisäisellä korolla, nykyarvolla ja ns. kustannuskertoimella, joka ilmoittaa paljonko toistuvilla lannoituksilla aikaansaatu lisäkuutiometri maksaa. Kannattavuuslaskelmia varten selvitettiin investoinnin tulot- ja kustannukset.

Kasvua ja lannoituksen aiheuttamaa lisäkasvua samaten kuin puutavaralajien osuuksien muutosta ja puuston järeytymistä laskettaessa käytettiin matemaattisia malleja. Metsiköt olivat ensilannoitushetkellä 30–90 vuotiaita. Malleihin liittyvä riski otettiin huomioon laskelmissa. Lannoituksia suoritettiin 2–4 kertaa tasaisin välein siten, että viimeinen lannoitus tapahtui 12 vuoden kuluttua ensilannoituksesta. Lannoitteina käytettiin ureaa, oulunsalpietaria ja metsän PK-lannosta. Lannoituksissa kerta-annos vaihteli 80 ja 240 kg N/ha välillä eli reilusti nykysuositusten kummankin puolen.

Metsälötasoisia laskelmia varten kehitettiin lineaarisesta mallista lähtien riskirajoitteinen ohjelmointimalli. Mallissa voidaan ottaa huomioon päätöksentekijän riskikäyttäytyminen. Mallin tavoitteena on toistuvilla lannoituksilla aikaansaadun metsälön eri metsiköiden lannoitetuilla pinta-aloilla painotetun keskimääräisen sisäisen koron maksimointi. Rajoituksina mallissa on lannoituksiin käytettävä markkamäärä ja kestävien hakkumahdollisuuksien säilyminen tulevaisuudessa. Mallin kertoimet ovat normaalisti jakautuneita satunnaismuuttujia.

Metsikkötasolla suoritettujen laskelmien perusteella lannoitusten lukumäärällä ei ole kovinkaan suurta merkitystä kannattavuuteen. Paras kannattavuus saavutettiin yleensä 3 tai 4 kertaa lannoitettaessa. Sen sijaan lannoitettavan metsikön ikä on ratkaiseva tekijä. Parhaita lannoituskohteita ovat 45–65 -vuotiaat männiköt, joissa kasvupaikasta riippuen saadaan 22–41 % nimellinen sisäinen korko ja nykyarvo kohoaa 9 000–13 000 mk/ha. Kuusikot ovat yleensä heikompia lannoituskohteita, eikä niissä aina päästy positiivisiin korkoihin eikä nykyarvoihin varsinkaan parhailta kasvupaikoilla. Oletettu 30 %:n suuruinen metsänparannusrahoitus nostaa sisäistä korkoa n. 5–10 prosenttiyksikköä ja nykyarvoja 1 000–2 000 mk/ha. Lannoitteena tulisi männiköissä suosia ureaa ja kuusikoissa yleensä oulunsalpietaria ja ureaa. Sopiva kerta-annos on männiköissä hieman nykysuosituksia suurempi 150–200 kg N/ha ja kuusikoissa taas nykysuosituksia pienempi 100–120 kg N/ha.

Metsälötasolla asiaa tarkasteltaessa parhaita lannoituskohteita ovat mustikkatyyppin kasvatusmänniköt.

Avainsanat: toistuva lannoitus, kannattavuus, riski

Julkaisija: Metsäntutkimuslaitos. Hyväksynyt: Aarne Reunala, tutkimusjohtaja 18.5.1994.

Kirjoittajan yhteystiedot: Olavi Laakkonen, Innalantie 6 A 3, 37650, Valkeakoski.

Julkaisun myynti: Metsäntutkimuslaitos, Unioninkatu 40 A, 00170 Helsinki. Puhelin (90) 857 051, Fax (90) 625 308.

Hakapaino Oy, Helsinki 1994

Sisällysluettelo

Esipuhe	4
1 Johdanto	5
2 Tutkimuksen tavoitteet	8
3 Kannattavuuslaskelmat	9
3.1 Kannattavuustunnukset ja niiden laskenta	9
3.2 Laskelmissa käytettävä korkoprosentti	13
4 Laskentamenetelmät ja aineisto	15
4.1 Hakkuuarvot	15
4.2 Harvennukset	24
4.3 Lannoitukset	24
4.4 Lannoituskustannukset	25
5 Tuotot ja kustannukset	27
5.1 Yleistä	27
5.2 Aikasarjat	27
5.3 Tuottojen ja kustannusten laskenta	42
6 Metsälötason laskelmat	59
6.1 Lineaarinen ohjelmointimalli	59
6.2 Kertoimiin sisältyvä riski	61
6.3 Hinnoista ja kustannuksista aiheutuva riski	63
6.4 Kasvunlisäyksen vaihtelusta aiheutuva riski	63
6.5 Riskirajoitteinen malli	63
7 Tulokset	67
7.1 Kannattavuus metsikkötasolla	67
7.1.1 Lannoitusten lukumäärä	67
7.1.2 Lannoitettavan metsikön ikä	68
7.1.3 Lannoitemäärä	69
7.1.4 Lannoitelaji	82
7.1.5 Lisäkuutiometrin hinta	83
7.1.6 Erotuskannattavuus	83
7.2 Kannattavuus metsälötasolla	83
8 Yhteenveto	106
9 Summary / Conclusion	108
Kirjallisuus	110

Esipuhe

Tämä on eräs oikeista mahdollisuuksista kiittää Jumalaa, vaimoani Eeva-Liisaa ja poikaani Hannua, jotka kaikki ovat ratkaisevasti myötävaikuttaneet tämän työn syntymiseen. Ilman heidän tukeaan tehtävä olisi minulle ollut mahdoton saattaa loppuun.

Työtä on ohjannut prof. Matti Keltikangas, joka sen kaikissa vaiheissa on antanut suuresti arvostamaani apua niin tiedemiehenä kuin ihmisenä.

Työ kuuluu osana Metsäntutkimuslaitoksen metsätalouden liiketieteen tutkimussuunnan tutkimusohjelmaan. Tiedekunnan määrääminä virallisina ennakkotarkastajina ovat olleet dos. Kari Mielikäinen ja dos. Seppo Vehkamäki, jotka ovat tehneet käsikirjoitukseen monia varteenotettuja parannusehdotuksia.

Tarvittavista tietokonesovellutuksista on vastannut Ilpo Mäkinen. Haluan tässä yhteydessä antaa hänelle parhaat kiitokseni erinomaisesti suoritetusta työstä. Työn eri vaiheissa olen saanut monenlaista sekä tieteellistä että henkistä tukea mm. prof. Jouko Hämmäläiseltä, edesmenneeltä prof. Pekka Kilkiltä, MH Mikko Kukkotalta, prof. Eino Mälköselältä ja prof. Simo Posolta. Käsikirjoituksen saattoi lopulliseen ulkoasuunsa Hannu Pelkonen.

Taloudellisesti työtä ovat tukeneet Suomen Luonnonvarain Tutkimussäätiö, Metsämiesten Säätiö, Jenny & Antti Wihurin Rahasto, Niemen Säätiö, Kemira Oy ja Tehdaspuu Oy.

Myös useimmat aikaisemmat työnantajani mm. Labsystems Oy ja BTF Oy ovat suhtautuneet asiaan positiivisesti.

Olavi Laakkonen

1 Johdanto

Lannoitus on Suomessa eräs metsänparannuksen peruskeinoista. Sitä on harrastettu vuosikymmenet. Sen taloudellisuutta on perusteltu lähinnä päätehakkuukää lähentelevistä tai jo päätehakkuuiän saavuttaneista metsikoistä kertalannoituksilla saaduilla hyvillä kannattavuuksilla tai suhteellisen suurilla lisäkuutiometri määrillä.

Toistuvia lannoituksia ei metsikkö- saati sitten metsälötasolla ole Suomessa tutkittu kovinkaan paljon (kts. Puro 1977, Kukkola & Saramäki 1983, Hämäläinen ym. 1989, Laakkonen 1989). Toistuvan lannoituksen edullisuutta on tutkittu vieläkin vähemmän. Syykin on selvä: on puuttunut sopiva empiirinen aineisto tällaisen tutkimuksen tekemiseen. Tämä puute on nyt poistunut ja saatavilla on riittävästi empiiristä aineistoa, jonka perusteella voidaan tehdä tilastollisesti merkitseviä johtopäätöksiä.

Edellä mainittua taloudellista tutkimustietoa on ollut saatavilla lähinnä vain päätehakkuikäisten tai päätehakkuukää lähestyvien metsiköiden osalta. Tällöin myös päätöksentekotilanne on toisenlainen kuin mitä se on toistuvien lannoitusten ja vieläpä nuorempien kasvatusmetsien kohdalla. Lisäksi päätehakkuikäisten metsien kertalannoituksissa typpimäärä on ollut yleensä suunnilleen sama n. 120 kg N/ha, mikä alittaa nykyiset suositukset. Metsänomistajille on myös tuottanut päänvaivaa voimakkaasti vaihdellut ja monimutkainen metsänparannuslaki.

Samaan aikaan kun tutkimustuloksia on puuttunut on lannoitettu pinta-ala Suomessa pudonnut huippuvuosista 1975 muutamaan prosenttiin. Viime aikoina vuotuinen lannoitettu pinta-ala on laskenut n. 5 000 hehtaarin paikkeille (kts. taulukko 1).

Yhdeksän eteläisimmän metsälautakunnan alueella metsämaan pinta-alasta omistavat yksityiset metsänomistajat 78 %, teollisuus 12 %, valtio 7 % ja muut 3 % (Metsätalastollinen vuosikirja 1990). Puunkasvatuksessa näillä ryhmillä on erilaiset intressit. Kaikki metsänomistajat pyrkivät saamaan mahdollisimman korkean hinnan myymästään puutavarasta. Hakatessaan omia metsiään teollisuus turvaa raaka-aineen saantia ja käyttää hinnoittelussa ns. siirtohintaa. Valtiolla on myös muita velvoitteita kuin mahdollisimman korkea hinta puuta myydessään. Toisaalta yksityisetkin metsänomistajat, joita kaikkiaan on n. 300 000, ovat eri asemassa. On omistajia, jotka omistavat metsätalouden piirissä vain metsää. Heille metsä on omaisuutta, jota tarvittaessa realisoidaan yksityismenojen kattamiseen sen kummemmin tulevia hakkuumahdollisuuksia arvioimatta. Toisaalta maatilametsänomistajille metsä on paitsi omaisuutta, myös työpaikka ja usein maatalouden investointien rahoituslähde. Koska maataloudessa esiintyy jatkuvaa investointitarvetta, on maatilametsänomistajien pidettävä metsiä hakatessaan huolta kestävien hakkuumahdollisuuksien säilyttämisestä.

Metsäteollisuus pyrkii pitämään hinnat suhteellisen alhaalla kilpailukykyä säilyttämiseksi. Omistamalla metsää eli varastoimalla puuta se voi omalta osaltaan vaikuttaa puun hintakehitykseen. Toisin kuin muussa teollisuudessa metsäteollisuudelle ei ole haittaa vaikka tuo varasto olisi suurikin, koskapa epäkuranttisuusriski on hyvin pieni (esim. taudit, myrskyt).

Taulukko 1. Vuotuisen lannoitetun pinta-alan kehitys omistajaryhmittäin Suomessa.

Table 1. Development of annual fertilized area (hectars) by owner groups in Finland.

hakkuuvuosi – stumpage year	yksityiset – private	yhtiöt – com- panies	valtio – state	yhteensä – total
1978	61 555	6 303	32 705	100 563
1979	43 638	12 888	26 379	82 905
1980	44 751	25 084	17 391	87 226
1981	60 221	19 694	11 917	91 832
1982	71 362	18 821	19 575	109 758
1983	53 405	11 815	24 447	89 667
1984	38 979	17 980	22 555	79 514
1985	43 967	19 940	20 446	84 353
1986	49 578	14 564	22 519	86 661
1987	56 632	14 453	16 033	87 118
1988	51 441	12 147	15 559	79 147
1989	21 313	12 906	12 579	46 798
1990	25 358	11 075	11 222	47 655
1991	4 394	3 343	3 503	11 240
1992	1 518	454	3 054	5 026

Valtion metsät sijaitsevat pohjoisessa keskimääräistä huonommilla kasvupaikoilla, mutta ovat tärkeä tekijä teollisuuden raaka-ainetarpeen tasoittajana. Silloin kun yksityiset metsänomistajat eivät syystä tai toisesta halua myydä puuta teollisuudelle, voivat valtio ja teollisuus omilla hakkuillaan tasapainottaa puun tarjontaa ja siten turvata kansantaloutemme kannalta elintärkeän teollisuudenalan raaka-ainetarpeen (ks. taulukko 2).

Lannoitus on eräs puuntuotoksen lisäämiskeino ja yleisesti varsin kannattavana pidetty, ainakin keskimäärin. Lannoitukseen kuitenkin liittyy monia epävarmuustekijöitä. Paitsi kasvureaktion suuruus, kantohinnat ja kustannukset, myös lannoitemäärät, -lajikkeet ja toimenpiteiden ajoitus saattavat vaihdella enemmän tai vähemmän satunnaisesti. Lannoituksen kannattavuus ei siten ole etukäteen yksiarvoisesti ennustettavissa.

Taulukko 2. Kuorelliset kokonaishakkuut omistajaryhmittäin vuosina 1978/79–1989/90.

Table 2. Total cuttings with bark by different owner groups in 1978/79–1989/90.

hakkuuvuosi– cutting year	kertymä (m ³)– total cuttings (m ³)	yksityiset (%)–private (%)	yhtiöt (%)– companies (%)	valtio (%)– state(%)
1978/79	36 618	79,74	8,66	11,58
1979/80	36 236	82,21	7,11	10,67
1980/81	38 886	82,48	7,43	10,07
1981/82	42 298	81,02	8,08	10,89
1982/83	41 894	78,84	9,13	12,01
1983/84	38 200	76,45	10,98	12,56
1984/85	45 846	83,05	6,82	10,11
1985/86	39 433	82,49	6,82	10,68
1986/87	40 822	80,81	7,96	11,22
1987/88	44 056	82,26	7,06	10,67
1988/89	46 848	84,63	5,75	9,60
1989/90	46 110	84,11	6,01	9,89
1990/91	35 912	80,95	9,22	9,83

Ehkä osittain epävarmuustekijöiden vuoksi metsien lannoituksia ei ole harjoitettu laajemmalti viime aikoina. Toisaalta lannoituksia on arvosteltu tilanteessa, jossa ihmisen aiheuttama typpilaskeuma on lisääntynyt ja pelätään metsämaiden liiallista kuormittumista. Kolmanneksi puuta on ollut saatavilla muutenkin riittävästi, joskin tilanne vaihtelee ajallisesti ja paikallisesti. Lannoitus on toisaalta pitkäjänteinen investointi silloinkin kun se tehdään kertalannoituksena. Tällöin riskit helposti kasaantuvat.

Lopuksi on metsien lannoituksia perusteltaessa otettava huomioon aivan viime-aikaiset tutkimukset. Hiilen sitominen on metsien globaalisesti tärkeä kollektiivinen hyödyke (Karjalainen & Kellomäki 1992). Norjassa on tehty kiinnostava kokeilu lineaarisella tutkimusmallilla, jonka mukaan työllä lannoittaminen, taimikon hoidosta luopuminen ja kiertoaikojen pidentäminen olivat kustannustehokkaimpia toimenpiteitä hiilen nettositomisen lisäämiseksi metsässä (Hoen & Solberg 1992).

2 Tutkimuksen tavoitteet

Tässä työssä on tavoitteena selvittää toistuvien lannoitusten kannattavuus. Tarkastelu rajataan koskemaan Etelä-Suomen kivennäismaiden männiköitä ja kuusikoita eli sitä osaa maan metsistä, johon toistuvien lannoitusten tuotosvaikutuksia koskevat tutkimustulokset (Kukkola & Saramäki 1983) ovat yleistettävissä. Toistuvilla lannoituksilla tarkoitetaan tässä tutkimuksessa samaan metsikköön säännöllisin, tasaisin aikaväleihin tehtäviä lannoituksia. Eri lannoituskerroilla ei välttämättä eikä todennäköisesti käytetä samoja kasvureaktioon vaikuttavien ravinteiden lajeja eikä määriä. Toisena ja tärkeämpänä tavoitteena on kartoittaa lannoituksen taloudelliseen kannattavuuteen liittyviä riskejä ja niiden vaikutusta optimoituimenpidevalintoihin:

- mitä tulisi lannoittaa
- mitä lannoitteita kannattaisi käyttää ja millaisia määriä
- kuinka usein olisi lannoitettava.

Riskin kartoituksessa käytetään menetelmänä simulointia, jossa eri tekijöiden, kuten tippimäärien ja lannoituskertojen annetaan vaihdella, samoin lannoitettavan metsikön iän. Simuloinnin tuloksista selvitetään kannattavuuden odotusarvot ja hajonnat erilaisilla kasvupaikoilla männylle ja kuuselle. Tulokset lasketaan ikäluokittain. Optimilannoitusmäärät, -ajankohdat jne. määritetään odotusarvojen maksimeina, mutta samalla saadaan kuva ratkaisujen merkitsevyydestä.

Tarkastelut tehdään ensin metsikkötasolla ja ulotetaan sen jälkeen metsälötasolle, jossa haetaan vastausta kysymykseen: mitä metsiköitä tulisi lannoittaa ja missä järjestyksessä, kun lannoitukseen metsikkötasolla liittyvät riskit ja metsänomistajan riskikäyttäytyminen otetaan huomioon.

Tutkimuksen liiketaloudellinen näkökulma on yksittäisen metsänomistajan näkökulma: miten parhaiten käyttää hyödyksi niukat resurssit ja siten omalta kannaltaan mahdollisimman tehokkaasti ja taloudellisesti hyödyntää potentiaalinen tuotantokoneistonsa.

Tähänastisissa tutkimuksissa ei näytä riittävästi paneudutun lannoitukseen liittyviin riskeihin. Tässä tutkimuksessa pyritään tätä puutetta poistamaan.

3 Kannattavuuslaskelmat

3.1 Kannattavuustunnukset ja niiden laskenta

Tässä tutkimuksessa toistuvan lannoituksen kannattavuutta mitattiin nimellisellä sisäisellä korolla ja nykyarvolla. Toistuvan lannoituksen erilliskannattavuutta laskettaessa otettiin huomioon lannoituskustannukset, lannoitetun ja lannoittamattoman metsikön harvennustulot sekä loppupuustojen hakkuuarvojen erotus. Näistä tekijöistä muodostettiin tulo-menosarjat, joissa tuloina olivat lannoitetun metsikön harvennustulot ja loppupuustojen erotus, mikäli tämä oli positiivinen, sekä menoina lannoituskustannukset, lannoittamattoman metsikön harvennustulot ja loppupuustojen hakkuuarvojen erotus, mikäli tämä oli negatiivinen. Kokonaiskannattavuutta laskettaessa määriteltiin sisäinen korko ja nykyarvo erikseen sekä lannoitetulle että lannoittamattomalle metsikölle. Erotuskannattavuus laskettiin tämän jälkeen näin saatujen sisäisten korkojen erotuksina ja nykyarvojen erotuksina. On huomattava, että kannattavuustunnukset sisältävät inflaation. Näin etenkin kun tutkimustuloksia vertaillaan muihin tutkimuksiin, joissa laskelmat on suoritettu reaalisilla tunnuksilla.

Harvennukset suoritettiin laskelmissa Vuokilan ja Väliahon harvennusmallien mukaisesti. Näin siis lannoituksista aiheutunut taloudellinen hyöty saatiin lannoitetun metsikön varhaisempina harvennustuloina ja osaksi myös hieman suurempina harvennustuloina. Vaihtoehtoisesti metsiköt olisi voitu harventaa samanaikaisesti. Tällöin lannoituksista aiheutuva taloudellinen hyöty olisi saatu lähinnä suurempina harvennustuloina. Lannoitetun ja lannoittamattoman metsikön hakkuupoistumat hinnoiteltiin erikseen. Myös loppupuustot hinnoiteltiin erikseen. Missään laskennan vaiheessa ei käytetty hypoteettisia lannoitetun ja lannoittamattoman metsikön erotuspustoja eikä erotuspoistumia. Toisin sanoen missään vaiheessa ei laskettu ensin lannoituksen aiheuttamaa lisäkasvua ja vasta tämän jälkeen yritetty jakaa sitä puuta-varalajeihin.

Harvennustulot ovat realisoitavissa tutkimuksessa menetellyllä tavalla, koska tutkimuksessa sovelletut harvennusmallit ovat lähellä nykysuosituksia. Tutkimuksessa käytetyt harvennusmallit on toki kehitetty viljeltyjä havumetsiköitä kuvaavien kehityssarjojen perusteella eikä tässä tutkimuksessa ollut mahdollisuutta lähteä laajemmin selvittämään, kuinka hyvin ne sopivat lannoitetuille metsiköille tai luonnonmetsiköille. Samoin on realisoinnin suhteen asianlaita loppupuustojen osalta hakkuukypsyuden saavuttaneissa ja sitä lähenevissä metsiköissä. Lähtöpuuston ollessa 25–55-vuotias, tutkimuksessa oletetaan, että lannoitettua metsikköä voidaan tutkimusjakson lopussa harventaa niin paljon, että harvennustulona saadaan lannoitetun ja lannoittamattoman metsikön hakkuuarvojen erotus tutkimusjakson lopussa. Toinen mahdollisuus on realisoida kasvunlisäystä vastaava hakkuuarvo tutkimusjakson lopussa metsänomistajan muista metsiköistä vastaisten harvennustulojen odotusarvon siitä pieneneväksi. Tällöin tarkastellaan asiaa metsänomistajan koko metsätalouden harjoittamisen kannalta.

Tuottojen ja kustannusten nimellisten odotusarvojen oletettiin noudattavan luvussa 5 esitettyjä trendiarvojaan ja hajontojen vastaavasti t-jakaumiaan. Tutkimusjakson pituudeksi eli toistuvan investoinnin pitoajaksi valittiin 18 vuotta ensinnäkin siksi, että vertailut eri metsiköiden toistuvan lannoituksen edullisuudesta olisivat helpompia ja toiseksi siksi, että kannattavuus keskimäärin on korkeimmillaan tällä pitoajalla. Kolmas syy oli se, etteivät laskelmien perustana olevat

kasvunlisäysmallit oikeuta juuri pidempiin tarkasteluihin. Jos investoinnin pitoaika vaihtelisi ikäluokan ja/tai boniteetin ja/tai pääpuulajin mukaan, olisi silloin tehtävä oletus, että lyhyempien investointien tuotot voidaan sijoittaa edelleen pisimmän pitoajan mukaiseen korkokantaan.

Matemaattisena yhteenvetona voidaan todeta, että sisäiset korot (i) ratkaistiin alla olevista yhtälöistä:

$$f(h, l, H, i) =$$

$$-\sum_{k=0}^m l^k \left(\frac{1}{1+i} \right)^k + \sum_{k=0}^{n-1} (h_k - h_k^0) \left(\frac{1}{1+i} \right)^k + (H - H^0) \left(\frac{1}{1+i} \right)^n = 0$$

- missä h_k = lannoitetun metsikön harvennustulo k vuotta ensilannoituksen jälkeen (mk/ha)
 = *harvesting incomes of fertilized stand after k years of the first fertilization (FIM/ha)*
- h_k^0 = lannoittamattoman metsikön harvennustulo k vuotta ensilannoituksen jälkeen (mk/ha)
 = *harvesting incomes of unfertilized stand after k years of the first fertilization (FIM/ha)*
- l_k = lannoituskustannus vuonna k (mk/ha, $l_0 > 0$)
 = *fertilization costs in the year k (FIM/ha, $l_0 > 0$)*
- H = lannoitetun metsikön kantoraha-arvo tutkimusjakson lopussa (mk/ha)
 = *stumpage value of fertilized stand at the end of the study period (FIM/ha)*
- H^0 = lannoittamattoman metsikön kantoraha-arvo tutkimusjakson lopussa (mk/ha)
 = *stumpage value of unfertilized stand at the end of the study period (FIM/ha)*
- i = sisäinen korkokanta (%)
 = *internal rate of return (%)*
- n = tutkimusjakson pituus vuosissa
 = *length of study period in years*
- m = vuosi, jolloin viimeinen lannoitus voidaan suorittaa tutkimusjakson alusta lukien (tässä tutkimuksessa $m=12$)

= the year when the last fertilization can be done (in this study $m = 12$)

ja nettonykyarvot laskettiin seuraavasta kaavasta:

$$f(h, l, H, i) = \text{NPV.}$$

Yllä olevat laskentakaavat pätevät silloin, kun toistuvaa lannoitusta tarkastellaan erillisinvestointina. Silloin kun toistuvaa lannoitusta tarkastellaan erotusinvestointina eli otetaan huomioon myös metsävero aiemmassa muodossaan ja alkupuuston pääoma-arvo, saadaan kannattavuustunnukset merkitsemällä ensin:

$$f_i(h, l, H, t, i) =$$

$$\sum_{k=0}^{n-1} h^k \left(\frac{1}{1+i} \right)^k - \sum_{k=0}^n (l_k + t_k) \left(\frac{i}{1+i} \right)^k - H_0 + H \left(\frac{1}{1+i} \right)^n$$

$$f_0(h, H, t, i) =$$

$$\sum_{k=0}^{n-1} h_k^0 \left(\frac{1}{1+i} \right)^k - \sum_{k=0}^n t_k \left(\frac{i}{1+i} \right)^k - H_0^0 + H^0 \left(\frac{1}{1+i} \right)^n$$

- missä t_k = metsävero vuonna k (mk/ha, kts. luku 4)
 = *taxes of forestland during year k (FIM/ha, see chapter 4)*
- H_0 = lannoitetun metsikön kantoraha-arvo tutkimusjakson alussa (mk/ha)
 = *stumpage value of fertilized stand at the beginning of the study period (FIM/ha)*
- H_0^0 = lannoittamattoman metsikön kantoraha-arvo tutkimusjakson alussa (mk/ha)
 = *stumpage value of unfertilized stand at the beginning of the study period (FIM/ha)*

(huomaa, että $H_0 = H_0^0$)

ja kun edelleen merkitään:

- i_1 = ratkaisu i yhtälöstä $f_i(h, l, H, t, i) = 0$
 = *the solution of i from $f_i(h, l, H, t, i) = 0$*
- i_0 = ratkaisu i yhtälöstä $f_0(h, H, t, i) = 0$

$$= \text{the solution of } i \text{ from } f_0(h, H, t, i) = 0$$

niin lopulta saadaan erotuskannattavuuden sisäinen korko ja nykyarvo seuraavasti:

$$i_1 - i_0 = \text{sisäisten korkojen erotus, jota tässä tutkimuksessa on käytetty}$$

$$\text{erotusinvestoinnin kannattavuuden mittarina ja joka siis on eri}$$

$$\text{kuin ratkaisu yhtälöstä } f_1 - f_0 = 0.$$

$$= \text{difference of internal rates of return, which is considered as a}$$

$$\text{profitability factor of difference investment in this study}$$

$$f_1(h, l, H, t, i) - f_0(h, H, t, i) = \text{erotusinvestoinnin nykyarvo, (} i = 0 \%, 5 \%, \text{ ja } 9 \%, \text{ tässä}$$

$$\text{tutkimuksessa).}$$

$$= \text{net present value of difference investment (} i = 0 \%, 5 \%,$$

$$\text{and } 9 \%, \text{ in this study)}$$

Näin menetellen aineiston pohjalta lasketuista kannattavuustunnuksista on esitetty esimerkkejä graafisesti kuvissa 11–17. Aineistoon sovitettiin myös kannattavuutta, tässä tapauksessa sisäistä korkoa kuvaavat funktiot. Samaten laskettiin ko. funktiot myös luotettavuusväleille. Esimerkkejä odotusarvoista ja luotettavuusväleistä neljännen asteen polynomeina on matemaattisesti esitetty taulukoissa 23–27. Polynomien käyttöön päädyttiin lähinnä kokeellisesti. Polynomit ovat muotoa

$$y = A + Bx + Cx^2 + Dx^3 + Ex^4$$

y on selitettävä muuttuja eli nimellinen sisäinen korkoprosentti ja x selittävä muuttuja. A, B, C, D, ja E ovat kertoimia, jotka on estimoitu kannattavuutta kuvaavien sisäisten nimellisten korkojen perusteella ja ne on esitetty taulukoissa 23–27.

Eräänä erilliskannattavuuden mittarina käytettiin eräänlaista kustannuskerrointa (vrt. Keltikangas 1973), jolla tässä tutkimuksessa tarkoitetaan lannoituskustannusten suhdetta lannoituksella saatuun lisäkasvuun. Tämä suhdeluku ei siis ole hyötykerroin vaan kustannuskerroin, joka ilmoittaa paljonko lannoituksilla aikaansaatu lisäkuutiometri nimellisesti maksaa (mk/ha). Mitä pienempi kerroin on, sitä parempi on kannattavuus muihin tarkastelun kohteena oleviin investointeihin nähden. Näitä vertailuja tehtäessä on otettava huomioon tosiasia, että lannoituksilla tuotetun lisäkuutiometrin rakenne eli sen puutavaralajien keskimääräinen suhde vaihtelee paitsi lannoitusten lukumäärän ja kertalannoittemäärän mukaan myös sekä ikäluokittain että boniteettiluokittain. Kustannuskerroin on havainnollinen tapa kertoa kannattavuudesta.

Kustannuskertoimia laskettaessa meneteltiin siten, että eri lannoituskertojen kustannukset laskettiin tutkimusjakson alkuajankohtaan diskontattuina yhteen. Laskentakorkokantoina käytettiin 0 %, 5 % ja 9 %. Tuotospuolelle laskettiin lannoitetun ja vastaavan lannoittamattoman metsikön harvennuspoistumien ja loppupuustojen tilavuuksien erotus. Kustannuskerroin on esitettävissä matemaattisesti seuraavasti:

$$pc = \frac{\sum_k l_k (1/(1+i))^k}{\sum_k (V_k^0 - V_k^l) (1/(1+i))^k - (V_o - V_l) (1/(1+i))^n}$$

missä l_k = lannoituskustannus vuonna k (mk)

where = fertilization costs during the year k (FIM)

v_k^0 = lannoittamattomasta metsiköstä vuonna k harvennettu määrä (m^3/ha)
= harvested volume from unfertilized stand during the year k (m^3/ha)

v_k^1 = lannoitetusta metsiköstä vuonna k harvennettu määrä (m^3/ha)
= harvested volume from fertilized stand during the year k (m^3/ha)

V_0 = lannoittamattoman metsikön tilavuus (m^3/ha) tutkimusjakson lopussa
= volume of unfertilized stand (m^3/ha) at the end of the investigated period

V_1 = lannoitetun metsikön tilavuus (m^3/ha) tutkimusjakson lopussa
= volume of fertilized stand (m^3/ha) at the end of the investigated period

i = laskentakorkokanta
= rate of return

Vertailujen helpottamiseksi on laskettu myös lisäkuutiometrin rakenteen muutos. Laskentatavasta aiheutuen kuitupuun osuus näissä puutarvalajien muutosta kuvaavissa suhdeluvuissa voi olla negatiivinen ja tukkipuun osuus yli 100 %. Hukkapuu on myös otettu huomioon.

3.2 Laskelmissa käytettävä korkoprosentti

Investointilaskelmia tehtäessä ei välttämättä tarvita laskentakorkoa lainkaan. Tuotot ja kustannukset voidaan laskea ja esittää sellaisinaan. Ne ovat investoinnin olennaisimmat osat ja kertovat investoinnin vaikutuksista jo itsessään. Kun ryhdytään vertailemaan mahdollisia investointivaihtoehtoja keskenään, tarvitaan kuitenkin jonkinlainen menetelmä investointien erilaisten pitoaikojen sekä investointien kustannusten ja tuottojen eriaikaisuuden eliminoimiseksi. Sekä investoinnin sisäisen koron että nykyarvon laskeminen perustuvat eriaikaisten tuottojen ja kustannusten muuntamiseen yhteismitallisiksi diskonttaamalla ne saman ajankohdan arvoiksi. Edellisessä tapauksessa haetaan korkokantaa, jolla diskonttatut tuottojen ja kustannusten nykyarvot muodostuvat yhtä suuriksi, jälkimmäisessä tuotot ja kustan-

nukset diskontataan samaa vakiolaskentakorkoa käyttäen ja sitten tehdään päätelmät erotusten perusteella (ks. esim. Honko 1966). Tarkasteluajan pituus on myös oleellinen tekijä, kun pyritään vertailemaan eri investointien keskinäistä kannattavuutta. Suomalaisessa metsätalouden liiketieteen tutkimuksessa kumpaakin osatekijää, sekä aikaa (Keltikangas 1973) että laskentakorkokantaa (Hämäläinen 1973) on käsitelty laajasti. Myös yleisessä investointiteoriassa ne ovat olleet keskeisiä kysymyksiä (esim. Fisher 1930, Hirshleifer 1970).

Ryhtymättä tässä enemmälti analysoimaan mainittuja ongelmia todettakoon lyhyesti,

1) että tässä tutkimuksessa katsottiin käytetty 18 vuoden laskentajakso sopivan lyhyeksi niin, että kaikki relevantit vaikutukset voidaan ilmaista metsänomistajien vallitsevan aikahorisontin sisällä;

2) että sisäinen korkokanta on sellaisenaan riittävän validi kannattavuustunnus, milloin vertailtavien vaihtoehtojen aikajänteet ovat samannumeraaliset;

3) että nykyarvolaskelmissa käytetään rinnan kolmea eri korkokantaa, 0 %, 5 % ja 9 %, jolloin saadaan kartoitettua korkoprosentin mahdollista vaikutusta investointivaihtoehtojen keskinäiseen kannattavuusjärjestykseen; ja

4) että muutoin jätetään metsänomistajan subjektiivinen tilanne ja sen vaikutus aikapreferenssiin ja vaihtoehtoiskustannusten kautta laskentakorkoprosenttiin tässä yhteydessä sivuun. Viime mainitut seikat joudutaan luonnollisesti ottamaan aina huomioon tuloksia käytäntöön sovellettaessa.

Korkoprosentin suuruutta arvioitaessa on otettava huomioon, että ne tässä tutkimuksessa tarkoittavat nimellistä, eivät reaalista korkoa. Tällä on merkitystä lannoituksen kannattavuuden odotusarvoja aikaisempiin tutkimustuloksiin verrattaessa. Tutkimuksen keskeisen ongelman, laskelmiin sisältyvän riskin kartoittamisen kannalta sen sijaan on vähemmän merkitystä sillä, mitä kannattavuuskriteeriä tai laskentakorkokantaa käytetään.

4 Laskentamenetelmät ja aineisto

4.1 Hakkuuarvot

Metsikön kasvu ilman lannoitusta arvioitiin kasvumallien (Kukkola ja Saramäki 1983) avulla ja lannoituksen tähän kasvuun aiheuttama lisäkasvu kasvunlisäysmallien (Kukkola ja Saramäki 1983) avulla. Lannoitetun metsikön kasvu jakaantuu näin kahteen komponenttiin: varsinaiseen kasvuun ja lannoituksista aiheutuneeseen lisäkasvuun.

Tutkimusaineistossa oli 145 kappaletta lannoitettuja männikkökoealoja ja vastaavia kontrollikoealoja 141 kappaletta. Kuusikokeiden osalta vastaavat luvut olivat 46 ja 44. Kokeet ovat ns. faktorikokeita, joissa on joko 8 tai 16 ruutua. Koealat olivat kooltaan 30 mx30 m eli 900 m².

Keskimääräinen toistuvan lannoituksen aiheuttama kasvunlisäys koko jaksolla oli männiköissä valtapituuksien 18, 24 ja 27 mukaisilla kasvupaikkatyypeillä 43, 50 ja 43 m³/ha ja hajonta vastaavasti 10,8 12,7 ja 10,3 m³. Kuusikoiden kasvupaikkatyypeillä 24 ja 27 kasvunlisäykset olivat 39 ja 28 m³ ja hajonnat vastaavasti 8,5 ja 7,3 m³.

Kasvu- ja kasvunlisäysmallien tarvitsema tieto valtapituudesta arvioitiin Vuokilan ja Väliahon (1980) esittämällä valtapituuden kasvumalleilla.

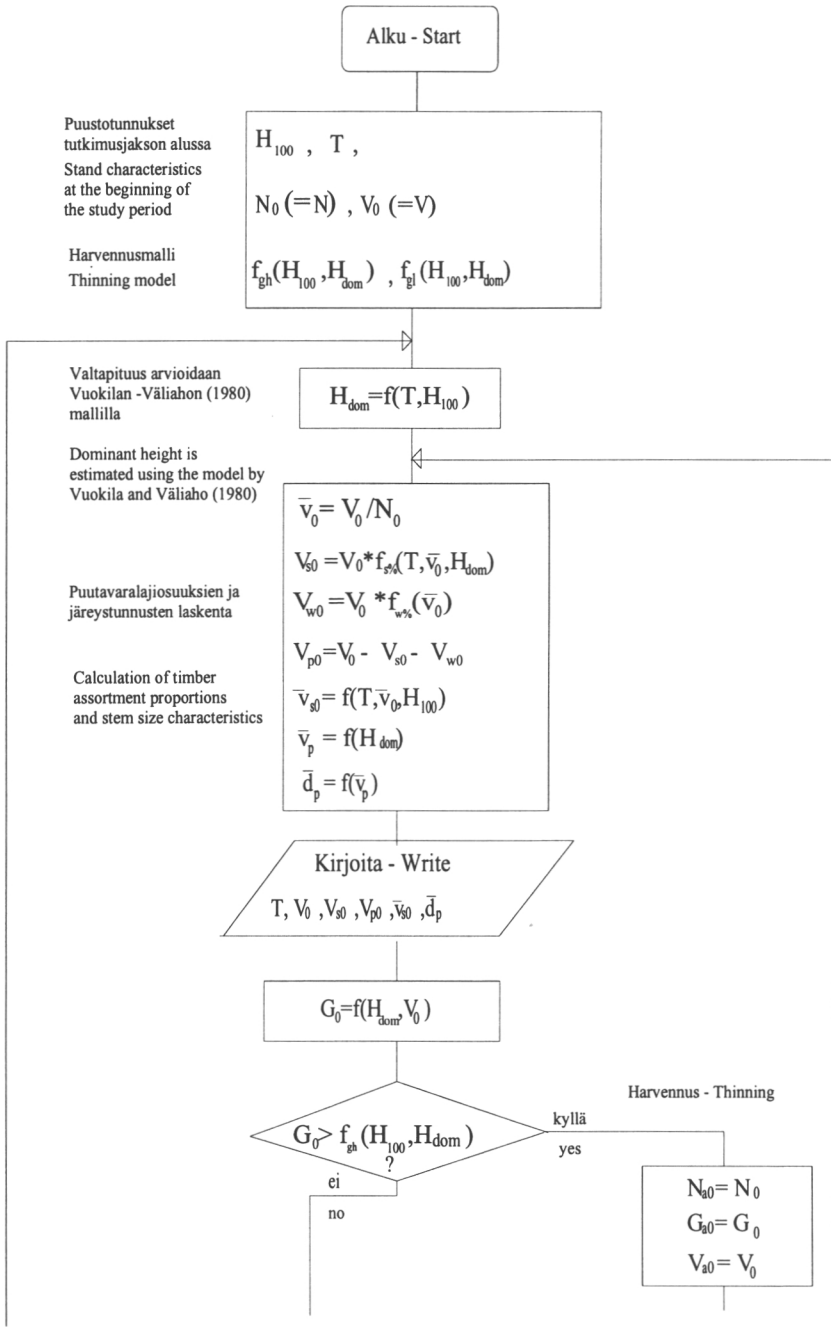
Metsikön järeystunnukset arvioitiin malleilla, jotka on esitetty alunperin julkaisussa (Hämäläinen ym. 1989) ja ne on esitetty selvyuden vuoksi myös tässä julkaisussa. Malleilla ennustetaan tukkipuun ja hukkapuun osuutta runkotilavuudesta, tukkirunkojen ja kuiturunkojen käyttöosan keskitilavuutta sekä kuiturunkojen keskiläpimittaa. Tukkipuun osuutta ja tukkirunkojen käyttöosan keskitilavuutta kuvaavat mallit ovat muodoltaan samat kuin Vuokilan ja Väliahon (1980) esittämät tukki- osuus- ja tukkirunkojen keskitilavuusmallit, mutta mallien parametrit on kuitenkin arvioitu Kukkolan ja Saramäen (1983) tutkimuksen aineiston perusteella.

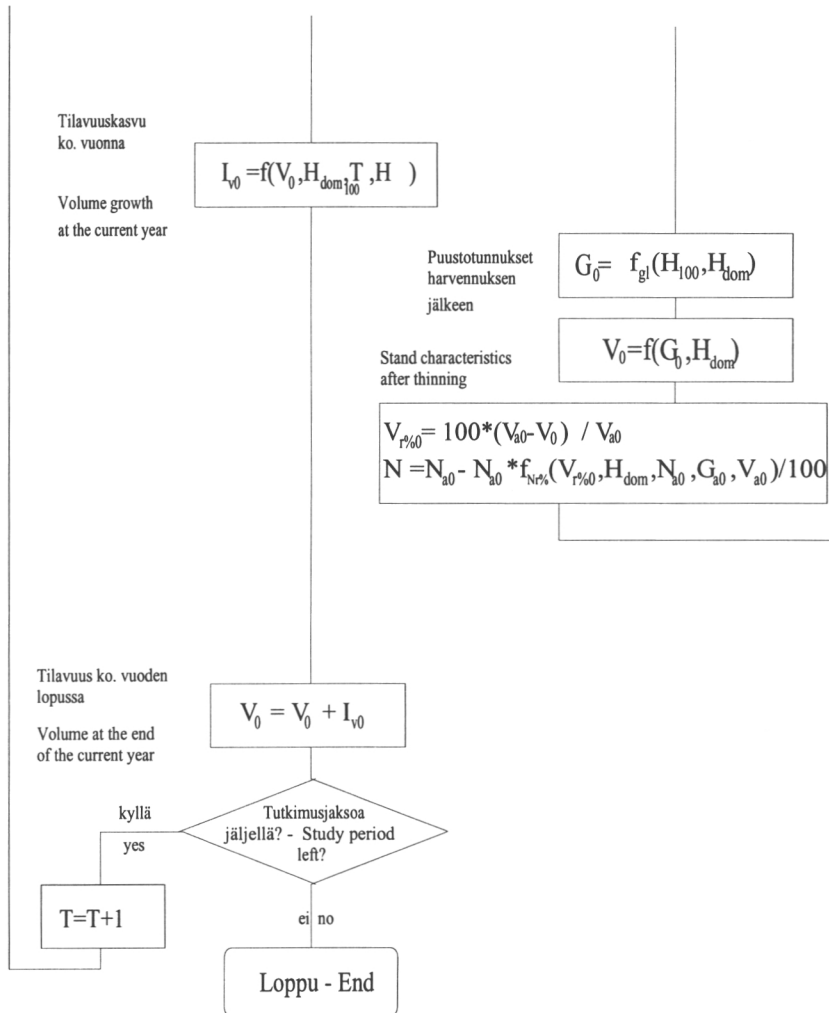
Pienimmän neliösumman menetelmästä on kuvaus luvussa 5. Laskennan kulku on esitetty kuvissa 1 ja 2.

Metsikkötunnukset laskettiin Metsäntutkimuslaitoksen koealojen peruslaskentaohjelmalla KPL (Heinonen 1981). Tukkipuun määrää laskettaessa oli kutakin tukin pituutta vastaava minimiläpimitta seuraava:

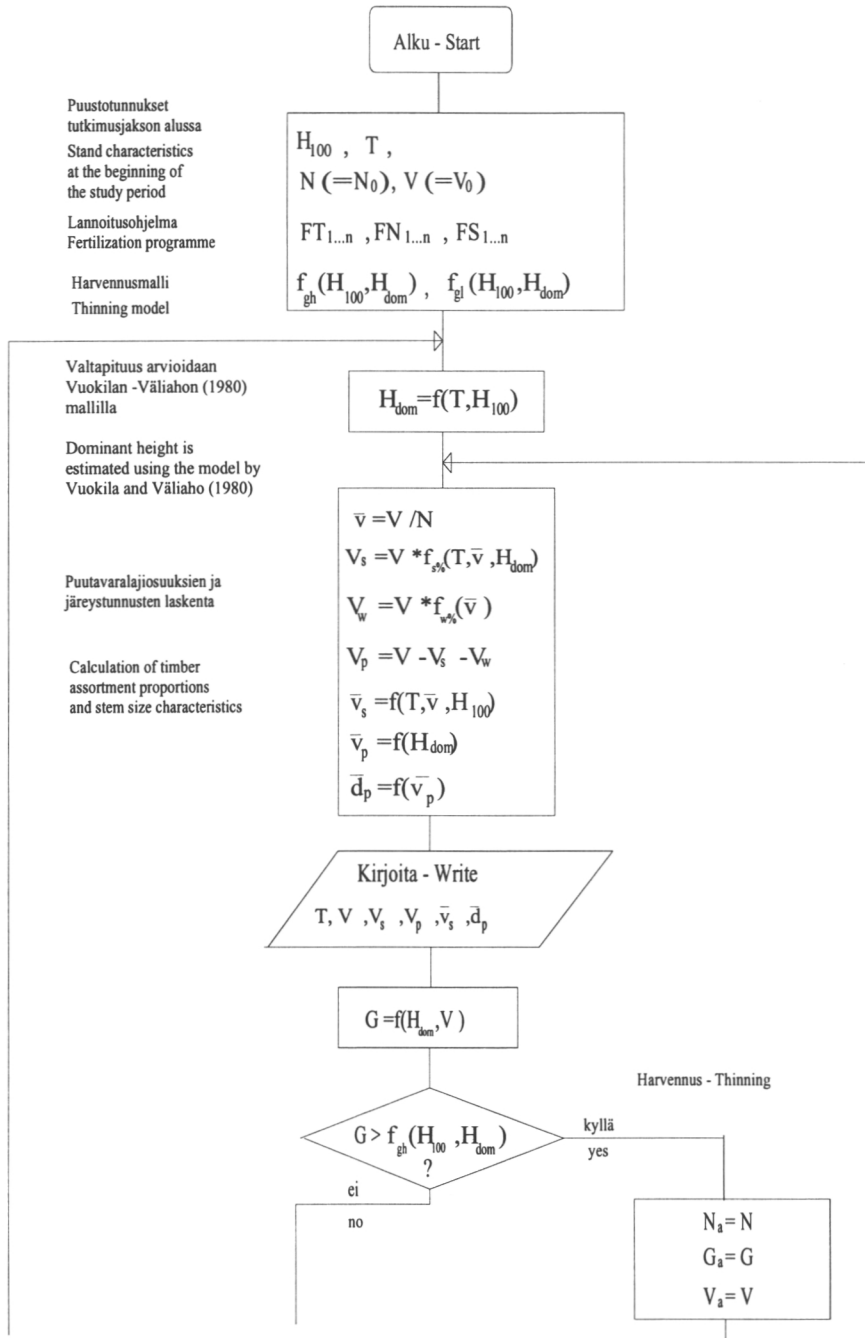
Tukin pituus, m	Tukin kuorellinen latvaläpimitta, cm	
	mänty	kuusi
3,1	20,5	
3,4	18,5	
3,7	18,5	19,5
4,0	16,5	17,5
4,3	14,5	16,5
4,6–6,1	14,5	16,5

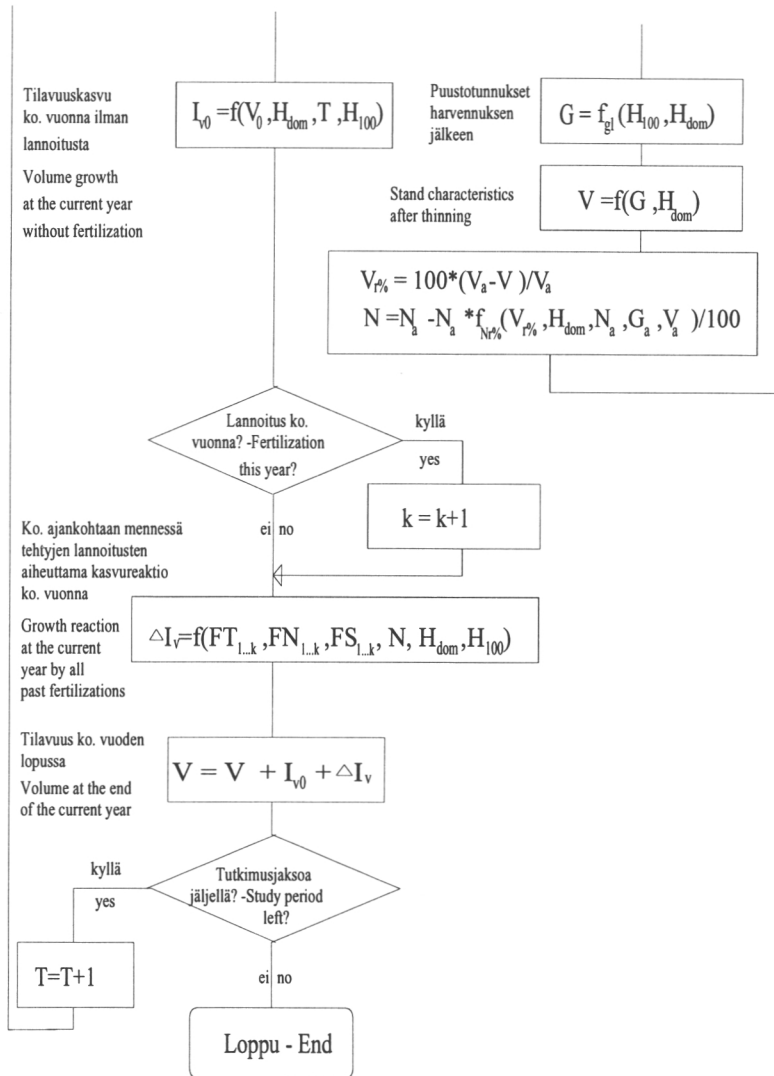
Suurin sallittu tukin pituus oli 6,1 m, kuitupuun kuorellinen minimilatvaläpimitta 5,5 cm ja pölkyn pituus 2 m (ks. Hämäläinen ym. 1989)





Kuva 1. Vuokaavio laskennan kulusta, lannoittamaton metsikkö
Figure 1. Flow chart of calculations, unfertilized stand





Kuva 2. Vuokaavio laskennan kulusta, lannoitettu metsikkö
Figure 2. Flow chart of calculations, fertilized stand

Taulukko 3. Hakkuuarvojen laskennassa käytetyt mallit (mänty).

Table 3. Models used in timber value calculations (pine).

Selitettävä muuttuja – Dependent variable	Selittävä muuttuja – Inde- pendent variable	Kerroin – Coefficient
$\ln(1-S \%/96)$	constant	0,502460
	\bar{v}	-5,23056
	T	-0,00451611
100-W %	$\bar{v}^{-1} (540\bar{v})^{-(1,2)}$	99,6588
$\ln \bar{v}_s$	constant	-1,93188
	\bar{v}	2,63507
	\bar{v}^2	-1,11295
	TH ₁₀₀	0,000108511
\bar{v}_p	$c = 0,1241^c \bar{v}^{-1} \sqrt{H_{dom}}$	
$\bar{d}_p = e^{(\ln \bar{v}_p + 2,2945) / (2,57025)}$		

Esimerkiksi tukkiprosentti voidaan laskea ratkaisemalla S % yhtälöstä:

$$\ln(1-S \%/96) = 0,502460 - 5,23056 \bar{v} - 0,00451611 T$$

Taulukko 4. Hakkuuarvojen laskennassa käytetyt mallit (kuusi)

Table 4. Models used in timber value calculations (spruce)

Selitettävä muuttuja – Dependent variable	Selittävä muuttuja – Independent variable	Kerroin – Coefficient
$\ln(1-S \%/95)$	constant	0,646951
	\bar{v}	-5,18886
	H_{dom}	0,0673720
	H_{dom}^2	0,00259522
100 - W %	$\frac{-(560\bar{v})^{-(1,2)}}{\bar{v}}$	99,6393
\bar{v}_s	constant	0,210789
	$\frac{-(1,3)}{\bar{v}}$	0,787442
\bar{v}_p	$c = 0,1265^{\bar{c}^{-1}} \sqrt{H_{dom}}$	0,363314
$\bar{d}_p = e^{(\ln \bar{v}_p + 2,41218) / (2,62463)}$		

Esimerkiksi tukkiprosentti voidaan laskea ratkaisemalla S % yhtälöstä:

$$\ln(1-S \%/95) = 0,646951 - 5,18886 \bar{v} - 0,0673720 H_{dom} + 0,00259522 H_{dom}^2$$

Sekä lannoitetun että lannoittamattoman metsikön kasvun selvittämiseksi on edellä käytetty seuraavia lyhenteitä:

- T = metsikön ikä, vuotta
= *age of the stand, years*
- N = runkoluku, kpl/ha
= *number of stems, pcs/ha*
- $N_{r\%}$ = harvennuksessa poistuva runkolukuosuus, %
= *percentage of stem number removed at thinning*
- H_{dom} = valtapituus; hehtaaria kohti 100 paksuimman puun keskipituus, m
= *dominant height, the mean height of the 100 thickest tree per hectare, m*
- G = lannoitetun metsikön pohjapinta-ala, m²
= *basal area of the fertilized stand, m²*
- V = kuorellinen tilavuus, m³/ha
= *stem volume incl. bark, m³/ha*
- H_{100} = pituusboniteetti, valtapituus 100 vuoden iällä, m
= *site index, dominant height at the age of 100 years, m*
- \bar{V} = kaikkien puiden keskitilavuus, m³
= *mean volume of all trees, m³*
- $V_{r\%}$ = poistumaprosentti tilavuudesta, %
= *percentage of volume removed at thinning, %*
- V_s = tukkipuun kuorellinen tilavuus, m³/ha
= *volume of sawtimber incl. bark, m³/ha*
- $S_{\%}$ = tukkipuun osuus tilavuudesta, %
= *sawtimber percentage of volume*
- \bar{V}_s = tukkirunkojen käyttöosan (tukkiosa+kuituosa) keskitilavuus, m³
= *mean commercial volume (sawtimber+pulpwood) of sawtimber stems, m³*
- V_p = kuitupuun kuorellinen keskitilavuus, m³/ha
= *volume of pulpwood incl. bark, m³/ha*
- \bar{V}_p = kuiturungon käyttöosan keskitilavuus, m³

- \bar{d}_p = *mean commercial volume of pulpwood stems, m³*
 = tilavuudella painotettu kuiturunkojen keskiläpimitta rinnankorkeudella, cm
 = *mean diameter of pulpwood stems at breastheight, weighted with stem volume, cm*
- V_w = hukkapuun kuorellinen tilavuus, m³/ha
 = *volume of waste incl. bark, m³/ha*
- $W_{\%}$ = hukkapuun osuus tilavuudesta, %
 = *waste, percentage of volume, %*
- I_v = vuotuinen kuorellinen tilavuuskasvu, m³/ha/v
 = *annual volume increment incl. bark, m³/ha/yr*
- ΔI_v = vuotuinen lannoituksen aiheuttama lisäkasvu, m³/ha/v
 = *annual growth response due to fertilization incl. bark, m³/ha/yr*
- IND = lustoindeksi, normaalivuoden sädekasvun taso = 100
 = *radial growth index, the normal level=100*
- f_{gh} = harvennummallin ylärajan (m²/ha) ennustava funktio. Puusto harvennetaan, kun pohjapinta-ala on saavuttanut ko. rajan.
 = *function predicting upper limit of thinning model, m²/ha. The stand is thinned when its basal area has reached this limit.*
- f_{gl} = harvennummallin alarajan (pohjapinta-ala harvennuksen jälkeen, m²/ha) ennustava funktio
 = *function predicting lower limit of thinning model (expressing the basal area after thinning) m²/ha*
- $f_{s\%}$ = tukkipuun tilavuusosuuden (%) ennustava funktio
 = *function predicting the percentage of sawtimber volume*
- $f_{w\%}$ = hukkapuun tilavuusosuuden (%) ennustava funktio
 = *function predicting the percentage of waste volume*
- FT_i = puuston ikä lannoituskerralla i, vuotta
 = *stand age at the i:th fertilization, years*
- FN_i = typpimäärä lannoituskerralla i, kg N/ha
 = *nitrogen dose at the i:th fertilization, kg N/ha*
- FS_i = typpilannoitelaji lannoituskerralla i
 = *nitrogen fertilizer type at the i:th fertilization*

4.2 Harvennukset

Tämän tutkimuksen laskelmissa lannoitetun ja lannoittamattoman metsikön harvennushakkuut suoritettiin toisistaan riippumatta. Harvennukset toteutettiin automaattisesti metsikön pohjapinta-alan saavutettua harvennusmallin mukaisen ylärajan. Harvennuksessa poistettiin puuta tuolloin sen verran, että pohjapinta-ala asettui alarajan mukaiselle tasolle. Harvennusmallit valtapituuden funktiona on puulajeittain ja pituusboniteeteittäin esitetty taulukossa 5. Ne on laskettu Vuokilan (1983) tilavuuspoistumaa kuvaavista malleista. Harvennuksen vaikutus jäävän puuston pohjapinta-alaan, tilavuuteen, valtapituuteen ja puutavaralajisuhteisiin samaten kuin harvennuspoistuman tilavuuden ja rakenteen laskenta on esitetty luvussa 4.1. Näin menetellen saadaan lannoituksista aiheutuva taloudellinen hyöty lähinnä ajallisesti varhaisempina mutta tilavuudeltaan lähes samansuuruisina harvennuspoistumina.

Toinen mahdollisuus olisi ollut harventaa metsiköt aina samanaikaisesti jommankumman joko lannoitetun tai lannoittamattoman metsikön saavuttaessa harvennusmallin mukaisen ylärajan. Tällöin lannoituksista todennäköisesti aiheutuva taloudellinen hyöty olisi saavutettu samanaikaisina, mutta tilavuudeltaan suurempina harvennuksina ja/tai suurempina loppupuustojen erotuksina

Pohjapinta-alan poistuman ja valtapituuden perusteella saatiin lasketuksi tilavuuspoistuma (Kuusela 1961) ja tilavuuspoistuman perusteella puolestaan taas runkolukupoistuma (Vuokila ja Väliaho 1980). Näin saatiin selville sekä metsikön tila harvennusten jälkeen, harvennuspoistuman tilavuus ja rakenne sekä harvennusten vaikutus kasvu- ja kasvunlisäysmallien selittäviin muuttujiin. Harvennusmallina olisi tietysti voitu käyttää myös Vuokilan (1983) tilavuuteen perustuvia malleja. Harvennettavan pohjapinta-alan ilmoittamien mallien käyttöön päädyttiin lähinnä siksi, että ne ovat käytännönläheisiä: puuston pohjapinta-alan arviointi käy helposti relaskoopilla ja näin tehdään myös käytännössä.

4.3 Lannoitukset

Toistuvilla investoinneilla tässä tutkimuksessa ymmärretään investoinnin kohteeseen tasaisin aikavälein suoritettuja perusparannustoimenpiteitä ja/tai korvausinvestointeja. Tässä tapauksessa tarkoitetaan eritoten säännöllisin aikavälein samassa metsikössä suoritettuja lannoituksia, joissa sekä lannoitelaji että lannoitemäärä saatavat kerrasta toiseen vaihdella. Korvausinvestointia edustaa päätehakkuu ja/tai puulajin vaihto. Tässä tutkimuksessa ei näihin asioihin oteta kantaa kuin välillisesti, sillä tulokset on esitetty myös ikäluokittain.

Lannoitukset suoritettiin toisistaan sikäli riippumattomasti, etteivät aikaisemmat lannoitukset lannoitelajin tai lannoitemäärän suhteen mitenkään vaikuttaneet seuraavaan lannoitukseen.

Lannoituksissa typpimäärä vaihteli 82–150 N kg/ha. Lannoitusten lukumäärä vaihteli n. 18 vuotta kestäneen tutkimusjakson aikana 2–4 lannoituskertaan keskiarvon ollessa 3 kertaa. Lannoitukset suoritettiin tasaisin välein siten, että viimeinen lannoitus suoritettiin aina 12 vuoden kuluttua ensilannoituksesta.

Taulukko 5. Valtapituuden mukaiset harvennusmallit puulajeittain ja kasvupaikkatyypeittäin. Puusto harvennetaan sen saavuttaessa ylärajan mukaisen pohjapinta-alan. Kasvamaan jätetään alarajan mukainen pohjapinta-ala.

Table 5. Harvesting models by tree species and site indexes according to the dominant height of a stand. The stand is thinned when its basal area has reached up limit. Volume according to low limit is left grow.

puulaji – tree species	kasvu-paikka – site index	ylä/ala – up/down	HDOM	HDOM ²	vakio – constant
mänty – pine	18	ylä – up	0,88136	0,0000000	9,3000
		ala – low	1,11605	-0,0184884	2,1691
mänty – pine	24	ylä – up	1,89864	-0,0373324	5,5922
		ala – low	1,45112	-0,0294951	2,83391
mänty – pine	27	ylä – up	1,89542	-0,0345956	7,23671
		ala – low	1,45994	-0,0280232	4,01611
kuusi – spruce	24	ylä – up	2,43172	-0,0435036	0,0839031
		ala – low	1,71416	-0,0307941	-0,13553
kuusi – spruce	27	ylä – up	2,43172	-0,0435036	0,0839031
		ala – low	1,71416	-0,0307941	-0,13553

Lannoitteina sekä kuusikoissa että männiköissä käytettiin aluksi ammoniumsulfaattia (AS, ammonium sulphate, 20,5 % tyyppiä). Tässä tutkimuksessa ei lannoitteena käytetä ammoniumsulfaattia. 1960-luvulla urea (UREA, 46 % tyyppiä) yleistyi metsänlannoitteena. Myöhemmissä lannoituksissa on tutkimuksessa käytetty oulunsalpietaria (OS, ammoniumnitrate with lime, 25,0–27,5 % tyyppiä). Kuusikoissa käytettiin myös metsän NP-lannosta (N and P combined).

4.4 Lannoituskustannukset

Lannoituskustannusten odotusarvo (f_c) on laskettu lannoite- ja levityskustannusten lineaarifunktiona. Nämä osatekijät ovat määräävinä koko lannoituskustannuksia arvioitaessa. Lisäksi on otettu huomioon kuljetus-, suunnittelu- ja työnjohtokustannukset siten, että ne ovat 20 % lannoite- ja levityskustannuksista. Levityskustannuksia laskettaessa on oletettu siihen kuluva vähintään yhden miestyöpäivän aina 250 kiloon asti. Suurempien lannoitemäärien ollessa kyseessä kasvavat levityskustannukset lineaarisesti levitettävän määrän suhteessa, eli matemaattisesti ilmaistuna:

$$f_c = (\max(e_{nijk}/250, 1) \times w + e_{nijk} \times c_n) \times 1,2$$

missä e_{nijk} = lannoitelajia n puulajille i ikäluokassa j kasvupaikkatyypillä k

- levitetty määrä, kg/ha
= *the amount of fertilizer type n spread to stand of tree species i of age j in site index k, kg/ha*
- w = levityskustannus, mk/kg
= *cost of spreading, FIM/kg*
- c_n = lannoitelajin n hinta, mk/kg
= *price of fertilizer type n, FIM/kg*

5 Tuotot ja kustannukset

5.1 Yleistä

Koska tässä tutkimuksessa pyritään selvittämään toistuvien lannoitusinvestointien kannattavuutta, on oleellinen paino annettava tuottojen ja kustannusten menneen kehityksen analysointiin ja tulevan kehityksen estimointiin. Kaikkeen ennustamiseen liittyy epävarmuutta ja riskiä. Tässä tutkimuksessa pyritään erityisesti selvittämään ennusteisiin liittyvää riskiä. Tutkimuksessa selvitetään ensin metsikkökohtaisesti kannattavuuden odotusarvot ja hajonnat eli kannattavuuteen liittyvä riski. Myöhemmin sovelletaan riskirajoitteista ohjelmointia laajennettaessa metsikkökohtaiset laskelmat koskemaan koko metsälöä ja sen eri metsiköiden lannoitusjärjestystä kokonaiskannattavuuden kannalta asiaa tarkasteltaessa. Riskin tapauksessa voidaan ennustettavan muuttujan todennäköisyysjakauma kunakin ennustettavana ajankohtana selvittää. Epävarmuudesta taasen puhutaan silloin, kun tätä jakaumaa ei voida määritellä eli etukäteen ei tiedetä, millä todennäköisyydellä mikäkin tulevaisuus toteutuu (Buhlmann 1970, Dietrich 1973).

Tässä tutkimuksessa erotuskannattavuutta laskettaessa lannoitetun metsikön harvennustulot otettiin huomioon lannoituksella aikaansaatuina tulon lisäyksiä ja vastaavan lannoittamattoman metsikön harvennustulot lannoitusinvestoinnin tulon vähennyksinä. Hakkuuarvojen lisäyksiä laskettaessa otettiin huomioon harvennustulosten lisäksi myös lannoitetun ja lannoittamattoman metsikön hakkuuarvojen ero tarkastelujakson lopussa. Kokonaiskannattavuutta laskettaessa menoina otettiin huomioon myös lannoitettavan puuston hakkuuarvo tutkimusjakson alussa sekä vuotuinen metsävero. Nämä ovat olleet tietysti samoja sekä lannoitetuissa että lannoittamattomissa metsiköissä. Uusi metsävero kohdistuu suoraan hakkuutuloihin ja tulee näin ollen pienentämään lannoituksen kannattavuutta. Kokonaiskannattavuutta laskettaessa muodostettiin erilliset tulo-menosarjat lannoitetuille ja lannoittamattomille metsiköille. Kokonaiskannattavuus laskettiin näiden erotuksena. Loppupuustojen hakkuuarvojen laskennassa sovellettiin samoja periaatteita kuin harvennuspoistumien kantoraha-arvojen laskennassakin.

Tässä tutkimuksessa aikaansaatu hakkuuarvojen lisäys oli tulo-menosarja, jossa vähennettävänä olivat lannoitetun metsikön harvennustulot ja loppupuuston hakkuuarvo sekä vähentäjinä lannoittamattoman metsikön harvennustulot ja loppupuuston hakkuuarvo eli hakkuuarvo tutkimusjakson lopussa.

5.2 Aikasarjat

Aikasarja on sarja muuttujia, jotka sijaitsevat aikaan nähden peräkkäin. Ekonometriset muuttujat on tavallisesti luokiteltu varastoiksi ja virroiksi, jolloin raha on esi-merkki varastosta ja bruttokansantuote esimerkki virrasta (HARVEY 1981).

Aikasarjojen käsittely voi tapahtua joko

- 1) analysoimalla tai
- 2) mallintamalla

Aikasarjojen analysointi perustuu olettamukseen, että itse aikasarja sisältää kaiken tiedon itsestään, joten sen käyttäytymistä yritetään selvittää vain sen menneen

käyttäytymisen perusteella. Aikasarjan oletetaan tietyllä tavalla toistavan itseään. Mallintamisessa sitä vastoin aikasarjaa kuvaavan muuttujan kehitystä yritetään selvittää myös muista muuttujista riippuvien mallien avulla. Tällaisia malleja kutsutaan ekonometrisiksi malleiksi. Se, kumpaa menetelmää käytetään, riippuu tietysti itse aikasarjasta ja siitä, onko olemassa relevanttia tietoa tai intuitiota ko. aikasarjan ja joidenkin muiden tekijöiden keskinäisestä merkittävästä korrelaatiosta.

Aikasarjojen käsittely tähtää yleensä aina ennustamiseen. Tässäkin tutkimuksessa asianlaita on juuri näin. Mallintamiseen tarvittavien riippuvuuksien selvittelyyn ei tässä tutkimuksessa ole lähdetty ensinnäkään siitä syystä, ettei sen ole katsottu olevan tämän tutkimuksen kannalta oleellinen. Toiseksi ei ole ollut helposti saatavilla sellaisia yleisesti hyväksytyjä riippuvuussuhteita tässä tutkimuksessa käytettävien aikasarjojen osalta eikä etenäkään sellaisia muuttujia, joiden käyttäytymistä tulevaisuudessa olisi helpompi ennustaa kuin tutkimuksen aikasarjojen kehitystä.

Aikasarjojen käsittely tässä tutkimuksessa tapahtuu itse aikasarjoja analysoimalla olettaen siis sarjojen sisältävän niin paljon informaatiota, että aikasarjan aieman kehityksen perusteella sen tulevaa käyttäytymistä voidaan ennakoida. Aikasarjojen käsittelyyn ja niiden avulla ennustamiseen on käytettävissä lukuisa joukko erilaisia menetelmiä. Yleisimmin käytettyjä ovat ARIMA (p,q,s) (autoregressive integrated moving average) of order (p,q)-mallit (ks. Harvey 1981) ja ARMA (p,q) (autoregressive moving average of order (p)-mallit. Jälkimmäiset ovat erikoistapaus ARIMA-malleista nimittäin ARIMA (p,q,o)-malleja. Kummankin tyyppiset mallit ovat stokastisia prosesseja (ks. Harvey 1981, Montgomery ja Johnson 1976).

Tällaisia erilaisia liukuvia painotettuja keskiarvoja, autokorrelaatioita ja autoregressiota käyttävien mallien avulla voidaan eri tavoin painottaa aikasarjan eri osia tarpeen ja intuition mukaan. Yleensä käytännössä on hyödyllistä aina esittää aikasarjan havainnot graafisesti. Tämä helpottaa aikasarjaa selittävän mallin valintaa. Edellä mainituilla menetelmillä saadaan generoitua yksi ennuste, jota sitten voidaan käyttää seuraavan ennusteen laatimiseen jne. Koska menetelmät ovat lineaarisia sovellutuksia, ennuste tasoittuu, kun näitä menetelmiä käytetään pitkien jaksojen ennustamiseen. Menetelmien hyvinä puolina ovat yksinkertaisuus ja helppous ja se, että ne reagoivat halutulla nopeudella muutoksiin. Tästä syystä niitä käytetäänkin yleensä ”seuraavan” ennusteen laatimiseen. Huonona puolena voidaan pitää sitä, etteivät ne tuota arviota ennusteen luotettavuudesta ts. epävarmuudesta tai riskistä.

Eräs yleisesti käytetty tapa aikasarjojen analysointiin on ns. käännepestemenetelmä (ks. Törnqvist, 1974). Menetelmän käyttö edellyttää jatkuvan, kaksi kertaa differentoituvan funktion käyttämistä aikasarjan kuvaamiseen. Tämän tutkimuksen aikasarjat katsottiin liian lyhyiksi tällaisen menetelmän käyttämiselle.

Ekonometriassa hyvin yleisesti käytetty menetelmä on pienimpien neliösummien menetelmä (ks. esim. Malik ja Mullen, 1975, Draper ja Smith, 1976). Menetelmää voidaan käyttää sovittamaan joko lineaarinen tai epälineaarinen jatkuva funktio diskreettiin aikasarjaan.

Aikasarjamalli voidaan hajoittaa osiinsa eli kuvata sitä joko tekijöittensä summana tai tulona:

$$Y = T + S + C + e \text{ tai}$$

$$Y = T \times S \times C \times e ,$$

missä $T =$ pitkäaikainen trendi

S = kausivaihtelu

C = syklinen vaihtelu

e = satunnaisvaihtelu

(ks. Malik & Mullen 1975).

Ajallinen trendi kuvaa pitkäaikaista aikasarjan muutosta, S kuvaa muutoksia, jotka liittyvät vuodenaikojen vaihteluun, C kuvaa pitkäaikaista variaatiota trendisuoran ympärillä ja e on satunnaismuuttuja.

e on puhdas satunnaismuuttuja siinä mielessä, että sen kahden eri ajankohdan arvojen välinen korrelaatio on nolla.

Kun merkitään Y:llä todellista arvoa ja \widehat{Y} :lla ennustettua arvoa on pienimmän neliösumman menetelmässä kyse summan

$$\Sigma (Y - \widehat{Y})^2 = e^2 \text{ minimoinnista.}$$

Pienimmän neliösumman menetelmässä

$$\Sigma (Y - \widehat{Y}) = 0$$

Tässä tutkimuksessa ennustaminen tapahtuu lokaalisen lineaarisen trendiyhtälön avulla, lokaalisen siinä mielessä, että aikasarjahavaintomme on lyhyeltä ajanjaksolta.

Yleisesti ottaen aikasarja koostuu N:stä parista havaintoja X ja Y. Tällöin lineaarinen aikasarjaa kuvaava yhtälö on muotoa

$$\widehat{Y} = a + b \times X$$

missä kertoimet a ja b ovat normaaliyhtälöparin

$$a \times N + b \times \Sigma X = \Sigma Y$$

$$a \times \Sigma X + b \times \Sigma X^2 = \Sigma XY$$

ratkaisu.

Ennusteiden luotettavuus riippuu siis kertoimien a ja b luotettavuudesta. Tämän tutkimuksen samalla tavalla ja samalla tarkkuudella konstruoidut aikasarjat ovat niin lyhyitä, että niiden perusteella käytettävät mallit ovat muotoa

$$Y = T + e,$$

missä Y:n pohjana ei ole kovin montaa havaintoa. Tässä tutkimuksessa käytettyjen aikasarjojen havainnot liittyvät tiettyyn ajanjaksoon, jonka pituus on vuosi. Ne siis kuvaavat keskimääräistä muutosta vuoden jaksoissa eivätkä liity tiettyyn ajan-kohtaan (ks. Törnqvist 1974). Tästä syystä myös kausivaihtelun sisältävä komponentti on jätetty pois käytettävistä malleista. Sen sijaan, jos tutkimuksessa havaintojaksona olisi ollut esim. kuukausi, olisi malleihin ollut syytä sisällyttää myös kausivaihtelu. Suhdannevaiheen poisjättäminen mallista on kompensoitu siten, että sen vaikutus näkyy virhetermissä tulevissa simuloinneissa. Käytännössä havaintoväli valitaan siten, että aikasarja sisältää tutkimuksen tavoitteiden kannalta riittävästi tietoa. Näin on menetelty tässäkin tutkimuksessa.

Yleisimmin käytetty menetelmä tällaisissa tapauksissa on lineaarisen regression nimellä tunnettu tapa sovittaa havaintoihin juuri lineaarinen funktio. Tällöin malli saa muodon

$$Y = a + b \times X + e$$

joka on yksinkertainen stokastinen prosessi (ks. Hoel ym. 1972). Stokastisuus tulee muuttujasta e , joka on normaalisti jakautunut satunnaismuuttuja

$$e \sim N(0, \sigma^2).$$

a :n ja b :n varianssien estimaatit saadaan seuraavista kaavoista

$$S_a^2 = \frac{S_{y \cdot x}^2 \left(\sum x^2 \right)}{N \times \sum (x - \bar{x})^2}$$

$$S_b^2 = \frac{S_{y \cdot x}^2}{\sum (x - \bar{x})^2}$$

Näiden perusteella voidaan laskea luottamusvälit Y :lle ja ennusteväli tiettyä X -arvoa vastaavalle Y :n arvolle. Lukijan on muistettava, että oletamme virheiden olevan riippumattomia ja normaalisti jakautuneita. Kun tällainen oletamus tehdään, niin eri havaintopareista laskettujen eri a :n ja b :n estimaattien otosjakaumat ovat normaalisti jakautuneita ja silloin voidaan soveltaa oheisia luottamusvälille kehitettyjä menetelmiä. Tätä varten voimme kirjoittaa em. regressiomallin muotoon

$$\widehat{Y} = Y + b \times (x - \bar{x})$$

Regressiosuoran Y :n ennusteen \widehat{Y} varianssi tietyllä arvolla X eli siis tietyssä ajankohtana x

$$= \sqrt{\frac{S_{y \cdot x}^2}{N} + \frac{(x - \bar{x})^2 \times S_{y \cdot x}^2}{\sum (x - \bar{x})^2}}$$

$$= S_{y \cdot x} \times \sqrt{\frac{1}{N} + \frac{(x - \bar{x})^2 \times S_{y \cdot x}^2}{\sum (x - \bar{x})^2}}$$

Tämän tutkimuksen laskelmia varten on tärkeä tietää yksittäisen ennusteen luottamusväli. Se voidaan laskea samaan tapaan kuin Y :n keskiarvon luottamusväli. On selvää, että yksittäisen ennusteen luottamusväli on suurempi kuin keskiarvon luottamusväli.

Yksittäisen ennusteen Y keskivirhe saadaan kaavasta

$$std Y = S_{y.x} \times \sqrt{1 + \frac{1}{N} + \frac{(x - \bar{x})^2}{\sum (x - \bar{x})^2}}$$

Lukijan tulee muistaa, että meidän oli tehtävä oletus, että virheet ovat riippumattomia ja normaalisti jakautuneet. Tällöin yksittäisen havainnon α -prosentin luottamusväli Y :lle on välillä

$$Y - t_{\alpha}(std Y), Y + t_{\alpha}(std Y)$$

t_{α} :t ovat riskitasoa α kuvaavia t -jakautuman kertoimia vapausastein $N-2$. Edelleen voidaan osoittaa, että t -jakautuma lähenee normaalijakautumaa, kun $N \rightarrow \infty$ (Dudenicz & Mishra 1988).

Tämän tutkimuksen empiirisessä kantohintoja ja kustannuksia kuvaavissa aikasarjoissa $N = 12$, joten jatkossa kun riskirajoitteista ohjelmointia sovelletaan, oletetaan kertoimien olevan normaalisti jakautuneita. Tässä tulee tehtyä pieni virhe, joka ei kuitenkaan mitenkään muuta tuloksista tehtäviä johtopäätöksiä. Esim. $t_{0,025}(DF = 12-2) = 2,2281$ kun vastaava arvo normaalijakautumassa on 1,9600, siis riskitasolle $\alpha = 5\%$ (kts. myöhemmin luku 6).

Tässä tutkimuksessa kaikki aikasarjat kuvaavat hintojen ja kustannusten nimellistä kehitystä. Kaikkia sarjoja analysoitiin ensin sekä niiden reaalisten että nimellisten hintojen kehityksen perusteella. Yleisenä havaintona oli, että käytetty lineaarinen regressiomalli selitti paremmin nimellishintaisten aikasarjojen kehitystä kuin reaalihintaisien aikasarjojen kehitystä. Tämä johtuu osittain siitä, että nimellinen aineisto sisältää inflaatiotekijän ja havaintojaksolla on inflaatio ollut suhteellisen vakaalla tasolla.

Reaaliset aikasarjat saatiin nimellisistä deflatoimalla ne tukkuhintaindeksin kokonaisindeksillä. Tämä on laajalti hyväksytty tapa muuttaa nimellishintoja reaalisiksi (vrt. Keipi & Laakkonen 1979). Voidaan tietysti sanoa, että jokin muu indeksi olisi sopivampi esim. kantohintojen deflatointiin. Tällainen voisi olla esim. maataloustuotteiden hintakehitystä kuvaava indeksi, vähittäismyyntihintaindeksi tai joidenkin raaka-aineiden hintakehitystä kuvaava indeksi. Se, mitä indeksiä milloinkin tulisi käyttää riippuu oleellisesti päätöksentekijästä, tässä tutkimuksessa siis metsänomistajasta ja hänen intresseistään. Koska metsänomistajat ja heidän päätöksentekijätilanteensa ja päätösprosessinsa poikkeavat huomattavasti toisistaan päädyttiin tässä tutkimuksessa käyttämään tukkuhintaindeksin kokonaisindeksiä.

Kuten aiemmin todettiin, selittivät lineaariset regressiomallit huomattavasti paremmin nimellishintaisten aikasarjojen kehitystä. Nimelliset aikasarjat sisältävät nimenomaan niihin liittyvän inflaation, joka poikkeaa tukkuhintaindeksin kokonaisindeksin mukaisesta inflaatiosta. Tukkuhintaindeksin kokonaisindeksin käyttö ei johtanut parempiin arvioihin. Voidaankin todeta, ettei tärkeimmän uusiutuvan

luonnonvaramme hintakehitys ole ollut samanlaista kuin hintojen kehitys laajasti ottaen on ollut. Toisaalta kun muutakaan sopivaa indeksiä ei löytynyt, päädyttiin tässä tutkimuksessa em. selvitysten jälkeen nimellisten hintasarjojen käyttöön ja oletukseen inflaation jatkumisesta tulevaisuudessakin keskimäärin vuosien 1978–90 toteutuneella tasolla.

Kantohintoja kuvaavat aikasarjojen havainnot on laskettu metsälautakunnittain ja puutavaralajeittain toteutuneiden kauppojen perusteella. Ne ovat kunkin hakkuuvuoden pysty- ja hankintakauppojen määrillä painotettuja pystykauppojen mukaisten kantohintojen keskiarvoja. Ensimmäin muodostettiin aikasarjat puutavaralajeittain Etelä-Suomen metsälautakuntien (1–11) aritmeettisina keskiarvoina. Koska tuottojen määrätymisen kannalta on oleellista kuitu- ja tukkipuun hintasuhte, laskettiin em. aikasarjojen perusteella puutavaralajien hintasuhteet trendiyhtälöiden eri hakkuuvuosien ennusteiden suhteina. Kuitupuun lopulliset aikasarjat saatiin kertomalla tukkipuun trendiyhtälön mukainen hinta näin saadulla hintasuhteella. Näin on saatu nimellishintaiset kantohinta-aikasarjat puutavaralajeittain.

Kantohintoihin tehtiin runkolajin järeyden ja metsikön tiheyden mukaiset korjaukset. Näihin ei oletettu inflaation vaikuttavan. Tutkimuksessa ei lähdetty aprikoidaan miten korjuukustannukset jatkossa varsinkin pitkähkön tutkimusjakson aikana kehittyvät. Lopputuloksiin asialla ei ole vaikutusta sillä tarkkuudella kuin tulokset esitetään. Muihin kantohintaan vaikuttaviin tekijöihin ei lannoituksilla katsottu olevan vaikutusta ja ne oletettiin perusleimikon mukaisiksi.

Tukkipuiden osalta tehtiin hintasuositussopimuksen (Puun hintasuositussopimukset.....1990) seuraavan asetelman mukaiset korjaukset

käyttöosan tilavuus m ³	mänty mk/m ³	kuusi mk/m ³
< 0,3	-4,0	-8,0
0,3–0,4	-2,0	-4,0
0,4–0,5	0,0	0,0
0,5–0,6	2,0	3,0
> 0,6	4,0	6,0

Kuitupuun osalta perusleimikon mukaisiin kantohintoihin tehtiin seuraavassa asetelmassa esitetyt korjaukset. Kuiturunkojen keskimääräinen rinnankorkeusläpimitta laskettiin tilavuuden ja Laasasenahon (1982) esittämien rungon tilavuutta rinnankorkeusläpimitan funktiona kuvaavien yhtälöiden perusteella.

d _{1,3} (cm)	mänty mk/m ³	kuusi mk/m ³
< 8	-25	-30
8–10	-15	-20
10–12	-5	-10
12–14	0	0
14–16	+5	+10
16–18	+10	+20
> 18	+15	+30

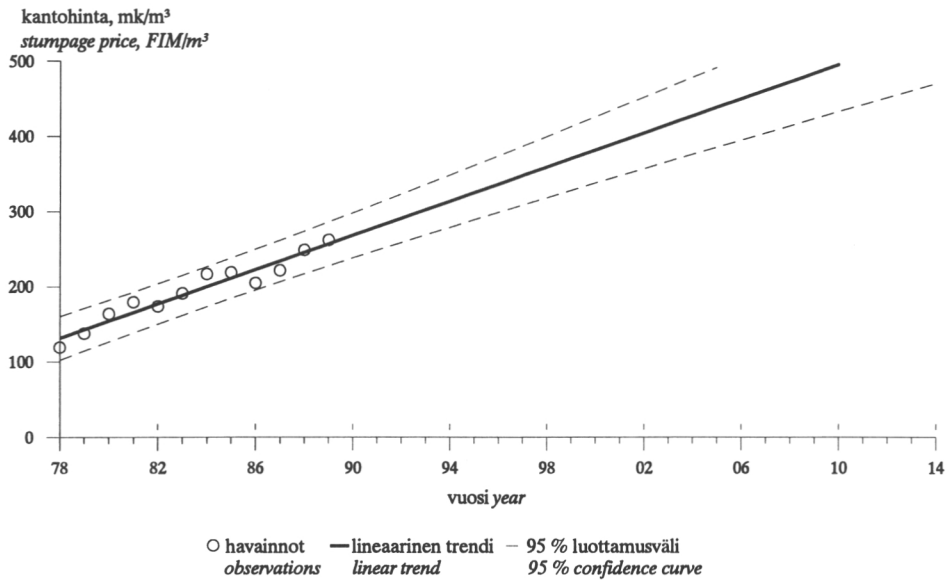
Tiheyden eli yhdellä hakkuusopimuksella metsiköstä kerralla hakattavan kuorellisen tilavuuden mukainen hintakorjaus

hakkuumäärä (m ³)	korjaus mk/m ³
< 15	-8
15–30	-8
30–60	-3
60–100	0
100–150	3
> 150	5

Lannoituskustannukset jakaantuvat lannoite-, suunnittelu- ja työnjohto-, kuljetus- ja levityskustannuksiin. Ylivoimaisesti suurimman osan lannoituskustannuksista muodostavat lannoite- ja levityskustannukset. Näistä kummastakin on laadittu erikseen aikasarjat. Levityskustannukset ovat Metsä- ja Uittoalan työehtosopimusten suositusten mukaisia palkkausalueen 4 kunakin hakkuuvuonna voimassa olleita nimellisiä päiväpalkkoja sosiaalikustannuksineen. Eri lannoitteiden hintojen kehitystä kuvaavat aikasarjat on laskettu kunkin hakkuuvuoden liikevaihtoverottomien nimellisten ohjehintojen aritmeettisinä keskiarvoina.

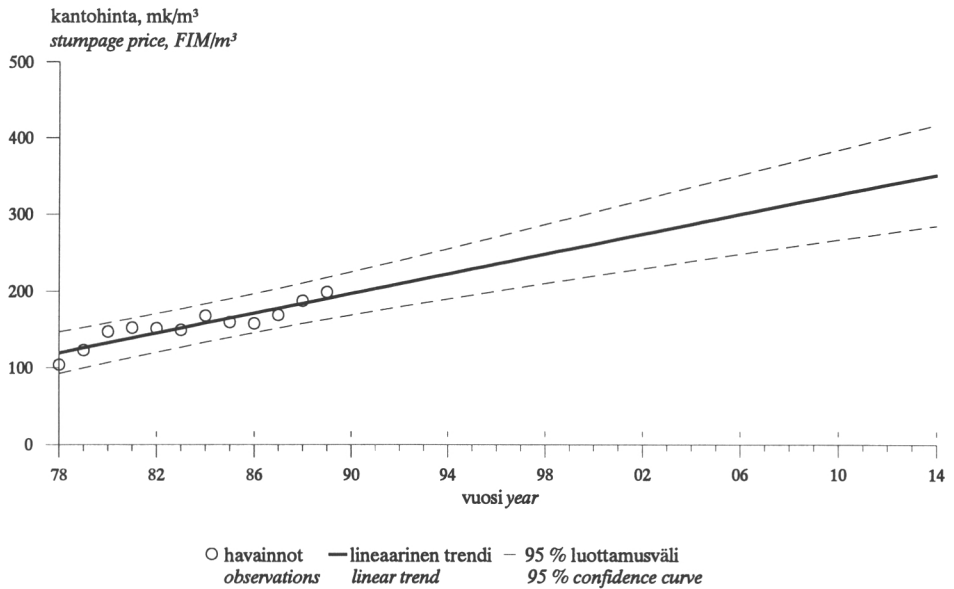
Kuvissa 3–10 on esitetty hintojen ja kustannusten aikasarjat hakkuuvuosilta 1978/79–1990/91, niiden perusteella laaditut lineaariset trendiyhtälöt hakkuuvuosille 1978/79–2014/15 sekä näihin liittyvät t-jakautuman 95 % luottamusväliä kuvaavat käyrät vapausastein 10 (DF = 12–2). Nämä yhtälöt selitysasteineen on esitetty myös taulukossa 21.

Metsäverolukujen on oletettu jatkossa kehittyvän kyseisen boniteetin verokuutiometrin nykyisen rakenteen ja trendi-yhtälöiden kantohintojen mukaisesti. Verokuutiometrin rahanarvoa laskettaessa on lehtipuun osuus eliminoitu olettaen sen jakautuvan männyn ja kuusen osalle verokuutiometrin nykyisen rakenteen mukaisesti. Tavallaan siis oletettiin, ettei verokuutiometri sisällä lainkaan lehtipuuta. Näin meneteltiin siksi, ettei erikseen haluttu laskea trendiyhtälöitä lehtipuulle. Lehtipuun trendiyhtälöt eivät tämän tutkimuksen kannalta ole oleellisia, eikä näin muodostuva pieni teoreettinen virhe vaikuta laskelmiin juuri lainkaan. Metsäverolukuja käytetään kokonaiskannattavuuksia laskettaessa ja silloinkin niiden vaikutus lopputuloksiin on olematon. Metsäverolukuja kuvaava aikasarja laskettiin em. metsälautakuntien kunnittaisena keskiarvona. Trendisuora on esitetty taulukossa 21.



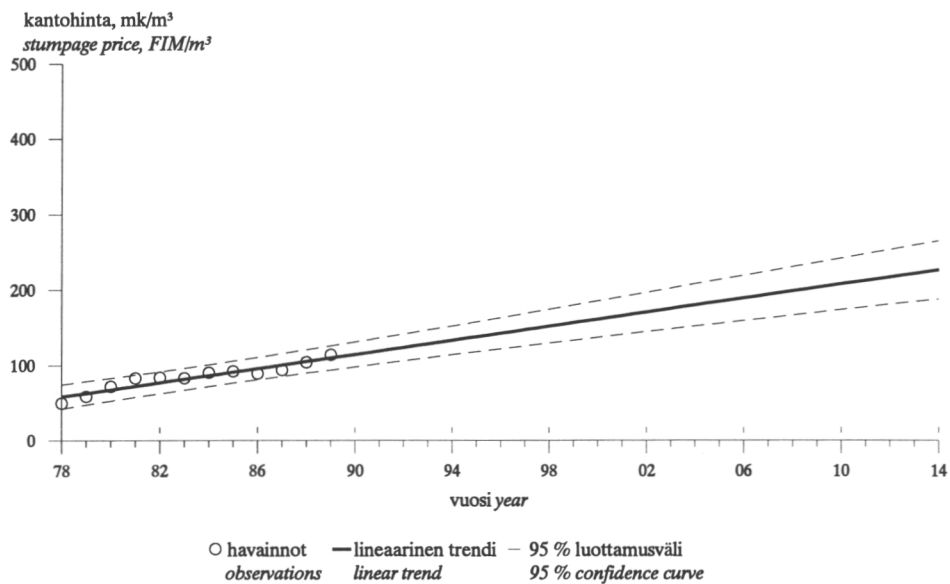
Kuva 3. Mäntytukin nimellishinnat. Alkuperäinen aikasarja, lineaarinen trendi ja t-jakauman mukainen 95 % luottamusväli.

Figure 3. Nominal prices of pine sawtimber. Original time series, linear trend and 95 % confidence curves of t-distribution.



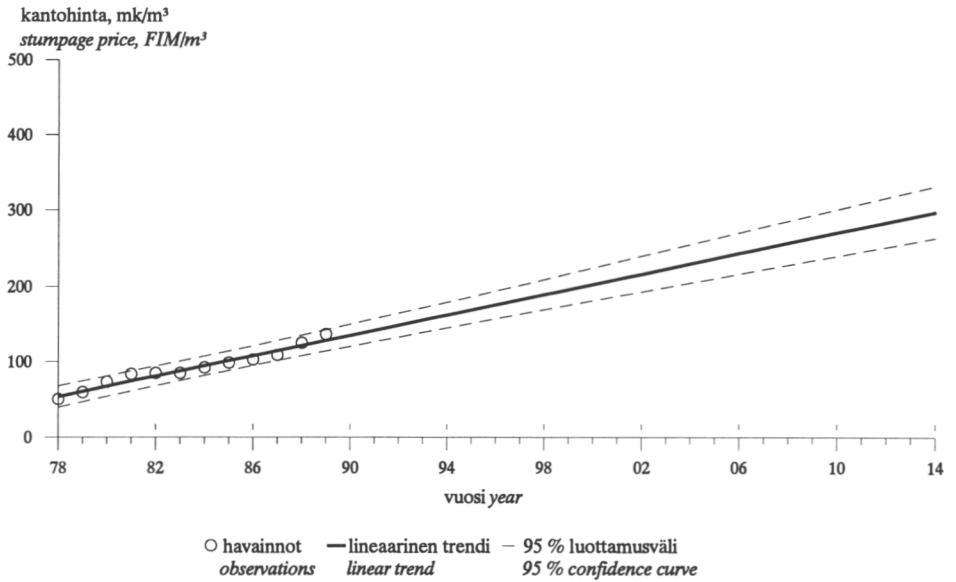
Kuva 4. Kuusitukin nimellishinnat. Alkuperäinen aikasarja, lineaarinen trendi ja t-jakauman mukainen 95 % luottamusväli.

Figure 4. Nominal prices of spruce sawtimber. Original time series, linear trend and 95 % confidence curves of t-distribution.



Kuva 5. Mäntykuidun nimellishinnat. Alkuperäinen aikasarja, lineaarinen trendi ja t-jakauman mukainen 95 % luottamusväli.

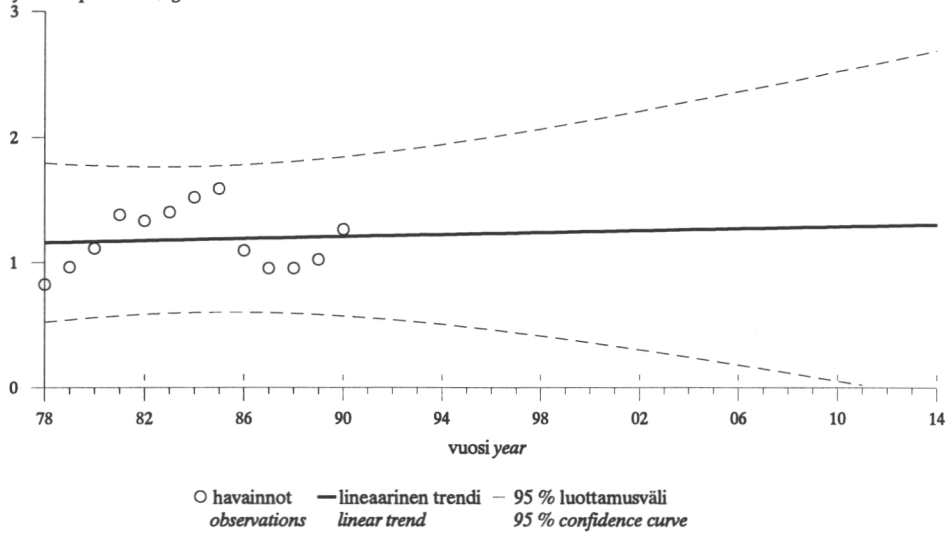
Figure 5. Nominal prices of pine pulpwood. Original time series, linear trend and 95 % confidence curves of t-distribution.



Kuva 6. Kuusikuidun nimellishinnat. Alkuperäinen aikasarja, lineaarinen trendi ja t-jakauman mukainen 95 % luottamusväli.

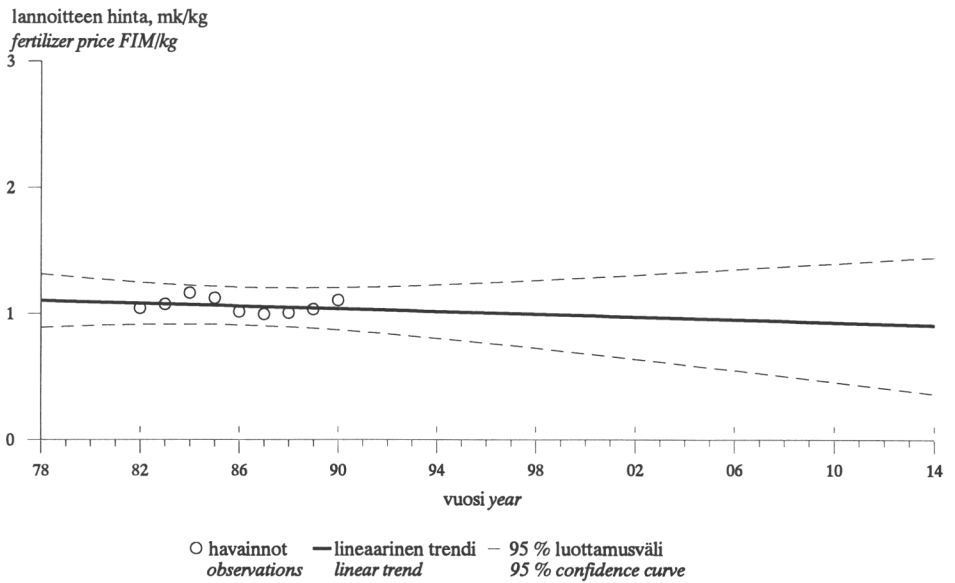
Figure 6. Nominal prices of spruce pulpwood. Original time series, linear trend and 95 % confidence curves of t-distribution.

lannoitteen hinta, mk/kg
fertilizer price FIM/kg



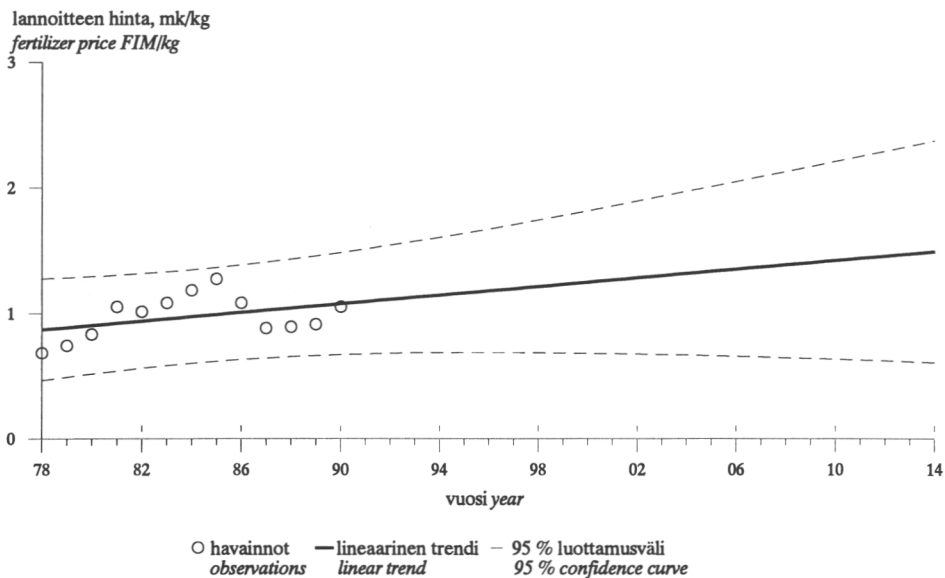
Kuva 7. Urean nimellishinnat. Alkuperäinen aikasarja, lineaarinen trendi ja t-jakauman mukainen 95 % luottamusväli.

Figure 7. Nominal prices of Urea. Original time series, linear trend and 95 % confidence curves of t-distribution.



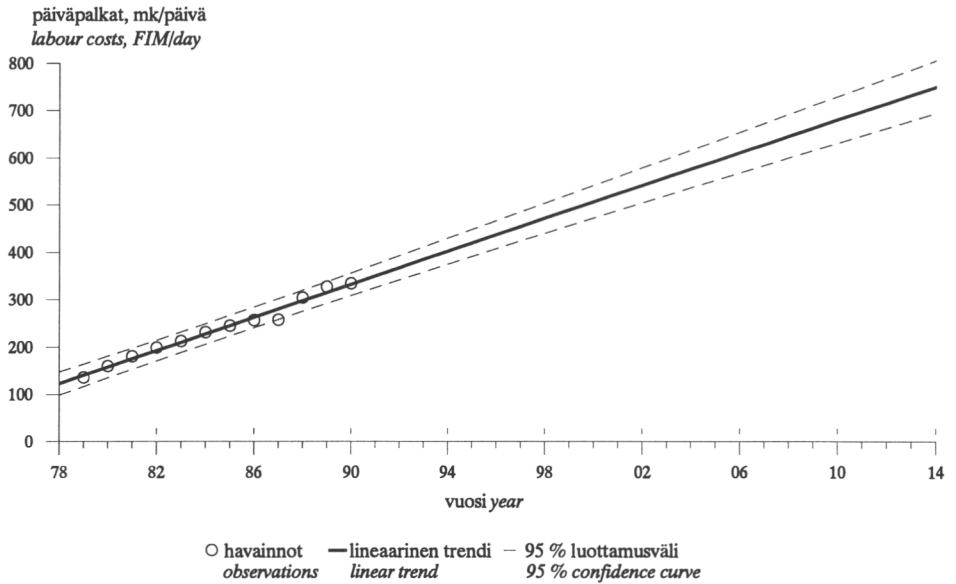
Kuva 8. Metsän NP-lannoitteen nimellishinnat. Alkuperäinen aikasarja, lineaarinen trendi ja t-jakauman mukainen 95 % luottamusväli.

Figure 8. Nominal prices of N and P combined. Original time series, linear trend and 95 % confidence curves of t-distribution.



Kuva 9. Oulunsalpietarin nimellishinnat. Alkuperäinen aikasarja, lineaarinen trendi ja t-jakauman mukainen 95 % luottamusväli.

Figure 9. Nominal prices of OS with lime. Original time series, linear trend and 95 % confidence curves of t-distribution.



Kuva 10. Työvoimakustannusten nimellishinnat. Alkuperäinen aikasarja, lineaarinen trendi ja t-jakauman mukainen 95 % luottamusväli.

Figure 10. Nominal prices of labour costs. Original time series, linear trend and 95 % confidence curves of t-distribution.

5.3 Tuottojen ja kustannusten laskenta

Tuotot ja kustannukset laskettiin sekä lannoitetulle että vastaavalle lannoittamattomalle metsikölle. Laskelmat tehtiin erikseen kunkin tutkimusjaksoon kuuluvan hakkuuvuoden osalta käyttäen kuvien 3–10 ja taulukon 21 mukaisia trendiarvoja. Tutkimuksen missään vaiheessa ei käytetty esim. tuottojen laskennassa hypoteettisia lannoitetun ja lannoittamattoman metsikön erotuspuustoja. Tutkimusjakson alkuajankohdaksi eli ensimmäisen lannoituksen ajankohdaksi valittiin hakkuuvuosi 1990/91.

Tuottoja laskettaessa otettiin tuloina huomioon lannoitetun metsikön harvennustulot ja lannoitetun ja lannoittamattoman metsikön loppupuustojen hakkuuarvojen erotus tämän ollessa positiivinen ja vastaavasti tulovähennyksinä ja sitä kautta kustannuksina lannoittamattoman metsikön harvennustulot ja loppupuustojen hakkuuarvojen erotus tämän ollessa negatiivinen sekä tietysti lannoitusmenot. Hakkuuarvojen erotusten, harvennusten ja lannoitusmenojen laskenta on selvitetty luvussa 4. Taulukoissa 6–17 on esitetty esimerkkejä tuottojen ja kustannusten odotusarvoista puulajeittain, lannoitelajeittain, lannoitusten lukumäärän mukaan, pituusboniteeteittäin ja lannoitemääräluokittain jaoteltuna. Lannoituskustannukset kasvavat luonnollisesti levitettävän määrän kasvaessa. Urealannoitukset ovat oulunsalpietarilannoituksia huomattavasti halvempia. Harvennussalleista ja lannoittamattoman ja lannoitetun metsikön harvennusten riippumattomuudesta johtuen metsikön hakkuuarvot pysyvät suunnilleen samalla tasolla koko ajan. Samasta syystä lannoittamattoman metsikön harvennustulot voivat olla suurempia kuin lannoitetun metsikön. Samanaikaisesti kuitenkin lannoitetun metsikön loppupuuston arvo on suurempi kuin vastaavan lannoittamattoman metsikön. Diskonttaamattomat kokonaistulot kasvavat lannoitemäärien kasvaessa. Tällöin ei siis aikatekijää ole mitenkään otettu huomioon.

Taulukko 6. Mäntymetsiköiden UREA-lannoituksen tuotot ja kustannukset mk/ha kahdella lannoituksella.

Table 6. Total incomes and average costs FIM/ha in two fertilizations with UREA in pine stands.

keskimääräinen typen määrä (kg/ha) – average amount of nitrogen (kg/ha)	kokonaiskustannukset – total costs	loppupuuston arvon erotus – difference of final stand values	lannoitetun puuston loppuarvo – final value of fertilized stand	harvennustulot – harvesting incomes	kokonaistulot – total incomes
<i>pituusboniteetti 18 – site index 18</i>					
160	1 559	3 398	53 300	–42	1 797
200	1 706	90	49 992	4 035	2 419
240	1 960	1 093	50 995	4 017	3 150
280	2 242	2 112	52 014	4 017	3 887
320	2 535	3 112	53 014	3 972	4 549
360	2 779	4 239	54 142	3 830	5 290
400	3 087	5 333	55 235	3 820	6 066
440	3 396	4 512	54 414	5 556	6 672
480	3 705	3 602	53 504	7 250	7 147
<i>pituusboniteetti 24 – site index 24</i>					
160	1 559	–470	89 746	4 056	2 027
200	1 706	1 038	91 255	3 629	2 961
240	1 960	2 414	92 630	3 470	3 924
280	2 242	3 682	93 899	3 385	4 825
320	2 535	2 900	93 116	5 231	5 596
360	2 779	3 654	93 871	5 640	6 515
400	3 087	2 484	92 700	7 888	7 285
440	3 396	3 510	93 726	7 996	8 110
480	3 705	4 476	94 693	8 104	9 075
<i>pituusboniteetti 27 – site index 27</i>					
160	1 559	3 831	122 377	–663	1 609
200	1 706	5 088	113 634	–939	2 443
240	1 960	6 353	114 899	–1 200	3 193
280	2 242	7 536	116 082	–1 353	3 941
320	2 535	8 654	117 200	–1 488	4 631
360	2 779	9 862	118 407	–1 695	5 388
400	3 087	11 035	119 581	–1 854	6 094
440	3 396	12 111	120 656	–1 921	6 794
480	3 705	13 132	121 678	–2 029	7 398

Taulukko 7. Mäntymetsiköiden UREA-lannoituksen tuotot ja kustannukset mk/ha kolmella lannoituksella.

Table 7. Total incomes and average costs FIM/ha in three fertilizations with UREA in pine stands.

keskimääräinen typen määrä (kg/ha) – average amount of nitrogen (kg/ha)	kokonaiskustannukset – total costs	loppupuuston arvon erotus – difference of final stand values	lannoitetun puuston loppuarvo – final value of fertilized stand	harvennustulot – harvesting incomes	kokonais-tulot – total incomes
pituusboniteetti 18 – site index 18					
240	2 338	897	50 799	4 005	2 564
300	2 485	2 092	51 995	3 874	3 481
360	2 876	3 929	53 832	3 849	4 902
420	3 249	3 688	53 591	5 560	5 999
480	3 647	4 191	54 093	6 742	7 286
540	4 068	5 039	54 941	7 515	8 486
600	4 465	6 570	56 472	7 553	9 658
660	4 940	8 348	58 250	7 570	10 978
720	5 326	9 067	58 969	8 150	11 891
pituusboniteetti 24 – site index 24					
240	2 338	1 787	92 004	3 951	3 400
300	2 485	3 367	93 583	3 613	4 495
360	2 876	2 072	92 288	6 934	6 130
420	3 249	1 288	91 505	9 349	7 388
480	3 647	2 104	92 321	10 409	8 866
540	4 068	2 959	93 175	11 437	10 328
600	4 465	3 450	93 667	12 692	11 677
660	4 940	4 907	95 123	13 271	13 238
720	5 326	6 504	96 720	13 182	14 360
pituusboniteetti 27 – site index 27					
240	2 338	6 215	11 4761	–1 248	2 629
300	2 485	7 362	11 5907	–1 196	3 681
360	2 876	9 492	11 8037	–1 383	5 233
420	3 249	9 919	11 8464	–236	6 434
480	3 647	9 587	11 8133	1 797	7 737
540	4 068	9 904	11 8449	3 160	8 996
600	4 465	11 475	12 0020	3 175	10 185
660	4 940	10 398	11 8943	6 006	11 464
720	5 326	8 549	11 7094	9 120	12 343

Taulukko 8. Mäntymetsiköiden UREA-lannoituksen tuotot ja kustannukset mk/ha neljällä lannoituksella.

Table 8. Total incomes and average costs FIM/ha in four fertilizations with UREA in pine stands.

keskimääräinen typen määrä (kg/ha) – average amount of nitrogen (kg/ha)	kokonaiskustannukset – total costs	loppupuuston arvon erotus – difference of final stand values	lannoitetun puuston loppuarvo – final value of fertilized stand	harvennustulot – harvesting incomes	kokonaistulot – total incomes
<i>pituusboniteetti 18 – site index 18</i>					
320	3 118	2 823	52 725	4 217	3 922
400	3 416	3 432	53 334	5 587	5 603
480	3 887	3 857	53 760	7 457	7 427
560	4 388	5 953	55 855	7 713	9 278
640	4 920	7 846	57 749	8 123	11 049
720	5 461	7 858	57 760	10 226	12 623
800	6 020	7 298	57 201	12 863	14 141
880	6 587	8 692	58 595	13 618	15 723
960	7 163	10 480	60 382	13 700	17 017
<i>pituusboniteetti 24 – site index 24</i>					
320	3 118	5 369	95 585	2 867	5 118
400	3 416	335	90 551	9 987	6 906
480	3 887	2 339	92 555	10 689	9 141
560	4 388	3 184	93 401	12 476	11 272
640	4 920	5 068	95 285	13 241	13 389
720	5 461	6 532	96 748	14 372	15 443
800	6 020	6 967	97 183	16 434	17 381
880	6 587	8 135	98 351	17 670	19 218
960	7 163	10 030	100 247	17 951	20 818
<i>pituusboniteetti 27 – site index 27</i>					
320	3 118	8 517	117 063	–1 157	4 242
400	3 416	11 095	119 640	–1 562	6 117
480	3 887	9 191	117 737	2 613	7 917
560	4 388	11 065	119 611	3 120	9 797
640	4 920	9 968	118 514	6 485	11 533
720	5 461	9 518	118 064	9 145	13 202
800	6 020	11 655	120 202	9 207	14 842
880	6 587	13 567	122 112	9 400	16 380
960	7 163	13 735	122 281	10 980	17 552

Taulukko 9. Mäntymetsiköiden OS-lannoituksen tuotot ja kustannukset mk/ha kahdella lannoituksella.

Table 9. Total incomes and average pituusboniteetti costs FIM/ha in two fertilizations with OS in pine stands.

keskimääräinen typen määrä (kg/ha) – average amount of nitrogen (kg/ha)	kokonaiskustannukset – total costs	loppupuuston arvon erotus – difference of final stand values	lannoitetun puuston loppuarvo – final value of fertilized stand	harvennustulot – harvesting incomes	kokonais tulot – total incomes
pituusboniteetti 18 – site index 18					
160	2 044	1 379	51 281	3 923	3 258
200	2 555	2 626	52 528	3 931	4 002
240	3 065	3 813	53 715	3 923	4 671
280	3 576	4 988	54 890	3 880	5 292
320	4 087	3 817	53 719	6 005	5 735
360	4 598	4 412	54 315	6 550	6 364
400	5 109	4 609	54 512	7 354	6 854
440	5 620	5 600	55 502	7 334	7 314
480	6 131	6 553	56 455	7 192	7 614
pituusboniteetti 24 – site index 24					
160	2 044	2 533	92 749	3 648	4 137
200	2 555	4 031	94 247	3 579	5 055
240	3 065	2 376	92 593	6 464	5 775
280	3 576	3 158	93 374	6 961	6 543
320	4 087	3 190	93 407	8 027	7 130
360	4 598	4 442	94 658	8 114	7 958
400	5 109	3 643	93 860	10 020	8 554
440	5 620	1 060	91 276	13 481	8 921
480	6 131	1 936	92 153	13 643	9 448
pituusboniteetti 27 – site index 27					
160	2 044	6 589	114 184	-1 457	3 088
200	2 555	8 034	115 629	-1 717	3 762
240	3 065	9 430	117 025	-1 980	4 385
280	3 565	9 344	117 205	-701	5 078
320	4 070	9 807	117 818	-133	5 604
360	4 587	11 881	119 743	-1 173	6 121
400	5 099	12 684	120 629	-900	6 685
440	5 613	12 950	121 057	-136	7 201
480	6 131	11 816	120 362	1 972	7 657

Taulukko 10. Mäntymetsiköiden OS-lannoituksen tuotot ja kustannukset mk/ha kolmella lannoituksella.

Table 10. Total incomes and averpituusboniteettiage costs FIM/ha in three ferti-lizations with OS in pine stands.

keskimääräinen typen määrä (kg/ha) – average amount of nitrogen (kg/ha)	kokonaiskustannukset – total costs	loppupuuston arvon erotus – difference of final stand values	lannoitetun puuston loppuarvo – final value of fertilized stand	harvennustulot – harvesting incomes	kokonaistulot – total incomes
pituusboniteetti 18 – site index 18					
240	3 065	4 215	54 118	3 788	4 938
300	3 576	3 117	53 020	6 103	5 644
360	4 406	3 854	53 756	7 403	6 851
420	5 109	5 410	55 312	7 455	7 756
480	5 882	6 914	56 816	7 715	8 747
540	6 642	7 757	57 659	8 490	9 605
600	7 357	7 838	57 740	9 821	10 302
660	8 174	6 947	56 850	12 219	10 992
720	8 813	7 129	57 032	13 308	11 624
pituusboniteetti 24 – site index 24					
240	3 065	1 178	91 394	8 053	6 166
300	3 576	1 233	91 449	9 343	7 000
360	4 406	1 361	91 577	11 467	8 422
420	5 109	2 012	92 228	12 614	9 517
480	5 882	3 288	93 504	13 341	10 747
540	6 642	5 306	95 522	13 244	11 908
600	7 357	5 968	96 185	14 315	12 926
660	8 174	6 836	97 052	15 386	14 048
720	8 813	7 106	97 322	16 478	14 771
pituusboniteetti 27 – site index 27					
240	3 065	10 235	117 830	–2 352	4 818
300	3 576	11 308	118 903	–2 030	5 702
360	4 406	13 453	121 048	–2 057	6 990
420	5 105	14 802	122 470	–1 731	7 966
480	5 880	15 493	123 148	–623	8 990
540	6 638	13 527	121 243	2 981	9 870
600	7 354	12 407	120 133	5 557	10 610
660	8 174	13 813	121 588	5 862	11 501
720	8 813	15 939	123 534	4 815	11 941

Taulukko 11. Mäntymetsiköiden OS-lannoituksen tuotot ja kustannukset mk/ha neljällä lannoituksella.

Table 11. Total incomes and aver mk/ha age costs FIM/ha in four fertilizations with OS in pine stands.

keskimääräinen typen määrä (kg/ha) – average amount of nitrogen (kg/ha)	kokonaiskustannukset – total costs	loppupuuston arvon erotus – difference of final stand values	lannoitetun puuston loppuarvo – final value of fertilized stand	harvennustulot – harvesting incomes	kokonais tulot – total incomes
<i>pituusboniteetti 18 – site index 18</i>					
320	4 087	3 033	52 935	7 733	6 679
400	4 963	5 494	55 396	7 521	8 052
480	5 945	7 616	57 518	7 773	9 444
560	6 931	7 629	57 532	9 846	10 544
640	7 927	6 942	56 844	12 511	11 526
720	8 920	8 279	58 182	13 251	12 610
800	9 913	10 254	60 156	13 191	13 532
880	10 899	12 068	61 970	13 162	14 331
960	11 853	13 558	63 460	13 163	14 868
<i>pituusboniteetti 24 – site index 24</i>					
320	4 087	2 197	92 413	10 102	8 212
400	4 963	1 617	91 833	13 187	9 841
480	5 945	4 268	94 485	13 259	11 582
560	6 931	6 575	96 791	13 552	13 196
640	7 927	7 330	97 547	15 233	14 636
720	8 920	7 855	98 071	17 007	15 942
800	9 913	9 516	99 733	17 521	17 124
880	10 899	10 989	101 205	18 086	18 176
960	11 853	7 687	97 903	22 927	18 761
<i>pituusboniteetti 27 – site index 27</i>					
320	4 087	12 629	120 224	–1 769	6 773
400	4 963	15 305	122 900	–2 071	8 271
480	5 944	14 594	122 209	992	9 642
560	6 930	12 759	120 382	4 981	10 810
640	7 925	14 445	122 094	5 415	11 935
720	8 917	15 130	122 829	6 713	12 926
800	9 908	14 650	122 479	9 042	13 784
880	10 895	15 027	123 038	10 427	14 559
960	11 853	15 702	124 080	11 340	15 189

Taulukko 12. Kuusimetsiköiden UREA-lannoituksen tuotot ja kustannukset mk/ha kahdella lannoituksella.

Table 12. Total incomes and average costs FIM/ha in two fertilizations with UREA in spruce stands.

keskimääräinen typen määrä (kg/ha) – average amount of nitrogen (kg/ha)	kokonaiskustannukset – total costs	loppupuuston arvon erotus – difference of final stand values	lannoitetun puuston loppuarvo – final value of fertilized stand	harvennustulot – harvesting incomes	kokonaistulot – total incomes
<i>pituusboniteetti 24 – site index 24</i>					
160	1 559	1 143	68 364	483	67
200	1 706	1 865	69 086	294	453
240	1 960	1 297	68 518	1 374	711
280	2 242	1 338	68 559	1 821	917
320	2 535	1 556	68 777	2 065	1 086
360	2 779	1 637	68 858	2 473	1 331
400	3 087	1 295	68 516	3 278	1 486
440	3 396	1 703	68 924	3 336	1 643
480	3 705	1 981	69 202	3 495	1 771
<i>pituusboniteetti 27 – site index 27</i>					
160	1 559	600	76 205	586	–373
200	1 706	1 524	77 129	–13	–195
240	1 960	2 129	77 735	–239	–70
280	2 242	2 524	78 130	–237	45
320	2 535	2 826	78 432	–170	121
360	2 779	3 394	79 000	–375	240
400	3 087	3 695	79 301	–289	319
440	3 396	3 862	79 468	–79	387
480	3 705	4 012	79 618	90	397

Taulukko 13. Kuusimetsiköiden UREA-lannoituksen tuotot ja kustannukset mk/ha kolmella lannoituksella.

Table 13. Total incomes and average costs FIM/ha in three fertilizations with UREA in spruce stands.

keskimääräinen typen määrä (kg/ha) – average amount of nitrogen (kg/ha)	kokonaiskustannukset – total costs	loppupuuston arvon erotus – difference of final stand values	lannoitetun puuston loppuarvo – final value of fertilized stand	harvennustulot – harvesting incomes	kokonaistulot – total incomes
<i>pituusboniteetti 24 – site index 24</i>					
240	2 338	2 559	69 780	350	571
300	2 485	774	67 959	2 668	957
360	2 872	1 138	68 346	3 257	1 523
420	3 246	1 822	69 037	3 314	1 890
480	3 647	645	67 866	5 188	2 186
540	4 068	–219	67 002	6 710	2 423
600	4 465	–1 151	66 070	8 225	2 609
660	4 940	–745	66 476	8 490	2 805
720	5 326	–162	67 059	8 280	2 792
<i>pituusboniteetti 27 – site index 27</i>					
240	2 338	1 669	77 275	434	–235
300	2 485	2 242	77 848	290	47
360	2 876	3 022	78 627	211	357
420	3 249	3 546	79 152	246	543
480	3 647	4 290	79 896	94	737
540	4 068	4 861	80 467	75	868
600	4 465	5 393	80 999	23	951
660	4 940	5 828	81 434	118	1 006
720	5 326	5 978	81 584	287	939

Taulukko 14. Kuusimetsiköiden UREA-lannoituksen tuotot ja kustannukset mk/ha neljällä lannoituksella.

Table 14. Total incomes and average costs FIM/ha in four fertilizations with UREA in spruce stands.

keskimääräinen typen määrä (kg/ha) – average amount of nitrogen (kg/ha)	kokonaiskustannukset – total costs	loppupuuston arvon erotus – difference of final stand values	lannoitetun puuston loppuarvo – final value of fertilized stand	harvennustulot – harvesting incomes	kokonaistulot – total incomes
pituusboniteetti 24 – site index 24					
320	3 118	254	67 475	3 946	1 082
400	3 416	1 573	68 794	3 658	1 815
480	3 887	–335	66 886	6 457	2 235
560	4 388	–1 219	66 002	8 185	2 578
640	4 920	–767	66 391	8 476	2 790
720	5 461	–45	67 177	8 331	2 825
800	6 020	1 083	67 564	7 699	2 766
880	6 587	2 351	67 525	6 878	2 650
960	7 163	5 556	66 485	4 176	2 569
pituusboniteetti 27 – site index 27					
320	3 118	2 725	78 331	303	–90
400	3 416	3 628	79 234	201	413
480	3 887	4 512	80 118	108	733
560	4 388	5 224	80 830	86	922
640	4 920	5 747	81 353	149	976
720	5 461	6 121	81 727	251	911
800	6 020	6 366	81 972	359	705
880	6 587	6 553	82 158	414	380
960	7 163	6 725	82 331	318	–120

Taulukko 15. Kuusimetsiköiden OS-lannoituksen tuotot ja kustannukset mk/ha kahdella lannoituksella.

Table 15. Total incomes and average costs FIM/ha in two fertilizations with OS in spruce stands.

keskimääräinen typen määrä (kg/ha) – average amount of nitrogen (kg/ha)	kokonaiskustannukset – total costs	loppupuuston arvon erotus – difference of final stand values	lannoitetun puuston loppuarvo – final value of fertilized stand	harvennustulot – harvesting incomes	kokonaistulot – total incomes
pituusboniteetti 24 – site index 24					
160	2 044	131	67 352	3 645	1 732
200	2 555	1 316	68 537	3 347	2 108
240	3 065	2 054	69 275	3 483	2 472
280	3 576	237	67 458	5 998	2 659
320	4 087	430	67 651	6 527	2 870
360	4 598	-933	66 288	8 613	3 082
400	5 109	-136	67 085	8 539	3 294
440	5 620	688	67 909	8 359	3 427
480	6 131	1 539	68 760	7 961	3 369
pituusboniteetti 27 – site index 27					
160	2 044	3 414	79 020	-702	668
200	2 555	3 769	79 375	-319	895
240	3 065	4 419	80 024	-336	1 018
280	3 576	4 905	80 510	-215	1 114
320	4 087	5 281	80 887	-40	1 154
360	4 598	5 731	81 337	123	1 256
400	5 109	6 255	81 860	143	1 289
440	5 620	6 524	82 130	399	1 303
480	6 131	6 721	82 327	653	1 243

Taulukko 16. Kuusimetsiköiden OS-lannoituksen tuotot ja kustannukset mk/ha kolmella lannoituksella.

Table 16. Total incomes and average costs FIM/ha in three fertilizations with OS in spruce stands.

keskimääräinen typen määrä (kg/ha) – average amount of nitrogen (kg/ha)	kokonaiskustannukset – total costs	loppupuuston arvon erotus – difference of final stand values	lannoitetun puuston loppuarvo – final value of fertilized stand	harvennustulot – harvesting incomes	kokonaistulot – total incomes
<i>pituusboniteetti 24 – site index 24</i>					
240	3 065	2 843	70 064	3 166	2 944
300	3 576	-1 599	65 622	8 344	3 169
360	4 406	-247	66 974	8 384	3 731
420	5 109	744	67 965	8 399	4 034
480	5 882	1 262	68 483	8 861	4 241
540	6 642	49	67 270	10 867	4 274
600	7 357	-991	66 230	12 531	4 183
660	8 174	-1 918	65 303	14 143	4 051
720	8 813	-1 626	65 595	14 313	3 874
<i>pituusboniteetti 27 – site index 27</i>					
240	3 065	4 422	80 028	119	1 476
300	3 576	5 179	80 785	51	1 654
360	4 400	5 328	81 586	880	1 808
420	5 101	5 935	82 235	1 035	1 869
480	5 882	7 375	82 981	448	1 941
540	6 642	7 612	83 218	891	1 861
600	7 357	6 886	82 492	2 112	1 641
660	8 174	5 372	80 978	4 114	1 312
720	8 813	3 981	79 587	5 759	927

Taulukko 17. Kuusimetsiköiden OS-lannoituksen tuotot ja kustannukset mk/ha neljällä lannoituksella.

Table 17. Total incomes and average costs FIM/ha in four fertilizations with OS in spruce stands.

keskimääräinen typen määrä (kg/ha) – average amount of nitrogen (kg/ha)	kokonaiskustannukset – total costs	loppupuuston arvon erotus – difference of final stand values	lannoitetun puuston loppuarvo – final value of fertilized stand	harvennustulot – harvesting incomes	kokonaistulot – total incomes
pituusboniteetti 24 – site index 24					
320	4 087	–548	66 673	8 601	3 966
400	4 963	839	68 060	8 507	4 383
480	5 945	–1 089	66 132	11 508	4 474
560	6 931	–2 678	64 543	13 961	4 352
640	7 923	–2 552	64 477	14 588	4 113
720	8 912	–1 617	64 504	14 311	3 782
800	9 912	1 408	62 766	12 131	3 627
880	10 899	2 848	63 777	10 935	2 884
960	11 853	4 437	65 366	9 400	1 984
pituusboniteetti 27 – site index 27					
320	4 087	5 921	81 527	232	2 066
400	4 963	6 060	82 408	1 089	2 186
480	5 943	7 068	82 771	1 081	2 206
560	6 931	6 290	81 896	2 561	1 920
640	7 927	5 444	81 051	3 936	1 453
720	8 920	4 927	80 534	4 849	856
800	9 913	4 515	80 121	5 510	112
880	10 899	4 246	79 852	5 887	–766
960	11 853	4 050	79 655	5 999	–1 804

Taulukko 18. Kuusimetsiköiden metsän NP-lannoituksen tuotot ja kustannukset mk/ha kahdella lannoituksella.

Table 18. Total incomes and average costs FIM/ha in two fertilizations with N and P in spruce stands.

keskimääräinen typen määrä (kg/ha) – average amount of nitrogen (kg/ha)	kokonaiskustannukset – total costs	loppupuuston arvon erotus – difference of final stand values	lannoitetun puuston loppuarvo – final value of fertilized stand	harvennustulot – harvesting incomes	kokonaistulot – total incomes
pituusboniteetti 24 – site index 24					
160	2 576	1 592	68 813	3 220	2 236
200	3 220	–16	67 205	5 930	2 694
240	3 864	203	67 424	6 853	3 192
280	4 508	–550	66 671	8 555	3 497
320	5 152	–517	66 704	9 377	3 708
360	5 796	197	67 418	9 700	4 101
400	6 440	1 001	68 222	9 810	4 371
440	7 084	941	68 162	10 686	4 543
480	7 728	–556	66 665	12 789	4 505
pituusboniteetti 27 – site index 27					
160	2 576	3 908	79 513	–195	1 137
200	3 220	4 911	80 517	–269	1 422
240	3 853	3 526	80 802	1 923	1 596
280	4 495	5 216	82 095	1 003	1 724
320	5 132	5 180	82 766	1 685	1 733
360	5 783	4 399	81 277	3 203	1 819
400	6 440	5 686	81 292	2 711	1 957
440	7 084	5 080	80 685	3 864	1 860
480	7 728	5 312	80 918	4 178	1 762

Taulukko 19. Kuusimetsiköiden metsän NP-lannoituksen tuotot ja kustannukset mk/ha kolmella lannoituksella.

Table 19. Total incomes and average costs FIM/ha in three fertilizations with N and P in spruce stands.

keskimääräinen typen määrä (kg/ha) – average amount of nitrogen (kg/ha)	kokonaiskustannukset – total costs	loppupuuston arvon erotus – difference of final stand values	lannoitetun puuston loppuarvo – final value of fertilized stand	harvennustulot – harvesting incomes	kokonaistulot – total incomes
pituusboniteetti 24 – site index 24					
240	3 864	–872	66 349	8 505	3 769
300	4 508	216	67 437	8 600	4 308
360	5 554	711	67 932	9 753	4 910
420	6 440	–1 268	65 953	12 822	5 114
480	7 414	–1 527	65 694	14 285	5 344
540	8 372	–1 135	66 086	14 945	5 438
600	9 273	–266	66 955	14 959	5 420
660	10 304	641	67 862	14 980	5 317
720	11 109	1 521	68 742	14 579	4 991
pituusboniteetti 27 – site index 27					
240	3 864	5 800	81 406	214	2 150
300	4 502	3 143	81 893	3 561	2 202
360	5 543	3 900	82 476	4 167	2 524
420	6 427	3 243	81 712	5 729	2 545
480	7 396	3 632	81 487	6 356	2 592
540	8 362	2 188	78 931	8 678	2 504
600	9 273	1 623	77 229	9 998	2 348
660	10 304	207	75 813	12 078	1 981
720	11 109	690	76 295	11 998	1 579

Taulukko 20. Kuusimetsiköiden metsän NP-lannoituksen tuotot ja kustannukset mk/ha kolmella lannoituksella.

Table 20. Total incomes and average costs FIM/ha in three fertilizations with N and P in spruce stands.

keskimääräinen typen määrä (kg/ha) – average amount of nitrogen (kg/ha)	kokonaiskustannukset – total costs	loppupuuston arvon erotus – difference of final stand values	lannoitetun puuston loppuarvo – final value of fertilized stand	harvennustulot – harvesting incomes	kokonaisu tulot – total incomes
pituusboniteetti 24 – site index 24					
320	5 152	–872	66 349	8 505	3 769
400	6 256	216	67 437	8 600	4 308
480	7 494	711	67 932	9 753	4 910
560	8 737	–1 268	65 953	12 822	5 114
640	9 991	–1 527	65 694	14 285	5 344
720	11 237	–1 135	66 086	14 945	5 438
800	12 480	–266	66 955	14 959	5 420
880	13 738	641	67 862	14 980	5 317
960	14 940	1 521	68 742	14 579	4 991
pituusboniteetti 27 – site index 27					
320	5 152	2 990	83 051	4 760	2 598
400	6 248	439	79 956	8 504	2 695
480	7 478	838	79 385	9 421	2 781
560	8 721	–987	75 852	12 271	2 563
640	9 991	–1 533	74 028	13 660	2 136
720	11 242	–1 892	73 613	14 571	1 437
800	12 493	–2 286	73 147	15 321	542
880	13 738	–2 898	72 707	16 065	–571
960	14 940	–3 419	72 187	16 486	–1 873

Taulukko 21. Lineaariset trendit, selitysasteet ja 95 %:n luottamusvälit tuotto- ja kustannuskomponenteille.

Table 21. Linear trends, coefficients of determination, 95 % confidential limits for income and cost components.

selitettävä muuttuja – depended variable	a	b	selitysaste – Coefficient of determination	95 % luottamusvälin alaraja – 95 % conf. lower limit	95 % luottamusvälin yläraja – 95 % conf. upper limit
Mänty tukki – Pine saw-timber (Y1)	-756,37	11,38	0,9336	161,63	214,90
Kuusi tukki – Spruce saw-timber (Y2)	-381,51	6,43	0,8361	126,98	176,94
Mänty kuitu – Pine pulp-wood	(-306,98 + 4,68 x X)		/Y1		
Kuusi kuitu – Spruce pulp-wood	(-473,61 + 6,76 x X)		/Y2		
OS	153,078	-0,550	0,0659	90,66	120,89
UREA	85,077	0,396	0,0039	59,85	176,76
MNP	-47,154	1,720	0,1550	60,00	134,61
Päiväpalkka – Daywages	-1238,90	17,46	0,9805	205,78	249,04
Verot – Taxes	-2060,06	31,5369			

6 Metsälötason laskelmat

6.1 Lineaarinen ohjelmointimalli

Liiketaloustieteessä on käyty paljon keskustelua voiton maksimoinnista yrityksissä. Sen puolustajat ovat sitä mieltä, että tavalla tai toisella mitatun voiton maksimointi on ainoa rationaalinen tavoite yrityksille. He pitävät kritiikkiä hyödyttömänä koska kritiikin esittäjät eivät ole esittäneet mitään parempaa tavoitetta tilalle. Kritiikki perustuu tosiasiaan, että päätöksentekijällä ei päätöksentekohetkellä ole tiedossa kaikkia mahdollisia vaihtoehtoja eikä niiden seuraamuksia. Heidän mielestään yritysten tulisi keskittyä tietyn tyydyttävän tason saavuttamiseen voiton maksimoinnin sijaan. (Johnsen 1968 p. 337, Bellman & Cook 1963, Allen 1960).

Aliarvioimatta jälkimmäistä näkökohtaa tässä tutkimuksessa tavoitteeksi asetettiin lannoitusinvestoinnin pinta-aloilla painotetun sisäisen koron maksimointi. Koska lannoituksiin oletetaan olevan käytettävissä tietty kiinteä rahasumma, on tämä tavoite järkevä. Voidaan olettaa, että lannoitettu metsäpinta-ala määrittää tuotoksen määrän ja tietysti sisäisen koron tietyissä rajoissa (ks. esim. Searle 1971). Oteetaan käyttöön seuraavat symbolit:

x_{nijk} = lannoitettu pinta-ala puulajia i ikäluokassa j kasvupaikkatyypillä k ja lannoitteella n , ha

= *fertilized area of tree species i at age j in site index k with fertilizer type n , ha*

c_{nijk} = lannoituskustannukset lannoitteella n ikäluokassa j puulajilla i kasvupaikkatyypillä k , mk/ha

= *fertilization costs with fertilizer type n at age j in site index k , FIM/ha*

d_{nijk} = sisäisen koron odotusarvo puulajilla i ikäluokassa j kasvupaikkatyypillä k lannoitteella n , %

= *the expected value of internal rate of return of fertilization of tree species i of age j in site index k with fertilizer type n , %*

e_{nijk} = lannoitteen n määrä, joka levitetään puulajin i metsiköihin ikäluokassa j kasvupaikkatyypillä k , kg/ha

= *the amount of fertilizer type n spread to stand of tree species i of age j in site index k , kg/ha*

f_k = metsävero kasvupaikkatyypillä k , mk/ha

= *the annual forest taxation for total area of site index k , FIM/ha*

b_{ik} = puulajin i kuorellinen tilavuus kasvupaikkatyypillä k , m³/ha

= *the volume with bark of tree species i in site index k , m³/ha*

B_1 = vuotuinen lannoitusbudjetti, mk ($1 < M$)

- = *annual monetary budget for fertilization during year l (FIM, $l < M$)*
- g_{ijk} = *kuorellinen lannoituksen aiheuttama lisäkasvu puulajilla i kasvupaikalla k ikäluokassa j, m^3/ha*
 = *growth (with bark) due to fertilization of tree species i in site index k at age j, m^3/ha*
- p_n = *lannoitteen n hinta, mk/kg*
 = *the price of fertilizer type n, FIM/kg*
- w = *päiväpalkka, mk/päivä*
 = *day wages, FIM/day*
- G_{ijk} = *puulajin i kuorellinen tilavuuskasvu kasvupaikalla k ikäluokassa j, m^3/ha*
 = *growth (with bark) without fertilization of tree species i in site index k at age j, m^3/ha*
- v_{ik} = *puulajin i kuorellinen tilavuus kasvupaikalla k tutkimusjakson alussa, m^3/ha*
 = *volume (with bark) of the species i in site index k at the beginning of study period, m^3/ha*
- h_{ik} = *puulajia i harvennettu määrä kasvupaikatyyppiltä k, m^3/ha*
 = *total volume of tree species i harvested from stands in the site index of k, m^3/ha*
- a = *lannoituksen yleiskustannuskerroin*
 = *coefficient of overhead costs of fertilization*
- I = *puulajien määrä*
 = *the number of tree species*
- J = *lannoitetun metsikön korkein ikä, vuotta*
 = *maximum age of fertilized stand at the end of study period, yrs*
- K = *kasvupaikatyyppien lukumäärä*
 = *the number of site indexes*
- M = *tutkimusjakson alusta kulunut vuosimäärä, jonka jälkeen lannoituksia ei suoriteta, vuotta*
 = *number of years from the beginning of study period of last possible fertilization, years*
- N = *lannoitteiden lukumäärä*

= number of fertilizer types

Keskimääräiset lannoituskustannukset voidaan laskea perustuen keskimääräisiin työvoimakustannuksiin, lannoitteiden hintoihin, levitettäviin määriin sekä suunnittelu- ja kuljetuskustannuksiin. Metsikkötason laskelmat on esitetty aiemmin tässä tutkimuksessa.

Eri puulajien eri ikäisten eri kasvupaikkatyypeillä kasvavien metsiköiden eri lannoitteilla lannoitettavat määrät voidaan laskea antamalla kunkin x_{nij} -muuttujan vastata tuota lannoitettavaa pinta-alaa. Mallissa on tavoitteeksi asetettu pinta-aloilla painotetun sisäisen koron maksimointi. Aiemmin määriteltyjä symboleja hyväksi käyttäen malli voidaan nyt formuloida seuraavasti:

$$\max \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N x_{nij} d_{nij} / \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N x_{nij}$$

ottaen huomioon, subject to

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N c_{nij} \times x_{nij} \leq B$$

$$\sum_{k=1}^K V_{ik} + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N (G_{ijk} + g_{ijk} \times x_{nij}) - \sum_{k=1}^K h_{ik} \geq \sum_{k=1}^K V_{ik}$$

kaikilla i, for all i

$$x_{nij} \geq 0$$

6.2 Kertoimiin sisältyvä riski

Muuttujilla on todellisuudessa jokin jakauma. Edellä olevassa mallissa on jakaumat korvattu muuttujan odotusarvolla. Koska tulevaisuus on aina epävarmaa, parametrien arvot täytyy ennustaa ja sitä kautta niihin tulee satunnaista virhettä. Yleensä tulisi odotusarvoon liittää tietoa sen todennäköisyydestä (Theil ym. 1965). Käytännössä tämä tehdään ilmoittamalla ennusteen todennäköisin arvo sekä minimi- ja maksimi-arvot, joiden puitteissa ennustettavan muuttujan arvot tietyllä todennäköisyydellä ovat (Törnqvist 1974, Bellman & Dreyfus 1962). Jos tarvitaan tarkempaa ennustetta on yritettävä estimoida muuttujan todennäköisyysjakautuma. Tässä tutkimuksessa on luvussa 7 laskettu funktiot, jotka kuvaavat sisäisen koron odotusarvoja ja hajontoja metsikkötasolla.

Ekonometrinen mallien satunnaisvirhe on usein suurempi kuin fysiikan mallien satunnaisvirhe. Tämä aiheutuu siitä, että ekonometrinen mallien tulos on jopa miljoonien yksittäisten ihmisten vapaan toiminnan tulos (Theil ym. 1965). Lineaarisen

mallin käytössä suurin vaikeus sovellettaessa niitä taloustieteissä on luotettavien parametrien löytäminen.

Koska mallit useinkin käsittelevät tulevaisuuden suunnittelua, ne sisältävät satunnaismuuttujia. Näissä tapauksissa parametrit voivat olla myös arvauksia, jotka heijastelevat päätöksentekijän odotuksia ja toiveita.

Lineaarinen malli voidaan formuloida realistisemmaksi jos muuttujien satunnaisuusluonne otetaan huomioon. Linearisesta mallista tulee stokastinen malli, jos yksikin muuttuja on stokastinen. Stokastiset lineaarisen ohjelmoinnin mallit voidaan jakaa kolmeen ryhmään (Näslund 1967)

- tavallinen stokastinen malli
- lineaarinen ohjelmointi epävarmuuden vallitessa
- riskirajoitteinen malli

Seuraavaksi lähtien tavallisesta lineaarisesta mallista kehitetään riskirajoitteinen malli. Riskirajoitteinen malli poikkeaa lineaarisesta mallista siinä, että mallin kertoimet ovat normaalisti jakautuneita satunnaismuuttujia ja rajoitukset ovat voimassa tietyllä todennäköisyydellä α . Riskirajoitteisesta mallista tulee lineaarinen kun $\alpha = 1$. Todennäköisyys $1-\alpha$ kuvastaa sitä suurinta riskiä, jonka päätöksentekijä on valmis ottamaan sille, ettei rajoitus ole voimassa.

Yleisesti formuloituna lineaarinen malli on muotoa

$$\begin{aligned} \max c^T x \\ Ax \leq b \\ x \geq 0 \end{aligned}$$

ja vastaava riskirajoitteinen malli on muotoa (Näslund 1967)

$$\begin{aligned} \max f(c^T x) \\ P(Ax \leq b) \geq \alpha \\ x \geq 0 \end{aligned}$$

jossa $P(Ax \leq b)$ on todennäköisyys sille, että $Ax \leq b$ on tosi ja f on x :n funktio.

Riskirajoitteisen ohjelmoinnin teoriaa on kehitetty useissa tutkimuksissa (mm. Charnes & Symonds 1958, Charnes & Cooper 1959, Näslund 1967). Esimerkinomaisesti on riskirajoitteista ohjelmointia käyttänyt Laakkonen (1979) tuotantomäärien jakamisessa alueen taimitarhoille. Korvaamalla stokastinen riskirajoitteinen malli deterministisellä mallilla myöhemmin esitettävällä tavalla se voidaan ratkaista käyttäen jotain epälineaarisen ohjelmoinnin menetelmää (Simon 1956, Wilde 1964, Hillier & Liebermann 1967, Fan 1966, Hadley 1964, Bellman & Cook 1963). Näin meneteltäessä täytyy tietää parametrien jakautuma. Riskirajoitteisessa mallissa parametrit oletetaan toisistaan riippumattomiksi ja normaalijakautumaa noudattaviksi.

Jos parametrit eivät ole normaalisti jakautuneita tarvittavat kertoimet voidaan estimoida käyttäen Tsebysevin teoreemaa (Cox & Miller 1965 p. 219, Kaplan 1964). Jos parametrit ovat keskenään riippuvia täytyy tehdä kannan ortogonaalimuunnos (Seppälä 1971) ja kannan muunnoksessa tarvittavat epäyhtälöt tulevat mallin rajoituksiksi (Teicshrow 1964, Murphy 1965). Epälineaarisen deterministisen mallin rat-

kaisussa käytetään tässä tutkimuksessa MINOS-algoritmia, joka olettaa että rajoitukset ovat derivoituvia ja jatkuvia (Simon 1956, Kaplan 1964, Beale 1968).

Paitsi että rajoitukset voivat olla stokastisia voi malli sisältää lineaarisia ja ei-lineaarisia rajoituksia. Algoritmi olettaa, että $0,5 < \alpha < 1$. Käytännössä päätöksentekijä valitsee varmuustason α läheltä 1:stä.

6.3 Hinnoista ja kustannuksista aiheutuva riski

Edellä on oletettu, että sisäisen koron odotusarvo on tunnettu. Samoin oletetaan, että hinnoista ja kustannuksista aiheutuva riski sisältyy sisäisen koron jakautumiin, jotka on aiemmin laskettu simuloimalla tässä tutkimuksessa. Sisäisten korkojen oletetaan noudattavan normaalijakautumaa vaikka ne itse asiassa noudattavat t-jakautumaa. Voidaan osoittaa, että vapausasteiden kasvaessa t-jakautuma lähenee normaalijakautumaa, joten tässä tehtävä pieni virhe on lähinnä teoreettinen (ks. Dudencicz & Mishra 1988). Kustannukset lasketaan samalla tavalla kuin kannattavuussimuloinneissa eli

$$c_{nij k} = (\max(e_{nij k} / (250, 1) \times w + e_{nij k} \times p_n) \times a$$

6.4 Kasvunlisäyksen vaihtelusta aiheutuva riski

Lannoituksen aiheuttama kasvunlisäys vaihtelee puulajeittain, pituusboniteeteittain jne. Tämä on huomioitu simuloitaessa sisäisiä korkoja, joten sisäisten korkojen jakautumat sisältävät myös kasvunlisäyksen vaihtelusta aiheutuvan vaihtelun.

6.5 Riskirajoitteinen malli

MINOS-algoritmia voidaan käyttää ratkaisemaan riskirajoitteisia ohjelmointitehtäviä joissa parametrit ovat normaalisti jakautuneita ja toisistaan riippumattomia.

Seuraavassa odotusarvo-operaattoria merkitään μ :lla ja hajontaoperaattoria σ :lla. Tästä seuraa, että (ks. Theil ym. 1965)

$$c_{nij k} = N(a \times e_{nij k} \times \mu(w) + a \times e_{nij k} \times \mu(p_n), \sigma^2(w) \times \sigma^2(p_n))$$

missä

$$w \sim N(\mu(w), \sigma^2(w))$$

$$p_n \sim N(\mu(p_n), \sigma^2(p_n))$$

Nyt aiemmin tässä luvussa esitettyä lineaarista mallia vastaa riskirajoitteinen malli:

$$\max \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N x_{nij k} (d_{nij k}) / \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N x_{nij k}$$

ottaen huomioon, subject to

$$P \left(\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N c_{nij} \times x_{nij} \leq B \right) \geq \alpha$$

$$P \left(\sum_{k=1}^K V_{ik} + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N (G_{ijk} + g_{ijk} \times x_{nij}) - \sum_{k=1}^K h_{ik} \geq \sum_{k=1}^K V_{ik} \right) \geq \alpha$$

kaikilla i, for all i

$$x_{nij} \geq 0$$

Koska sisäiset korot ovat satunnaismuuttujia, täytyy tehdä fraktilimuunnos (ks. Geoffrion 1967, Sengupta & Portillo-Gambell 1970), jotta malli olisi sopiva riskirajoitteiseksi malliksi ja samalla otetaan käyttöön apumuuttujia q

min q

ottaen huomioon, subject to

$$P \left(-q + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N x_{nij} d_{nij} / \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N x_{nij} \leq 0 \right) \geq \alpha$$

(muut rajoitukset kuten edellä) ja $q \geq 0$.

Kun merkitään

$F^{-1}(\alpha) = K_a, F^{-1}(\alpha_{jk}) = K_{ajk}$ ja $F^{-1}(\alpha_j) = K_{aj}$ missä F on kertymäfunktio $N \sim (0,1)$ muuttujalle, saa malli lopullisen muotonsa (ks. Seppälä 1971).

min q

ottaen huomioon, subject to

$$-q + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \mu(d_{nij}) \times x_{nij} / \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N x_{nij} +$$

$$K_{\alpha} \left(\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \sigma^2(d_{nij}) \times x_{nij}^2 / \right.$$

$$\left. \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \sigma^2(d_{nij} \times x_{nij}^2) \right)^{1/2}$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \mu(c_{nij}) \times x_{nij}$$

$$K_{\alpha j} \left(\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \sigma^2(c_{nij}) \times x_{nij}^2 \right)^{1/2} \leq \mu(B)$$

$$\sum_{k=1}^K V_{ik} + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \mu(G_{ijk} + g_{ijk} \times x_{nij}) +$$

$$K_{\alpha} \left(\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \sigma^2(G_{ijk} + g_{ijk} \times x_{nij}^2) \right)^{1/2} -$$

$$\sum_{k=1}^K h_{ik} \geq \sum_{k=1}^K \mu(V_{ik}), i = 1, 2, \dots, I$$

$$x_{nij} \geq 0$$

$$q \geq 0$$

Ensimmäinen yhtälö kuvaa sitä, että tavoitteeksi on asetettu pinta-aloilla painotetun sisäisen koron maksimointi. Toinen yhtälöistä kuvaa sitä riskiä $1-\alpha$, jonka päätöksentekijä on valmis ottamaan, ettei lannoitusbudjettia koskeva rajoitus toteudu. Tämä tarkoittaa sitä, että lannoitusbudjetti mahdollisesti ylitetään tai alitetaan. $K_{\alpha j}$ on vastaava normaalijakauman kerroin ko. riskitasolla. Kolmas yhtälöistä kuvaa sitä, että loppupuuston on tutkimusjakson lopussa oltava vähintään alkupuuston suuruinen kaikilla puolajeilla. Riskitason $1-\alpha$ eli todennäköisyyden α , millä tavoite eli mallin kannalta rajoitusepäyhtälö toteutuu, voi päätöksentekijä valita tavoitekohtaisesti.

7 Tulokset

7.1 Kannattavuus metsikkötasolla

7.1.1 Lannoitusten lukumäärä

Tutkimuksessa lannoitusten lukumäärä vaihteli kahdesta neljään siten, että viimeisen lannoituksen ja tarkastelujakson loppuajankohdan välinen aika oli aina 6 vuotta.

Keskimääräinen nimellinen sisäinen korko kasvaa nyt saatujen tulosten mukaan männiköissä neljään lannoituskertaan asti (esimerkkejä kuvissa 11–17). Erot kolmen ja neljän lannoituskerran keskimääräisten sisäisten korkojen välillä ovat männiköissä pieniä, enimmillään vain n. 0,5 prosenttiyksikköä. Kuusikoissa sisäisten korkojen odotusarvojen erotus kasvaa lannoituskertojen lukumäärän kasvaessa ollen suurimmillaan neljä kertaa lannoitettaessa. Toisaalta kun hajonnatkin käyttäytyvät lannoituskertojen funktiona samalla tavalla kuin vastaavat odotusarvot voidaan männiköissä kolmea ja neljää lannoituskertaa pitää parhaimpina lannoitusvaihtoehtoina paitsi parhaalla kasvupaikalla, jossa neljä lannoituskertaa antaa sisäisen koron kannalta selvästi parhaan tuloksen. Kuusikoissa paras sisäinen korko saavutetaan neljä kertaa lannoitettaessa.

Tässä tutkimuksessa männikön eri valtapituuden mukaisilla kasvupaikoilla 18, 24 ja 27 olivat sisäisen koron odotusarvot kaksi kertaa lannoitettaessa 14,8 %, 26,1 % ja 21,2 %. Vastaavat keskihajonnat olivat 8,5 %, 17,3 % ja 13,9 %. Kolme kertaa lannoitettaessa 15,3 %, 26,3 % ja 21,4 % ja keskihajonnat vastaavasti 6,8 %, 14,7 % ja 12,0 % sekä neljä kertaa lannoitettaessa 15,6 %, 26,3 % ja 22,4 % ja vastaavat keskihajonnat olivat tällöin 6,0 %, 14,2 % ja 12,7 % (vrt. Laakkonen 1989). Kuusikon eri valtapituuden mukaisilla kasvupaikoilla 24 ja 27 saatiin sisäiseksi koroiksi kaksi kertaa lannoitettaessa 8,7 % ja 1,8 % vastaavien keskihajontojen ollessa 5,2 % ja 13,3 %, kolme kertaa lannoitettaessa 7,9 % ja 2,9 % ja keskihajonnat 3,7 % ja 4,0 % sekä neljä kertaa lannoitettaessa 7,9 % ja 3,1 % ja vastaavat keskihajonnat 3,3 % ja 4,3 %. Urealannoituksilla saatuja tuloksia kummallakin puulajilla heikensivät kevätlevitykset. Syyslevityksillä päästään urealla samalla typpimäärällä parhaassa tapauksessa samaan tulokseen kuin oulunsalpietarilla yleensä.

Simuloinnit suoritettiin Monte-Carlo -menetelmää käyttäen (ks. Naylor & Vernon 1969). Odotusarvojen ja keskihajontojen perusteella voidaan päätellä, että männiköissä on todennäköistä saavuttaa positiivinen sisäinen korko hyvin suurella todennäköisyydellä kun taas kuusikoissa pituusboniteetilla 27 se ei ole kovinkaan todennäköistä sen sijaan kuusen pituusboniteetilla 24 on hyvin todennäköistä päästä positiiviseen sisäiseen korkoon. Sisäisten korkojen kehitys on laskettu myös funktiomuotoon, mistä on esimerkkejä taulukoissa 23–27. Yksityiskohtaisemmin sisäisen koron odotusarvot ja keskihajonnat on esitetty esimerkkikuvissa 11–17.

Kaiken kaikkiaan, kun kaikkien muiden tekijöiden vaikutus on eliminoitu yhdistämällä tulokset, voidaan todeta, ettei lannoitusten lukumäärällä ole kovin suurta merkitystä lannoituksen kannattavuuteen. Näin ei kuitenkaan ole kaikissa tapauksissa. Esimerkkikuvissa 11–17 nähdään lannoituskertojen ja sisäisten korkojen välinen riippuvuus eri ikäluokissa. Pääsääntöisesti kannattavuus kasvaa lannoitusten lukumäärän kasvaessa. Kaikkein selvimmin näin tapahtuu vanhimpien ikäluokkien männiköissä. Aiemmissa kertalannoituksen kannattavuutta koskevissa tutkimuksissa on saatu samantasoisia sisäisiä korkoja (esim. Keipi & Laakkonen 1980, Laakkonen

ym. 1983). Nyt sisäistä korkoa näihin tutkimuksiin verrattuna oli omiaan pienentämään erityisesti investoinnin pidempi laskennallinen pitoaika.

Edellisessä kappaleessa sisäisiä korkoja vastaavat nykyarvot olivat männiköissä 5 %:n laskentakorkokantaa sovellettaessavaltapituuksien 18, 24 ja 27 mukaisilla kasvupaikoilla kaksi kertaa lannoitettaessa 2 130, 3 660 ja 3 330 mk/ha, kolme kertaa lannoitettaessa 3 070, 3 360 ja 2 490 mk/ha sekä neljä kertaa lannoitettaessa 2 130, 5 630 ja 2 470 mk/ha. 9 %:n laskentakorolla vastaavat luvut olivat 700, 1 990 ja 1 750 mk/ha kaksi kertaa lannoitettaessa, 1 170, 2 490 ja 3 360 mk/ha kolme kertaa lannoitettaessa sekä 2130, 3010 ja 2470 mk/ha neljä kertaa lannoitettaessa. Vastaavat luvut kuusikoissa 5 %:n korolla pituusboniteeteilla 24 ja 27 olivat 301 ja -290, 530 ja -290 sekä 642 ja -390 mk/ha. 9 %:n laskentakorolla vastaavat luvut olivat kuusikoissa olivat kaikki negatiivisia vaihdellen -200 ja -3 000 mk/ha välillä pituusboniteetista ja lannoitusten lukumäärästä riippuen. Myös nykyarvoja tarkasteltaessa kolmea ja neljää lannoituskertaa voidaan pitää parhaimpina vaihtoehtoina. Esimerkkejä histogrammitulostuksesta kuvissa on esitetty kuvissa 18–22.

30 %:n suuruinen metsänparannustuki parantaa lannoituksen kannattavuutta n. 5–10 prosenttiyksikköä sisäisenä korkona asiaa tarkastellen. Parannuksen suuruus riippuu ilman metsänparannusrahoitusta saavutetusta koron tasosta, lannoitteen määrästä ja lannoitelajista. Tällöin myös kuusikoissa pituusboniteetilla 27 päästään positiivisiin sisäisiin korkoihin. Nykyarvot nousevat metsänparannusrahoituksella 1 000–2 000 mk/ha.

7.1.2 Lannoitettavan metsikön ikä

Suurin vaikutus lannoituksen kannattavuuteen on metsikön iällä. Tämä asia käy selvästi ilmi kuvista 11–17, joissa on esimerkinomaisesti esitetty keskimääräisen nimellisen sisäisen koron ja lannoitettavan metsikön iän välinen riippuvuus kun muiden korkoon vaikuttavien tekijöiden vaikutus on eliminoitu luokittelemalla aineisto vain iän perusteella. Tällöin siis ikäluokan sisällä lannoitusten lukumäärä, lannoitelajikombinaatio ja lannoitemäärä vaihtelevat aiemmissä luvuissa esitetyllä tavalla. Vaihtelu on luokkien sisällä samanlaista.

Männiköistä keskimäärin parhaita lannoituskohteita ovat ensilannoitushetkellä 45–65-vuotiaat metsiköt kasvupaikkatyypistä riippuen (vrt. Hämäläinen ym. 1989). Valtapituuksien 18, 24 ja 27 mukaisilla pituusboniteeteilla saavutettiin parhaimmillaan 22,2, 40,9 ja 40,6 %:n nimelliset sisäiset korot. Nämä tulokset saavutettiin pituusboniteetilla 18 ikäluokassa 65, pituusboniteetilla 24 ikäluokassa 65 ja pituusboniteetilla 27 ikäluokassa 55 vuotta. Kuusikoissa paras tulos saavutettiin pituusboniteetilla 24 ikäluokassa 65 vuotta sisäisen koron ollessa tuolloin 22,8 % ja pituusboniteetilla 27 ikäluokassa 45 sisäisen koron ollessa 5,7 %. Sisäisten korkojen keskihajonnat kasvavat odotusarvojen kasvaessa. Kasvatusmetsiköissä lannoituksen hyvä kannattavuus nuoriin ja vastaavasti hyvin varttuneisiin metsiköihin nähden perustuu lähinnä siihen, että lannoitus nopeuttaa siirtymää kuitupuusta tukkipuuksi eli lannoitus nopeuttaa kuitupuuta arvokkaamman tukkipuun sekä suhteellista että absoluuttista kasvua. Puusto myös ylipäättään järeytyy lannoitusten vaikutuksesta. Siirtymä kuitupuusta tukkipuuhun tapahtuu sitä nuoremmalla iällä mitä parempi pituusboniteetti on kyseessä. Ensilannoitushetkellä nuorissa ja hyvin varttuneissa päteahakkuuikää lähentelevissä metsiköissä tällaista siirtymää ei siinä määrin tapahdu että se oleellisesti vaikuttaisi kannattavuuteen.

Lannoituksilla aikaansaatu kannattavuuden kohoaminen nuorissa metsissä

perustuu pääasiassa kuitupuun tilavuuskasvun lisääntymiseen ja kuiturunkojen käytöosan järeytymiseen. Vanhoissa metsissä lannoituksiin ryhdyttäessä lähes koko puusto on tukkipuuta. Tällöin lannoitusten aiheuttama tilavuuskasvun lisäys tapahtuu tukkirunkojen järeytymisenä. Muutoksia puutavaralajiosuuksissa ei juurikaan tapahdu. Kun 25-vuotiaissa männiköissä päästiin keskimäärin 9–12 %:n kannattavuuteen sisäisellä korolla mitaten, vanhimmissa jäätiin hieman näiden alle eli 7–10 %:iin. Kuusikoissa vastaavasi päästiin nuorimmassa ikäluokassa 5–6 %:n ja vanhimmissa 3–4 %:n sisäisiin korkoihin. Männiköissä vanhimmissa ikäluokissa hajonta oli jonkin verran pienempi kuin nuorimmassa ikäluokassa. Kuusikoissa tilanne oli selkeästi päinvastainen. Männyllä nuorimmassa ikäluokassa hajontaa lisäsi se, että niissä kuitenkin jonkin verran tapahtui siirtymää kuitupuusta tukkipuuhun kun taas vanhemmissa ikäluokissa siirtymää ei juurikaan tapahdu.

Lannoituksilla aikaansaatuja nykyarvot olivat suurimmillaan samoissa ikäluokissa kuin sisäiset korotkin. Tällöin saavutettiin männiköissä vastaavasti 9 000, 13 500 ja 10 000 mk/ha suuruiset ja kuusikoissakin 5 700 ja 3 000 mk/ha suuruiset diskonttaamattomat nykyarvot.

7.1.3 Lannoitemäärä

Yhdellä lannoituskerralla annetun typen määrä vaihteli tutkimuksessa reilusti nykysuositusten kummankin puolen. Tulosten tarkastelua varten eri lannoitemäärillä saadut nimelliset sisäiset korot ryhmiteltiin keskimääräisen kerta-annoksen mukaisiin luokkiin. Esimerkkikuvissa 11–17 on esitetty keskimääräisen kerta-annoksen ja keskimääräisen sisäisen koron ja koron keskihajonnan välinen riippuvuus ryhmiteltynä vielä lannoituskertojen lukumäärän mukaan. Kuvista voidaan päätellä, että keskimääräisen nimellisen sisäisen koron odotusarvo männiköissä kasvaa keskimääräisen kerta-annoksen kasvaessa hieman nykysuosituksia suuremmaksi eli noin 170–190 kg N/ha asti. Kuusikoissa tulisi suosia nykysuosituksia pienempiä kerta-annoksia.

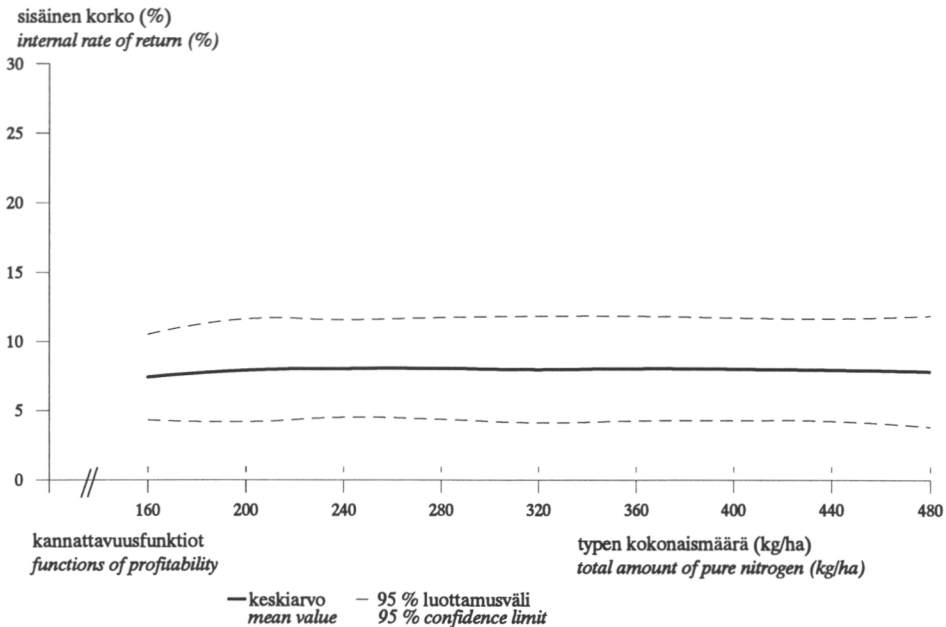
Laskelmien mukaan voidaan myös päätellä, että männiköissä useammin lannoitettaessa voidaan käyttää keskimäärin hieman pienempiä eli noin 170 kg/ha kerta-annoksia kuin harvemmin lannoitettaessa.

Esimerkkikuvista 11–17 käy selville reaalisen sisäisen koron odotusarvon ja hajonnan sekä keskimääräisen kerta-annoksen välinen riippuvuus ryhmiteltynä puulajin, pituusboniteetin, lannoituskertojen lukumäärän ja lannoitettavan metsikön iän mukaan. Näistä kuvista nähdään kannattavuuden ja em. tekijöiden välinen yhteys.

Edellä tässä luvussa on kannattavuutta tarkasteltu keskimääräisen kerta-annoksen eli lähinnä tutkimusjakson aikana annetun kokonaistyyppimäärän mukaan ryhmiteltynä. Simuloinneissa eri kerroilla annetun typen määrä vaihteli välillä 80–240 kg/ha eli reilusti nykysuositusten kummankin puolen, jotta saataisiin tietoa siitä, kuinka paljon kokonaistyyppimäärästä kullakin lannoituskerralla on syytä antaa pyrittäessä maksimoimaan nimellisen sisäisen koron odotusarvoa. Taulukossa 22 on esitetty eri lannoituskerroilla annettavan typen suhteellinen osuus kokonaistyyppimäärästä niissä tapauksissa, joissa keskimäärin saavutettiin paras kannattavuus. Voidaan todeta, että eri lannoituskerroilla pyritään antamaan suurinpiirtein yhtä paljon kokonaistyyppimäärästä paitsi ensimmäisellä lannoituskerralla, jolloin usein annetaan hieman enemmän typpeä kuin muilla lannoituskerroilla. Kahden lannoituksen tapauksessa suurin osa eli noin 60 % lannoitteista levitetään ensilannoituksessa. Näihin seikkoi-

hin lienee sisäisen koron menetelmään nimenomaan aikatekijän vaikutuksesta sisältyvien tekijöiden lisäksi ainakin jossain määrin sisältyvän myös biologisia syitä. Toisaalta kahden lannoituksen tapauksessa jälkimmäinen lannoitus annetaan 12 vuoden kuluttua ensimmäisestä lannoituksesta, jolloin sen tuottoja lisäävä vaikutus on aikatekijän vaikutuksesta pieni ja edellisen lannoituksen vaikutus yleensä jo kokonaan päättynyt (ks. Laakkonen ym. 1983). Tällöinhän kasvun lisäyksen mahdollistamat tuotot saadaan yleensä realisoiduiksi vasta tutkimusjakson lopussa.

Paras kannattavuus männiköissä saavutetaan laskelmien mukaan keskimääräisen kerta-annoksen ollessa 160–200 kg N/ha. Tuntuvasti yli 200 kg:n kerta-annoksiin on suhtauduttava varauksella. Kuusikoita lannoitettaessa tulisi käyttää vain pienempiä 100–120 kg N/ha kerta-annoksia.



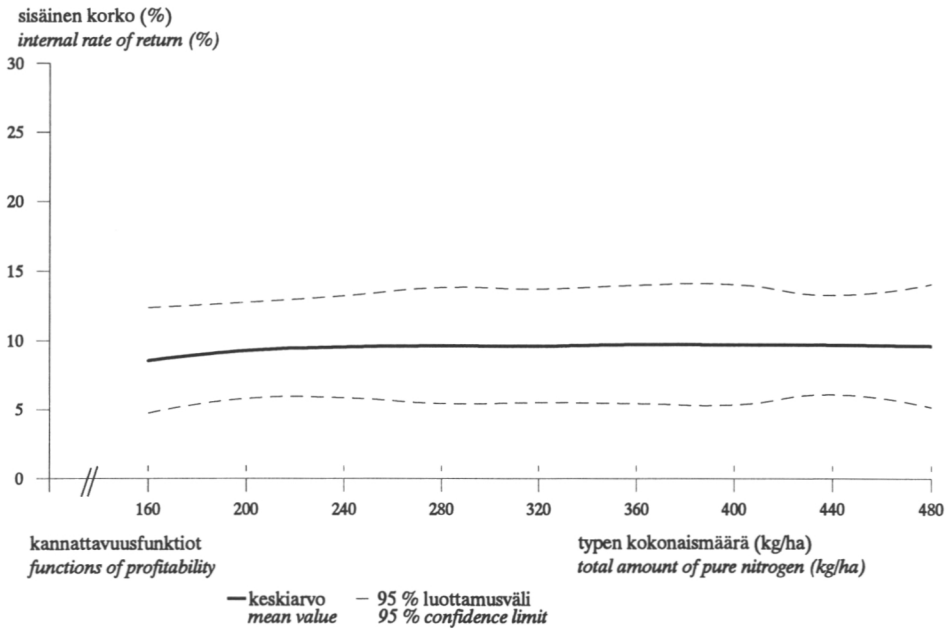
Kuva 11. 35-vuotiaan männikön sisäinen korko (%) pituusboniteettityypillä 18 kahdella lannoituksella.

Figure 11. Internal rate of return (%) in pine stands on site index 18 and age group 35 when fertilized two times.

Taulukko 22. Typpimäärän prosentuaalinen osuus eri lannoituksissa tapauksissa, joissa saavutettiin korkein sisäinen korko.

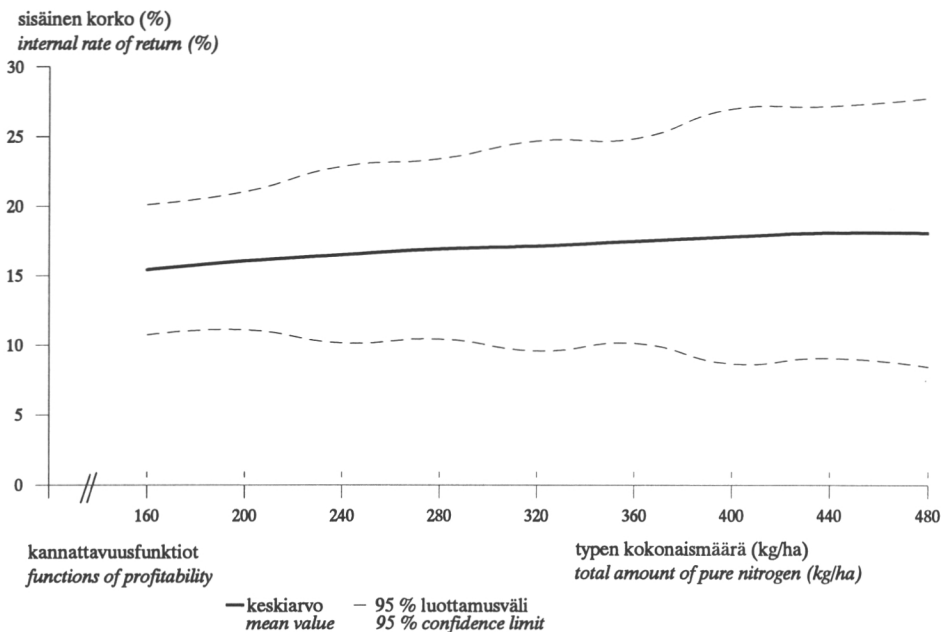
Table 22. The relative amount of nitrogen (%) of total amount of nitrogen in those cases where the highest internal rate of return was obtained.

Lannoitusten lukumäärä <i>Number of fertilizations</i>	Lannoituksen järjestysnumero <i>The ordinary number of fertilization</i>			
	1	2	3	4
Mänty, pituusboniteetti 18 <i>Pine, site index 18</i>				
1	100			
2	47	53		
3	34	25	41	
4	28	20	23	29
Mänty, pituusboniteetti 24 <i>Pine, site index 24</i>				
1	100			
2	52	48		
3	35	28	37	
4	27	19	24	30
Mänty, pituusboniteetti 27 <i>Pine, site index 27</i>				
1	100			
2	57	43		
3	40	25	35	
4	22	33	20	25
Kuusi, pituusboniteetti 24 <i>Spruce, site index 24</i>				
1	100			
2	50	50		
3	30	33	37	
4	24	21	28	26
Kuusi, pituusboniteetti 27 <i>Spruce, site index 27</i>				
1	100			
2	52	48		
3	31	38	31	
4	26	21	26	26



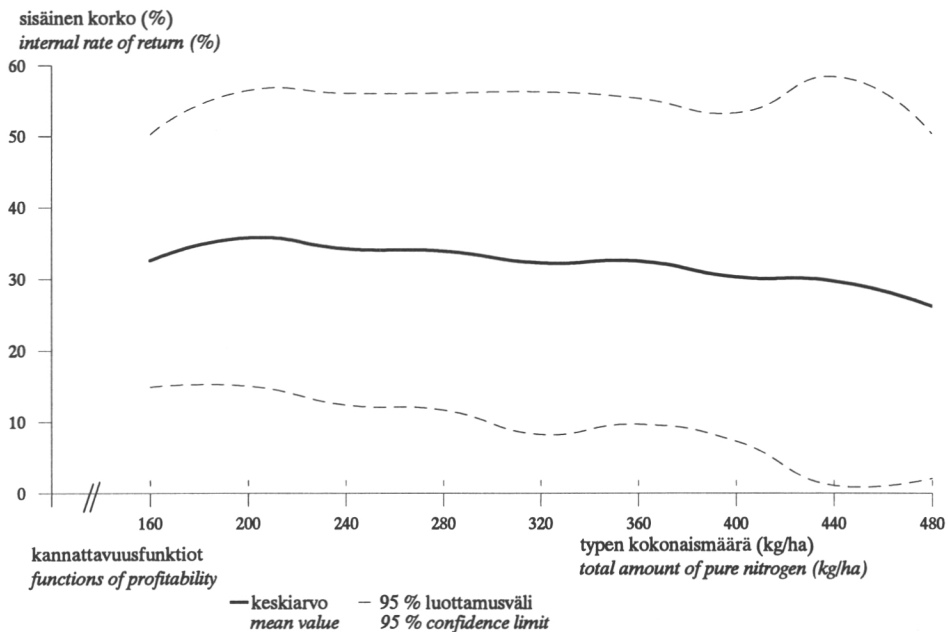
Kuva 12. 45-vuotiaan männikön sisäinen korko (%) pituusboniteettityypillä 18 kahdella lannoituksella.

Figure 12. Internal rate of return (%) in pine stands on site index 18 and age group 45 when fertilized two times.



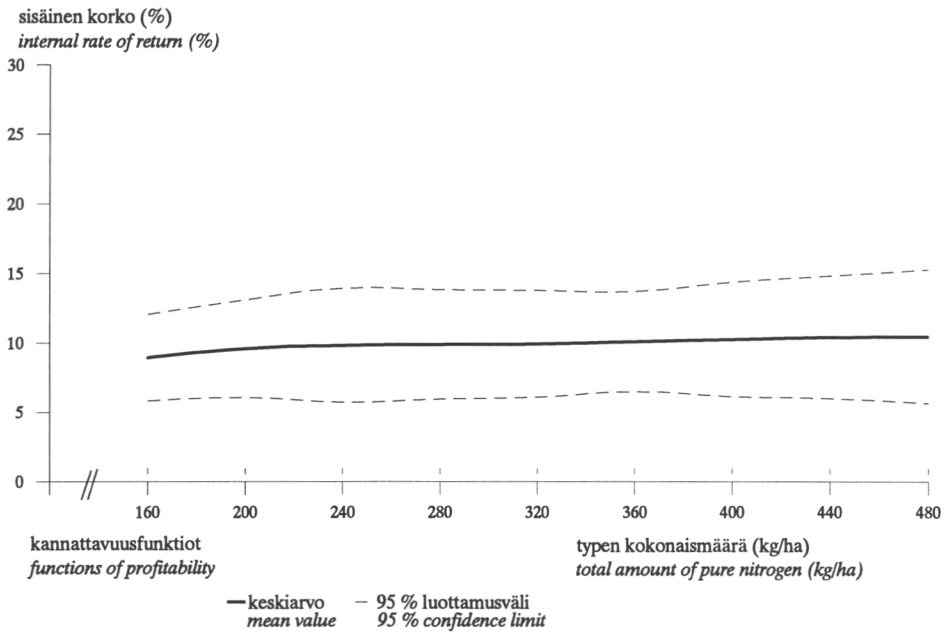
Kuva 13. 55-vuotiaan männikön sisäinen korko pituusboniteetilla 18 kahdella lannoituksella.

Figure 13. Internal rate of return (%) in pine stands on site index 18 and age group 55 when fertilized two times.



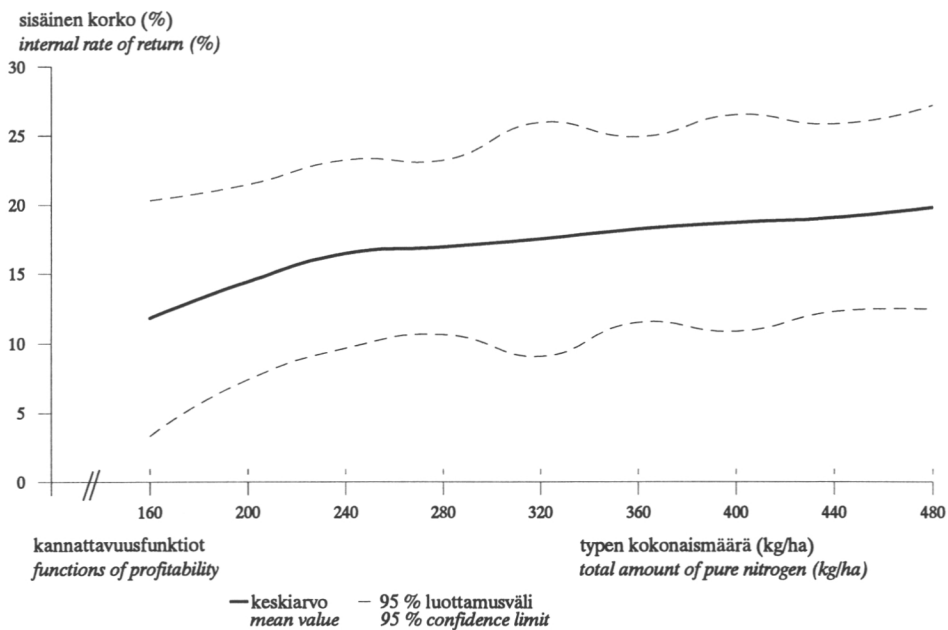
Kuva 14. 65-vuotiaan männikön sisäinen korko pituusboniteetilla 18 kahdella lannoituksella.

Figure 14. Internal rate of return (%) in pine stands on site index 18 and age group 65 when fertilized two times.



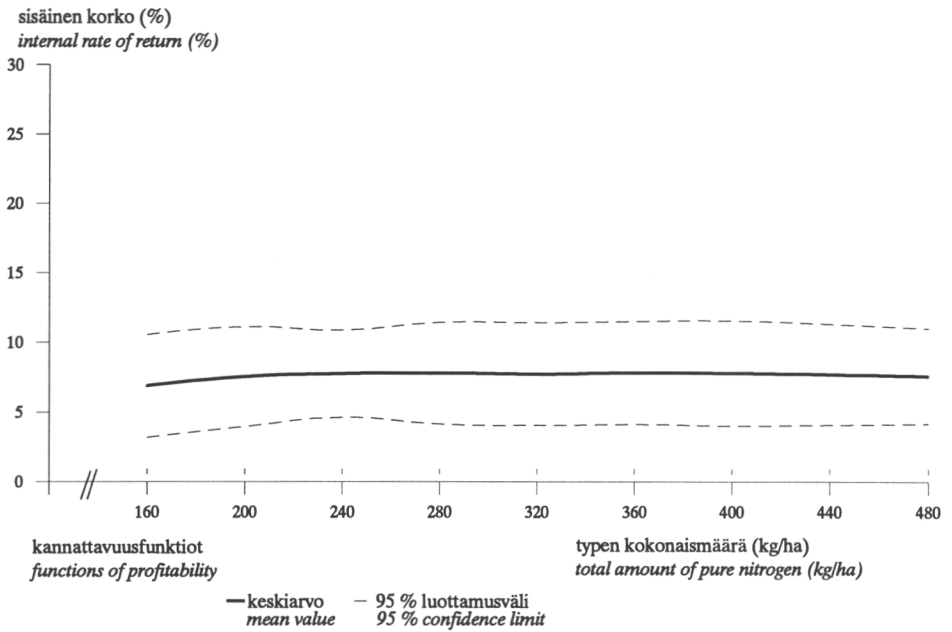
Kuva 15. 75-vuotiaan männikön sisäinen korko pituusboniteetilla 18 kahdella lannoituksella.

Figure 15. Internal rate of return (%) in pine stands on site index 18 and age group 75 when fertilized two times.



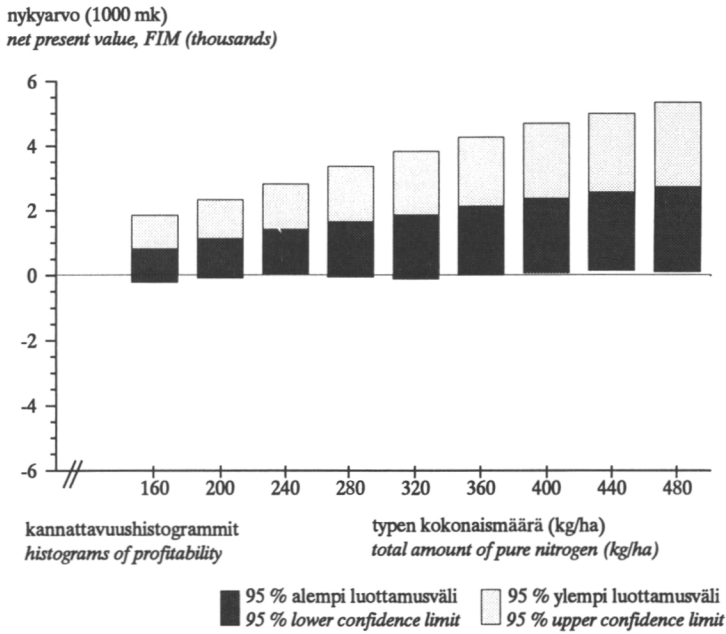
Kuva 16. 85-vuotiaan männikön sisäinen korko pituusboniteetilla 18 kahdella lannoituksella.

Figure 16. Internal rate of return (%) in pine stands on site index 18 and age group 85 when fertilized two times.



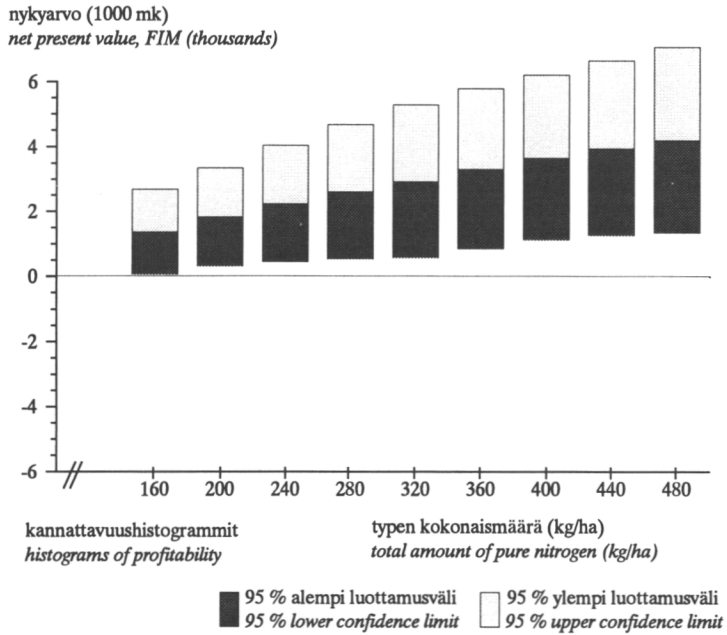
Kuva 17. 95-vuotiaan männikön sisäinen korko pituusboniteetilla 18 kahdella lannoituksella.

Figure 17. Internal rate of return (%) in pine stands on site index 18 and age group 95 when fertilized two times.



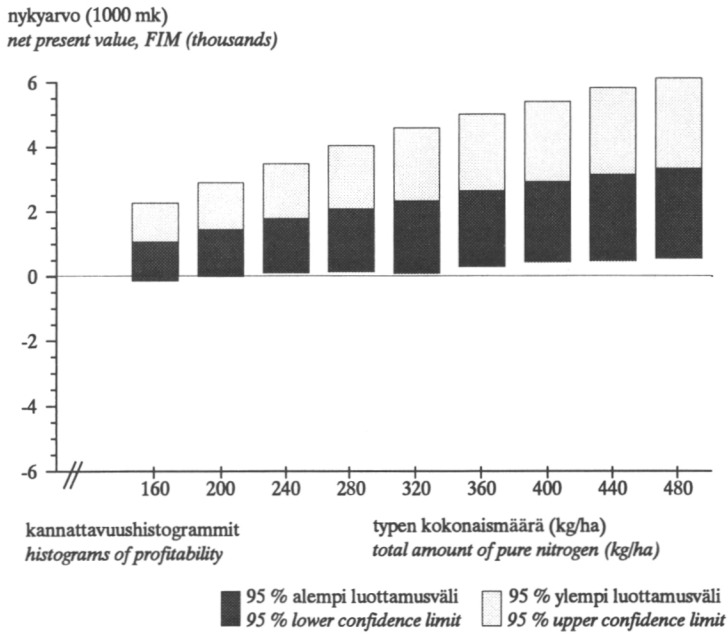
Kuva 18. Männikön nykyarvot pituusboniteetilla 18, kahdella lannoituksella, kaikilla ikäryhmillä ja 5 % korkokannalla.

Figure 18. Net present values (FIM) in pine stands on site index 18 all age groups when fertilized two times when rate of interest is 5 %.



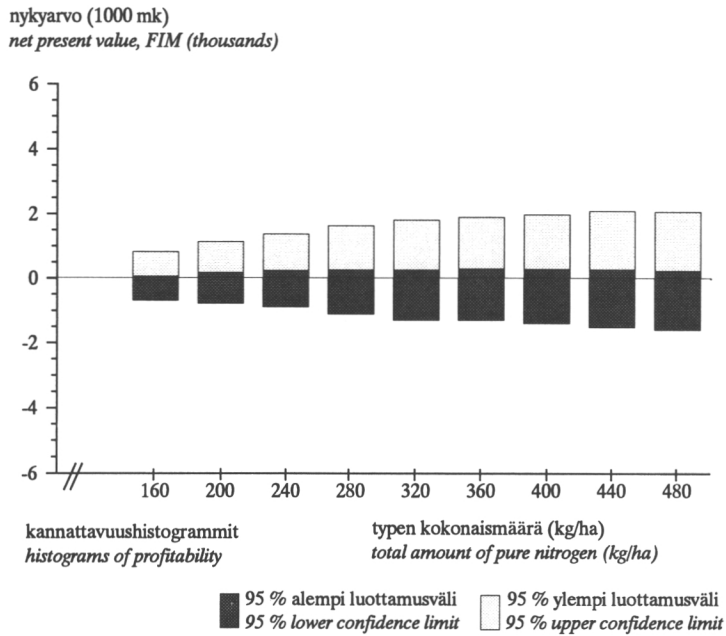
Kuva 19. Männikön nykyarvot pituusboniteetilla 24, kahdella lannoituksella, kaikilla ikäryhmillä ja 5 % korkokannalla.

Figure 19. Net present values (FIM) in pine stands on site index 24 all age groups when fertilized two times when rate of interest is 5 %.



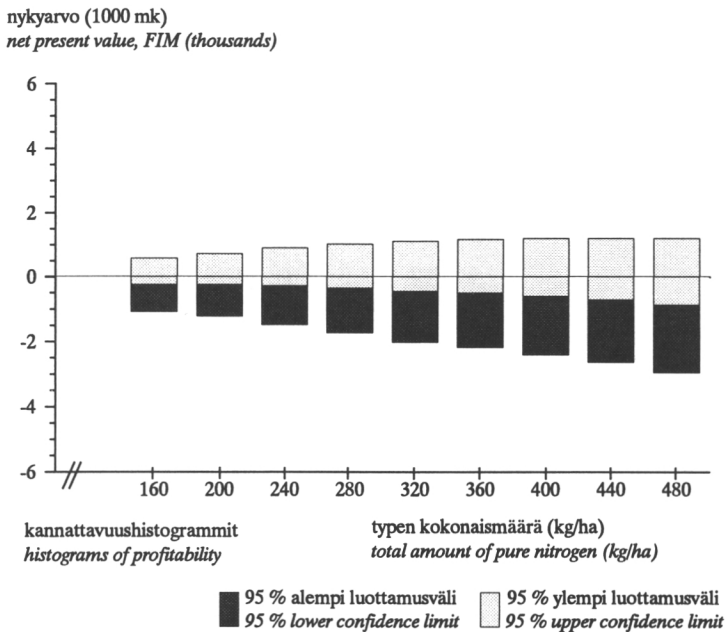
Kuva 20. Männikön nykyarvot pituusboniteetilla 27, kahdella lannoituksella, kaikilla ikäryhmillä ja 5 % korkokannalla.

Figure 20. Net present values (FIM) in pine stands on site index 27 all age groups when fertilized two times when rate of interest is 5 %.



Kuva 21. Kuusikon nykyarvot pituusboniteetilla 24, kahdella lannoituksella, kaikilla ikäryhmillä ja 5 % korkokannalla.

Figure 21. Net present values (FIM) in spruce stands on site index 24 all age groups when fertilized two times when rate of interest is 5 %.



Kuva 22. Kuusikon nykyarvot pituusboniteetilla 27, kahdella lannoituksella, kaikilla ikäryhmillä ja 5 % korkokannalla.

Figure 22. Net present values (FIM) in spruce stands on site index 27 all age groups when fertilized two times when rate of interest is 5 %.

7.1.4 Lannoitelaji

Tutkimuksessa käytettiin männiköissä lannoitteina ureaa ja oulunsalpietaria sekä kuusikoissa vielä lisäksi metsän PK-lannosta. Lannoitelaji vaihteli lannoituskerrasta riippumatta siten, että kaikki mahdolliset lannoitusketjujen kombinaatiot sisältyivät simulointeihin. Oulunsalpietaria tulisi suosia vain kertalannoituksissa sekä kaksi kertaa lannoitettaessa ja tällöinkin vain ensilannoituksessa. Tämä aiheutuu siitä, että levitettäessä sama määrä typpeä hehtaarille, on lannoituskustannus ureaa käytettäessä pienempi. Se, että ensilannoituksissa tulisi käyttää mieluummin oulunsalpietaria aiheutuu siitä, että puusto reagoi nopeammin oulunsalpietariin kuin ureaan. Samasta syystä myös kertalannoituksissa tulisi suosia oulunsalpietaria. Yleensä kasvureaktiot suhtautuvat siten, että ureaan nähden oulunsalpietarin aiheuttama suurempi mutta lyhytaikaisempi vaikutus kasvureaktioon ei pysty kompensoimaan oulunsalpietarin suurempia lannoituskustannuksia. Näin on nimenomaan silloin, kun suoritetaan useita peräkkäisiä lannoituksia. Kuusikoissa tulisi ensimmäisenä lannoitteena käyttää oulunsalpietaria ja ureaa ja oulunsalpietaria vuorotellen.

Metsän NP-lannosta ei suosita vaikka fosfori typen kanssa annettuna lisäksiin kuusikoiden kasvua selvästi, sillä metsän NP-lannoitetta tulisi levittää 2,2-kertainen määrä, jotta päästäisiin urean kanssa samalle typpitasolle. Vastaavasti oulunsalpietariin verrattuna pitäisi levittää 1,3-kertainen määrä. Tästä johtuvat kohonneet kustannukset eivät riitä yleensä kattamaan fosforin antaman kasvunlisäyksen tuottoja.

7.1.5 Lisäkuutiometrin hinta

Esimerkkitaulukoissa 28–42 on esitetty toistuvilla lannoituksilla tuotetun lisäkuutiometrin hinta eli lannoituskustannukset jaettuna tuotetulla kuutiometrimäärällä. Taulukossa on esitetty myös tuotetun lisäkuutiometrin rakenne. Laskelmat on tehty korkokannoilla 0 %, 5 % ja 9 %. Taulukoissa 28–42 on korkokannalla 5 % saadut tulokset.

Karkeasti ottaen voidaan sanoa, että männiköissä lisäkuutiometrin tuottaminen maksaa 100–200 mk/m³ ja kuusikoissa vastaavasti 200–300 mk/m³. Kun näitä lukuja verrataan kantohintoihin on syytä muistaa, että kantohinnat nousevat koko tarkastelujakson ajan. Esimerkiksi mäntytukin nimellinen trendihinta tarkastelujakson lopussa on n. 540 mk/m³. Tällöin on tutkimuksessa ajateltu realisoitavan loppupuustojen erotus.

Taulukoiden perusteella voidaan tehdä samat johtopäätökset kuin aiemmin: männiköiden lannoittaminen on edullista kun taas kuusikoissa ei päästä yhtä hyviin tuloksiin. Kuusikoissa on syytä suosia pieniä kerta-annoksia ja männiköissä suurempia n. 150–200 kg/ha.

7.1.6 Erotuskannattavuus

Erotuskannattavuudella ymmärretään tässä tutkimuksessa lannoitetun ja lannoittamattoman metsikön sisäisten korkojen erotusta kun lähtöpuusto ja verotus on otettu kustannuksena huomioon aiemmin esitetyllä tavalla. Erotuskannattavuus männiköissä vaihtelee 0,1 ja 1,1 prosenttiyksikön välillä seurailleen sisäisen koron kehitystä. Kuusikoiden pituusboniteetille 24 erotuskannattavuus on n. 0,3 prosenttiyksikköä kun taas pituusboniteetille 27 ei päästä positiivisiin kannattavuuksiin. Männiköissä metsänparannusrahoitus parantaa kokonaiskannattavuutta keskimäärin 0,3 prosenttiyksikköä samoin kuin kuusikoissakin.

7.2 Kannattavuus metsälötasolla

Edellä luvussa 7.1 etsittiin yksittäisissä metsiköissä toistuvilla lannoituksilla aikaansaadut sisäiset korot. Tässä luvussa asiaa tarkastellaan koko metsälön kannalta. Kun edellä on saatu optimaalinen lannoitusohjelma yksittäisille metsikoille, käytetään näitä ohjelmia koko metsälön lannoitusohjelmaa suunniteltaessa. Kyseessä on siis kaksivaiheinen optimointi, joka ei johda edes todennäköisestikään yhtä hyvään ratkaisuun kuin yksivaiheinen suoraan metsikkötasolla suoritettu optimointi. Suoraan metsikkötasolla suoritettu optimointi johtaisi niin laajojen mallien käyttöön, ettei niitä voida käytännössä soveltaa. Vaikka seuraavat laskelmat perustuvat eri pituusboniteettien kolmen ja neljän lannoituskerran parhaisiin keskimääräisiin lannoitusohjelmiin voi lukija mielessään samaistaa nämä pituusboniteettityypit metsälön eri metsikoiksi.

Esimerkkilaskelmaan on otettu pituusboniteettien 18, 24 ja 27 mukaiset ja tut-

kimuksessa mukana olleet eri ikäluokkiin kuuluvat männiköt. Taulukosta 43 käy selville kuinka monta prosenttia kutakin pituusboniteettia ja ikäluokkaa tulisi lannoittaa päätöksentekijän riskikäyttäytymisen muuttuessa.

Laskelmia on yksinkertaistettu siten, että esimerkkilaskelmassa on viimeinen alku- ja lopputilavuuksia koskeva rajoitus jätetty pois. Tällöin on ajateltu harvenusmallien pitävän huolen siitä, että rajoitus riittävällä tarkkuudella toteutuu eli samalla riskitasolla kuin malli muutenkin.

Taulukosta käy selville, että parhaita lannoituskohteita kaikilla riskitasoilla ovat pituusboniteetin 24 mukaisten kasvupaikkojen varttuneet kasvatusmetsiköt ja päätehakuuikää lähentelevät metsiköt. Riskitason pienentyessä lannoitusohjelmaan joudutaan valitsemaan useampia metsiköitä, kun riskitasolla 50 % riittää valita vain se, jolla on korkein sisäisen koron odotusarvo. Mahdollisimman hyvän tuloksen saavuttamiseksi suuremmalla todennäköisyydellä tulee ohjelmaan ottaa mukaan metsiköitä, joilla sisäisen koron hajonta on pienempi mutta samalla odotusarvo mahdollisimman suuri.

Taulukko 23. Kannattavuuspolynomien kertoimet.

Table 23. Coefficients of profitability polynoms.

kaikki ikäryhmät, kaksi lannoitusta – all age groups, two fertilizations						
pituusboni- teetti – site index	raja – limit	kerroin – coefficient				
		A	B	C	D	E
mänty – pine 18	ylä – up	14,018121	-4,673893	0,700342	-0,044583	19,452824
	keskiarvo – mean	7,996046	-2,244029	0,232882	-0,006354	5,282855
	ala – low	1,973976	0,185832	-0,234579	0,031875	-8,887116
mänty – pine 24	ylä – up	28,159431	-7,387411	0,675649	-0,006268	24,232389
	keskiarvo – mean	11,911770	-2,973410	0,284288	-0,007743	9,497542
	ala – low	-2,547403	0,554951	0,079993	-0,023503	-6,530440
mänty – pine 27	ylä – up	16,894911	-2,654781	0,042901	0,015978	17,041740
	keskiarvo – mean	8,607922	-2,068468	0,219834	-0,008264	7,635919
	ala – low	0,700726	-1,676581	0,438836	-0,035773	-2,032782
kuusi – spruce 24	ylä – up	-9,286318	-0,868667	0,639567	-0,064122	45,455650
	keskiarvo – mean	-2,581694	-0,055727	0,158385	-0,018941	12,488357
	ala – low	4,062800	0,792500	-0,330491	0,026791	-20,449455
kuusi – spruce 27	ylä – up	0,127069	-0,920647	0,150999	-0,012395	18,643255
	keskiarvo – mean	12,279530	-2,668807	0,142185	0,006837	-24,670889
	ala – low	24,431993	-4,416968	0,133371	0,026069	-67,985031

Kannattavuuspolynomit on selvitetty luvussa 3.

Profitability polynoms are explained in the chapter 3.

Taulukko 24. Kannattavuuspolynomien kertoimet.

Table 24. Coefficients of profitability polynoms.

ikäryhmä 25, kaksi lannoitusta – age group 25, two fertilizations						
pituusboni- teetti – site index		kerroin – coefficient				
raja – limit		A	B	C	D	E
mänty – pine 24	ylä – up	4,469535	-0,555583	-0,057506	0,009636	7,172827
	keskiarvo – mean	5,664394	-1,464108	0,123611	0,000221	3,370517
	ala – low	6,859263	-2,372635	0,304729	-0,009194	-0,431803
mänty – pine 27	ylä – up	1,602141	1,291984	-0,487649	0,045167	10,273792
	keskiarvo – mean	5,312318	-1,312086	0,113208	-0,001345	4,604633
	ala – low	9,022501	-3,916158	0,714066	-0,047857	-1,064531
kuusi – spruce 24	ylä – up	2,960345	-0,773859	0,058920	-0,001318	5,893825
	keskiarvo – mean	3,306430	-1,024721	0,116700	-0,003959	1,975927
	ala – low	3,744530	-1,311842	0,181151	-0,007096	-2,027950
kuusi – spruce 27	ylä – up	3,547114	-0,837892	0,054311	-0,001251	4,906945
	keskiarvo – mean	4,439175	-1,282406	0,152866	-0,006848	-1,478458
	ala – low	5,331232	-1,726919	0,251421	-0,012445	-7,863859

Kannattavuuspolynomit on selvitetty luvussa 3.

Profitability polynoms are explained in the chapter 3.

Taulukko 25. Kannattavuuspolynomien kertoimet.

Table 25. Coefficients of profitability polynoms.

ikäluokka 35, kaksi lannoitusta – age group 35, two fertilizations						
pituusboni- teetti – site index	raja – limit	kerroin – coefficient				
		A	B	C	D	E
mänty – pine 18	ylä – up	-6,540747	-1,655624	0,090523	0,008658	3,982453
	keskiarvo – mean	3,367511	-0,941258	0,088980	-0,001128	4,134471
	ala – low	0,458394	-0,382745	0,124306	-0,013948	4,141737
mänty – pine 24	ylä – up	-12,256355	4,962239	-0,493494	-0,018030	31,531960
	keskiarvo – mean	7,647506	-2,188793	0,217804	-0,003593	7,636325
	ala – low	27,551352	-9,339820	0,929100	0,010844	-16,259296
mänty – pine 27	ylä – up	5,141812	0,509781	-0,337036	0,031284	16,847935
	keskiarvo – mean	3,521573	-0,844863	0,150449	-0,013130	15,542126
	ala – low	1,901324	-2,199501	0,637933	-0,057543	14,236327
kuusi – spruce 24	ylä – up	2,920605	0,093113	-0,251357	0,029829	9,155399
	keskiarvo – mean	4,043908	-1,319007	0,193014	-0,011201	3,285799
	ala – low	3,225718	-1,737436	0,422470	-0,035527	-1,242381
kuusi – spruce 27	ylä – up	5,266245	-5,933061	1,147044	-0,066044	36,225895
	keskiarvo – mean	-5,280703	-0,223329	0,371846	-0,043204	13,905559
	ala – low	-15,827645	5,486401	-0,403353	-0,020365	-8,414783

Kannattavuuspolynomit on selvitetty luvussa 3.

Profitability polynoms are explained in the chapter 3.

Taulukko 26. Kannattavuuspolynomien kertoimet.

Table 26. Coefficients of profitability polynoms.

		ikäluokka 45, kaksi lannoitusta – age group 45, two fertilizations				
pituusboniteetti raja – limit – site index		kerroin – coefficient				
		A	B	C	D	E
mänty – pine 18	ylä – up	2,491479	0,173640	-0,223027	0,026337	8,582607
	keskiarvo – mean	4,774323	-1,235684	0,099476	0,000872	3,738718
	ala – low	7,057175	-2,645010	0,421980	-0,024594	-1,105179
mänty – pine 24	ylä – up	-12,514240	3,874101	-0,456245	0,000814	78,180183
	keskiarvo – mean	10,538148	-3,183493	0,354598	-0,026268	28,610147
	ala – low	33,590553	-10,241096	1,165443	-0,053351	-20,959906
mänty – pine 27	ylä – up	4,228226	-1,029011	0,204681	-0,021752	10,836649
	keskiarvo – mean	6,129408	-1,889772	0,262371	-0,012179	5,221875
	ala – low	5,510085	-1,543466	0,071572	0,016015	1,505221
kuusi – spruce 24	ylä – up	14,912435	-8,562087	2,061101	-0,181653	16,434416
	keskiarvo – mean	16,153990	-4,336975	0,347927	0,003276	-7,154043
	ala – low	17,456247	-0,578378	-1,198908	0,171826	-29,969637
kuusi – spruce 27	ylä – up	4,930432	-1,683039	0,378653	-0,047365	9,749544
	keskiarvo – mean	5,246741	-1,769554	0,227030	-0,009985	0,354776
	ala – low	2,646594	-0,479706	-0,204625	0,048191	-6,806223

Kannattavuuspolynomit on selvitetty luvussa 3.

Profitability polynoms are explained in the chapter 3.

Taulukko 27. Kannattavuuspolynomien kertoimet.

Table 27. Coefficients of profitability polynoms.

		ikäluokka 55, kaksi lannoitusta – age group 55, two fertilizations				
pituusboniteetti raja – limit – site index		kerroin – coefficient				
		A	B	C	D	E
mänty – pine 18	ylä – up	4,398787	-0,626527	0,121637	-0,012129	14,219969
	keskiarvo – mean	2,855127	-0,597571	0,081962	-0,005515	12,129671
	ala – low	1,311462	-0,568615	0,042287	0,001100	10,039379
mänty – pine 24	ylä – up	-0,130748	1,828093	-0,528261	0,045314	20,810085
	keskiarvo – mean	9,972157	-2,268674	0,093043	0,015959	7,030884
	ala – low	20,075062	-6,365442	0,714347	-0,013397	-6,748316
mänty – pine 27	ylä – up	15,140017	-2,011145	0,355973	-0,063754	23,159227
	keskiarvo – mean	17,477968	-3,810745	0,484370	-0,031577	9,449948
	ala – low	19,815916	-5,610348	0,612769	0,000601	-4,259319
kuusi – spruce 24	ylä – up	23,386110	-4,890127	-0,070185	0,074967	-10,701370
	keskiarvo – mean	10,239277	-3,027399	0,343509	-0,011983	-4,105253
	ala – low	0,817126	-3,250574	1,236621	-0,137740	0,238441
kuusi – spruce 27	ylä – up					
	keskiarvo – mean					
	ala – low					

Kannattavuuspolynomit on selvitetty luvussa 3.

Profitability polynoms are explained in the chapter 3.

Taulukko 28. Lannoituskustannus/kasvun lisäys kahdella lannoituksella (suluissa tukki- ja kuitupuun osuus (%)) kasvunlisäyksestä).

Table 28. Fertilization cost/incremental cubic meter when fertilized two times (in parenthesis presentage share of sawtimber and pulpwood of growth increment).

keskimääräinen typen määrä (kg/ ha) – average amount of nitro- gen (kg/ha)	ikäluokka – age group						
	35	45	55	65	75	85	95
mänty pituusboniteetti 18 – pine site index 18							
160	109 (37/65)	108 (61/40)	120 (100/0)	127 (109/-9)	138 (110/-9)	132 (109/-8)	173 (107/-7)
200	102 (38/64)	101 (62/39)	113 (101/-1)	119 (109/-9)	129 (109/-9)	124 (109/-8)	162 (107/-7)
240	100 (38/63)	99 (63/38)	111 (102/-2)	117 (108/-9)	127 (109/-9)	122 (108/-8)	159 (107/-7)
280	100 (39/62)	99 (63/38)	111 (102/-3)	116 (109/-9)	127 (109/-10)	121 (108/-8)	158 (107/-7)
320	101 (40/62)	100 (64/37)	112 (103/-3)	117 (109/-9)	128 (109/-10)	122 (108/-8)	160 (107/-7)
360	100 (40/61)	99 (64/36)	111 (104/-4)	116 (109/-9)	126 (109/-10)	122 (108/-8)	158 (107/-7)
400	100 (41/60)	100 (65/36)	112 (104/-4)	116 (109/-9)	127 (109/-9)	122 (108/-8)	159 (107/-7)
440	102 (41/60)	101 (65/35)	113 (105/-5)	117 (110/-10)	128 (109/-9)	123 (107/-7)	161 (107/-7)
480	103 (42/59)	102 (66/35)	115 (105/-5)	119 (109/-9)	130 (109/-9)	125 (107/-7)	163 (107/-7)

Taulukko 29. Lannoituskustannus/kasvun lisäys kolmella lannoituksella (suluissa tukki- ja kuitupuun osuus (%) kasvunlisäyksestä).

Table 29. Fertilization cost/incremental cubic meter when fertilized three times (in parenthesis presentage share of sawtimber and pulpwood of growth increment).

keskimääräinen typen määrä (kg/ ha) – average amount of nitro- gen (kg/ha)	ikäluokka – age group						
	35	45	55	65	75	85	95
<i>mänty pituusboniteetti 18 – pine site index 18</i>							
240	107 (38/63)	105 (62/39)	117 (102/-2)	126 (108/-8)	135 (109/-10)	130 (108/-8)	170 (107/-7)
300	101 (39/62)	100 (63/38)	112 (103/-3)	120 (109/-9)	128 (109/-9)	124 (108/-8)	161 (107/-7)
360	98 (40/61)	97 (64/37)	108 (104/-4)	116 (109/-9)	124 (109/-9)	119 (108/-7)	156 (107/-7)
420	97 (41/60)	96 (65/36)	107 (104/-4)	116 (109/-9)	123 (109/-9)	118 (107/-7)	154 (107/-7)
480	96 (42/59)	95 (65/35)	106 (105/-5)	115 (109/-9)	122 (109/-9)	117 (107/-7)	153 (107/-7)
540	96 (43/58)	95 (66/34)	106 (105/-5)	115 (109/-9)	121 (109/-9)	117 (107/-7)	152 (107/-7)
600	96 (44/57)	95 (67/34)	106 (106/-6)	115 (109/-10)	121 (109/-9)	117 (107/-7)	153 (107/-7)
660	96 (45/56)	95 (68/33)	106 (106/-6)	115 (110/-10)	122 (109/-9)	117 (107/-7)	153 (106/-7)
720	97 (46/55)	96 (68/32)	107 (107/-7)	116 (110/-10)	123 (109/-9)	119 (107/-7)	155 (106/-7)

Taulukko 30. Lannoituskustannus/kasvun lisäys neljällä lannoituksella (suluissa tukki- ja kuitupuun osuus (%)) kasvunlisäyksestä).

Table 30. Fertilization cost/incremental cubic meter when fertilized four times (in parenthesis presentage share of sawtimber and pulpwood of growth increment).

keskimääräinen typen määrä (kg/ ha) – average amount of nitro- gen (kg/ha)	ikäluokka – age group						
	35	45	55	65	75	85	95
mänty pituusboniteetti 18 – pine site index 18							
320	104 (40/61)	102 (63/37)	114 (103/-3)	124 (108/-8)	131 (110/-9)	126 (108/-8)	165 (107/-7)
400	97 (41/60)	96 (64/36)	107 (104/-4)	117 (108/-9)	123 (109/-9)	119 (107/-7)	155 (107/-7)
480	95 (43/59)	94 (66/35)	104 (105/-5)	114 (109/-9)	120 (109/-9)	116 (107/-7)	151 (107/-7)
560	94 (44/57)	93 (67/34)	103 (106/-6)	113 (109/-9)	119 (109/-9)	115 (107/-7)	149 (107/-7)
640	94 (45/56)	93 (68/33)	103 (106/-6)	113 (109/-9)	119 (109/-9)	114 (107/-7)	149 (106/-7)
720	94 (47/55)	93 (69/32)	103 (107/-7)	113 (109/-9)	119 (109/-9)	115 (107/-7)	150 (106/-6)
800	95 (48/53)	94 (69/31)	104 (107/-7)	114 (109/-10)	120 (109/-9)	116 (107/-7)	151 (106/-6)
880	96 (49/52)	95 (70/31)	105 (108/-8)	115 (109/-10)	121 (109/-9)	117 (106/-7)	152 (106/-6)
960	97 (50/51)	96 (71/30)	107 (108/-8)	117 (109/-10)	123 (109/-9)	119 (106/-6)	155 (106/-6)

Taulukko 31. Lannoituskustannus/kasvun lisäys kahdella lannoituksella (suluissa tukki- ja kuitupuun osuus (%)) kasvunlisäyksestä).

Table 31. Fertilization cost/incremental cubic meter when fertilized two times (in parenthesis presentage share of sawtimber and pulpwood of growth increment).

keskimääräinen typen määrä (kg/ ha) – average amount of nitro- gen (kg/ha)	ikäluokka – age group							
	25	35	45	55	65	75	85	95
mänty pituusboniteetti 24– pine site index 24								
160	93 (45/55)	93 (83/17)	97 (114/-14)	103 (109/-9)	109 (105/-5)	120 (103/-3)	134 (98/0)	146 (97/2)
200	87 (46/54)	87 (84/17)	91 (113/-13)	97 (109/-9)	102 (104/-5)	112 (103/-3)	124 (98/1)	137 (98/2)
240	85 (47/54)	85 (84/16)	90 (114/-14)	95 (109/-9)	100 (104/-5)	110 (103/-2)	122 (98/1)	135 (98/2)
280	85 (48/52)	85 (85/15)	90 (114/-14)	94 (109/-9)	100 (104/-5)	110 (103/-2)	121 (98/1)	135 (97/2)
320	86 (50/51)	86 (86/14)	90 (113/-14)	95 (108/-9)	101 (104/-5)	111 (102/-2)	122 (98/1)	137 (97/2)
360	85 (51/50)	86 (87/14)	89 (113/-14)	94 (108/-8)	100 (104/-4)	110 (102/-2)	120 (98/1)	136 (97/2)
400	85 (52/48)	86 (87/13)	90 (114/-14)	95 (108/-8)	100 (104/-4)	110 (102/-2)	121 (98/2)	136 (97/2)
440	86 (54/47)	87 (88/12)	91 (113/-13)	96 (108/-8)	101 (104/-4)	112 (102/-2)	122 (98/2)	138 (97/2)
480	87 (55/46)	88 (89/11)	92 (113/-13)	97 (108/-8)	102 (104/-4)	113 (102/-2)	123 (98/2)	140 (97/2)

Taulukko 32. Lannoituskustannus/kasvun lisäys kolmella lannoituksella (suluissa tukki- ja kuitupuun osuus (%)) kasvunlisäyksestä).

Table 32. Fertilization cost/incremental cubic meter when fertilized three times (in parenthesis presentage share of sawtimber and pulpwood of growth increment).

keskimääräinen typen määrä (kg/ ha) – average amount of nitro- gen (kg/ha)	ikäluokka – age group							
	25	35	45	55	65	75	85	95
mänty pituusboniteetti 24– pine site index 24								
240	90 (44/56)	93 (89/11)	98 (113/-13)	101 (108/-9)	110 (105/-5)	118 (103/-3)	126 (98/1)	145 (97/2)
300	86 (46/54)	88 (90/10)	93 (113/-13)	96 (108/-8)	105 (105/-5)	112 (102/-2)	119 (98/1)	138 (97/2)
360	83 (50/51)	85 (91/9)	90 (113/-13)	93 (108/-8)	101 (105/-5)	108 (102/-2)	115 (98/1)	134 (97/2)
420	82 (52/49)	84 (93/8)	89 (113/-13)	92 (108/-8)	101 (104/-5)	107 (102/-2)	114 (98/1)	133 (97/2)
480	81 (54/47)	84 (94/6)	88 (113/-13)	91 (108/-8)	100 (104/-5)	106 (101/-1)	113 (98/2)	132 (97/2)
540	81 (56/45)	84 (95/5)	88 (113/-13)	91 (108/-8)	100 (104/-4)	106 (101/-1)	112 (98/2)	132 (97/2)
600	81 (57/43)	84 (96/4)	88 (112/-13)	91 (107/-8)	100 (104/-4)	106 (101/-1)	112 (98/2)	132 (97/2)
660	81 (59/42)	84 (97/4)	89 (112/-12)	91 (107/-8)	100 (104/-4)	106 (101/-1)	113 (98/2)	133 (97/2)
720	82 (60/41)	85 (97/3)	90 (112/-12)	92 (107/-7)	101 (104/-4)	107 (100/-1)	114 (98/2)	134 (97/2)

Taulukko 33. Lannoituskustannus/kasvun lisäys neljällä lannoituksella (suluissa tukki- ja kuitupuun osuus (%)) kasvunlisäyksestä.

Table 33. Fertilization cost/incremental cubic meter when fertilized four times (in parenthesis presentage share of sawtimber and pulpwood of growth increment).

keskimääräinen typen määrä (kg/ ha) – average amount of nitro- gen (kg/ha)	ikäluokka – age group							
	25	35	45	55	65	75	85	95
mänty pituusboniteetti 24– pine site index 24								
320	87 (48/53)	91 (93/7)	95 (114/-14)	98 (108/-8)	107 (105/-5)	114 (102/-2)	121 (98/1)	142 (97/2)
400	82 (51/49)	85 (95/5)	90 (113/-13)	92 (108/-8)	101 (105/-5)	108 (102/-2)	114 (98/1)	134 (97/2)
480	80 (54/46)	83 (97/4)	88 (113/-13)	90 (108/-8)	99 (104/-5)	105 (101/-1)	112 (98/2)	131 (97/2)
560	79 (57/44)	82 (98/2)	87 (112/-13)	89 (108/-8)	98 (104/-4)	104 (101/-1)	110 (98/2)	130 (97/2)
640	79 (59/42)	82 (99/1)	86 (112/-12)	89 (107/-8)	98 (104/-4)	103 (101/-1)	110 (98/2)	129 (97/2)
720	79 (60/40)	83 (100/0)	87 (112/-12)	89 (107/-7)	98 (104/-4)	104 (100/0)	111 (98/2)	130 (97/2)
800	80 (62/39)	83 (100/0)	87 (112/-12)	89 (107/-7)	99 (103/-4)	105 (100/0)	111 (98/2)	131 (97/3)
880	81 (63/37)	84 (101/-1)	88 (111/-12)	90 (107/-7)	100 (103/-3)	106 (100/0)	113 (98/2)	132 (97/3)
960	82 (64/36)	86 (101/-1)	90 (111/-11)	92 (106/-7)	102 (103/-3)	108 (100/0)	115 (98/2)	135 (97/3)

Taulukko 34. Lannoituskustannus/kasvun lisäys kahdella lannoituksella (suluissa tukki- ja kuitupuun osuus (%) kasvunlisäyksestä).

Table 34. Fertilization cost/incremental cubic meter when fertilized two times (in parenthesis presentage share of sawtimber and pulpwood of growth increment).

keskimääräinen typen määrä (kg/ ha) – average amount of nitro- gen (kg/ha)	ikäluokka – age group						
	25	35	45	55	65	75	85
mänty pituusboniteetti – 27 pine site index 27							
160	110 (73/28)	114 (113/-13)	128 (111/-11)	125 (105/-5)	137 (103/-3)	146 (98/2)	166 (98/2)
200	103 (73/27)	107 (113/-13)	113 (112/-11)	117 (105/-5)	128 (102/-3)	136 (98/2)	155 (97/2)
240	102 (73/27)	105 (114/-14)	110 (112/-12)	115 (104/-4)	126 (102/-3)	133 (98/2)	152 (97/3)
280	102 (73/27)	105 (114/-14)	108 (113/-12)	114 (104/-4)	126 (102/-2)	133 (98/2)	152 (97/3)
320	102 (73/27)	105 (114/-15)	109 (112/-12)	115 (104/-4)	127 (102/-2)	133 (98/2)	153 (97/3)
360	102 (73/27)	105 (115/-15)	107 (112/-12)	114 (104/-4)	126 (102/-2)	132 (97/2)	151 (97/3)
400	102 (74/27)	105 (115/-15)	107 (112/-12)	115 (104/-4)	126 (102/-2)	133 (98/2)	152 (97/3)
440	103 (74/27)	106 (115/-15)	109 (112/-12)	116 (104/-4)	127 (102/-2)	134 (98/2)	154 (97/3)
480	105 (74/27)	108 (115/-15)	112 (112/-12)	117 (104/-4)	129 (102/-2)	136 (97/2)	156 (97/3)

Taulukko 35. Lannoituskustannus/kasvun lisäys kolmella lannoituksella (suluissa tukki- ja kuitupuun osuus (%) kasvunlisäyksestä).

Table 35. Fertilization cost/incremental cubic meter when fertilized three times (in parenthesis presentage share of sawtimber and pulpwood of growth increment).

keskimääräinen typen määrä (kg/ ha) – average amount of nitro- gen (kg/ha)	ikäluokka – age group						
	25	35	45	55	65	75	85
<i>mänty pituusboniteetti – 27 pine site index 27</i>							
240	110 (74/26)	111 (114/-14)	122 (112/-12)	121 (105/-5)	135 (102/-3)	138 (98/2)	163 (97/2)
300	104 (75/26)	105 (114/-14)	114 (112/-12)	115 (105/-5)	128 (102/-3)	131 (98/2)	154 (97/3)
360	101 (76/25)	102 (114/-14)	107 (112/-12)	111 (105/-5)	123 (102/-2)	127 (98/2)	149 (97/3)
420	100 (76/24)	101 (114/-14)	105 (111/-11)	110 (104/-5)	122 (102/-2)	125 (98/2)	147 (97/3)
480	99 (77/23)	100 (114/-14)	103 (111/-11)	109 (104/-5)	121 (102/-2)	124 (98/2)	146 (97/3)
540	99 (78/23)	100 (114/-14)	103 (111/-11)	109 (104/-4)	121 (102/-2)	124 (98/2)	146 (97/3)
600	99 (78/22)	100 (114/-14)	102 (110/-11)	109 (104/-4)	121 (101/-2)	124 (98/2)	146 (97/3)
660	99 (79/22)	100 (114/-14)	102 (110/-10)	109 (104/-4)	121 (101/-1)	125 (98/2)	146 (97/3)
720	100 (79/21)	101 (114/-15)	101 (110/-10)	110 (104/-4)	122 (101/-1)	126 (97/2)	148 (97/3)

Taulukko 36. Lannoituskustannus/kasvun lisäys neljällä lannoituksella (suluissa tukki- ja kuitupuun osuus (%) kasvunlisäyksestä).

Table 36. Fertilization cost/incremental cubic meter when fertilized four times (in parenthesis presentage share of sawtimber and pulpwood of growth increment).

keskimääräinen typen määrä (kg/ ha) – average amount of nitro- gen (kg/ha)	ikäluokka – age group						
	25	35	45	55	65	75	85
mänty pituusboniteetti – 27 pine site index 27							
320	107 (76/24)	107 (114/-14)	118 (112/-12)	118 (105/-5)	131 (102/-2)	134 (98/2)	158 (97/3)
400	101 (77/24)	101 (114/-14)	108 (111/-11)	111 (104/-5)	123 (102/-2)	126 (98/2)	148 (97/3)
480	98 (78/23)	99 (114/-14)	104 (111/-11)	108 (104/-5)	120 (102/-2)	123 (98/2)	145 (97/3)
560	97 (79/22)	98 (114/-14)	102 (110/-11)	107 (104/-4)	118 (101/-2)	122 (98/2)	143 (97/3)
640	97 (79/21)	97 (114/-14)	101 (110/-10)	107 (104/-4)	118 (101/-1)	122 (98/2)	143 (97/3)
720	97 (80/20)	98 (114/-14)	101 (110/-10)	107 (104/-4)	118 (101/-1)	122 (98/2)	143 (97/3)
800	98 (81/20)	98 (114/-14)	102 (110/-10)	108 (104/-4)	119 (101/-1)	123 (97/2)	144 (97/3)
880	99 (81/19)	100 (114/-14)	104 (109/-9)	110 (104/-4)	120 (100/-1)	124 (97/2)	146 (97/3)
960	101 (81/19)	101 (114/-14)	107 (109/-9)	111 (104/-4)	123 (100/-1)	127 (97/2)	148 (97/3)

Taulukko 37. Lannoituskustannus/kasvun lisäys kahdella lannoituksella (suluissa tukki- ja kuitupuun osuus (%)) kasvunlisäyksestä).

Table 37. Fertilization cost/incremental cubic meter when fertilized two times (in parenthesis presentage share of sawtimber and pulpwood of growth increment).

keskimääräinen typen määrä (kg/ ha) – average amount of nitro- gen (kg/ha)	ikäluokka – age group					
	25	35	45	55	65	75
<i>kuusi pituusboniteetti 24 – spruce site index 24</i>						
160	121 (52/49)	123 (86/14)	133 (115/-15)	160 (112/-12)	151 (108/-7)	176 (102/-3)
200	116 (53/48)	117 (86/14)	128 (115/-15)	154 (112/-12)	146 (107/-7)	169 (102/-2)
240	115 (53/48)	117 (86/14)	126 (115/-15)	152 (111/-12)	146 (107/-7)	168 (101/-2)
280	116 (54/47)	118 (87/14)	128 (116/-16)	154 (111/-12)	148 (107/-7)	170 (101/-2)
320	118 (54/47)	120 (87/14)	129 (116/-16)	156 (111/-12)	151 (107/-7)	173 (101/-2)
360	119 (55/46)	120 (87/14)	131 (116/-16)	156 (111/-12)	152 (106/-7)	172 (101/-2)
400	120 (55/46)	121 (87/13)	133 (116/-16)	158 (111/-12)	154 (106/-6)	176 (101/-2)
440	122 (55/46)	124 (87/13)	136 (117/-17)	161 (111/-11)	157 (106/-6)	177 (101/-1)
480	126 (56/45)	127 (87/13)	140 (117/-17)	164 (111/-11)	161 (106/-6)	178 (100/-1)

Taulukko38. Lannoituskustannus/kasvun lisäys kolmella lannoituksella (suluissa tukki- ja kuitupuun osuus (%) kasvunlisäyksestä).

Table 38. Fertilization cost/incremental cubic meter when fertilized three times (in parenthesis presentage share of sawtimber and pulpwood of growth increment).

keskimääräinen typen määrä (kg/ ha) – average amount of nitro- gen (kg/ha)	ikäluokka – age group					
	25	35	45	55	65	75
kuusi pituusboniteetti 24 – spruce site index 24						
240	109 (54/47)	115 (88/13)	127 (115/-15)	143 (111/-12)	147 (107/-7)	162 (102/-2)
300	107 (54/47)	112 (88/12)	124 (115/-15)	139 (111/-12)	144 (107/-7)	158 (101/-2)
360	107 (55/46)	113 (88/12)	125 (115/-15)	139 (111/-11)	144 (106/-6)	159 (101/-1)
420	109 (56/45)	115 (89/12)	127 (115/-15)	142 (111/-11)	148 (106/-6)	161 (101/-1)
480	112 (56/45)	118 (89/11)	131 (115/-15)	145 (111/-11)	151 (106/-6)	164 (100/-1)
540	116 (57/44)	121 (89/11)	134 (115/-15)	150 (111/-11)	156 (106/-6)	168 (100/-1)
600	119 (57/44)	125 (89/11)	139 (115/-15)	154 (110/-11)	161 (106/-6)	171 (100/-1)
660	124 (57/44)	130 (89/11)	144 (116/-16)	160 (110/-11)	167 (105/-6)	176 (100/0)
720	129 (58/43)	134 (89/11)	150 (116/-16)	166 (110/-11)	173 (105/-6)	181 (100/0)

Taulukko 39. Lannoituskustannus/kasvun lisäys neljällä lannoituksella (suluissa tukki- ja kuitupuun osuus (%) kasvunlisäyksestä).

Table 39. Fertilization cost/incremental cubic meter when fertilized four times (in parenthesis presentage share of sawtimber and pulpwood of growth increment).

keskimääräinen typen määrä (kg/ ha) – average amount of nitro- gen (kg/ha)	ikäluokka – age group					
	25	35	45	55	65	75
kuusi pituusboniteetti 24 – spruce site index 24						
320	105 (55/46)	112 (89/11)	125 (115/-14)	138 (111/-11)	145 (106/-6)	156 (101/-2)
400	105 (56/45)	112 (89/11)	125 (114/-14)	138 (111/-11)	145 (106/-6)	156 (101/-1)
480	109 (56/45)	116 (90/11)	129 (114/-14)	142 (111/-11)	150 (106/-6)	161 (101/-1)
560	115 (57/44)	121 (90/11)	135 (114/-14)	149 (110/-11)	158 (106/-6)	167 (100/-1)
640	122 (57/44)	128 (90/11)	143 (115/-15)	158 (110/-11)	167 (105/-6)	174 (100/0)
720	130 (58/43)	136 (90/11)	152 (115/-15)	167 (110/-11)	177 (105/-6)	179 (100/0)
800	140 (58/43)	145 (89/11)	161 (115/-15)	179 (110/-11)	190 (105/-5)	184 (100/0)
880	151 (58/43)	156 (89/11)	171 (115/-16)	193 (110/-10)	204 (105/-5)	189 (100/0)
960	164 (58/43)	169 (88/12)	184 (116/-16)	209 (110/-10)	221 (105/-5)	195 (100/0)

Taulukko 40. Lannoituskustannus/kasvun lisäys kahdella lannoituksella (suluissa tukki- ja kuitupuun osuus (%) kasvunlisäyksestä).

Table 40. Fertilization cost/incremental cubic meter when fertilized two times (in parenthesis presentage share of sawtimber and pulpwood of growth increment).

keskimääräinen typen määrä (kg/ ha) – average amount of nitro- gen (kg/ha)	ikäluokka – age group					
	25	35	45	55	65	75
kuusi pituusboniteetti 27 – spruce site index 27						
160	165 (84/17)	181 (121/-21)	159 (118/-18)		224 (98/3)	268 (95/4)
200	158 (84/16)	175 (121/-21)	152 (116/-17)		216 (98/3)	259 (96/3)
240	157 (84/16)	174 (120/-20)	152 (118/-18)		215 (97/3)	258 (95/4)
280	158 (84/16)	176 (119/-19)	153 (118/-18)		217 (97/3)	261 (95/4)
320	161 (84/16)	180 (118/-18)	156 (118/-18)		221 (97/3)	266 (96/4)
360	161 (84/16)	180 (118/-18)	156 (118/-18)	176 (101/-1)	220 (97/3)	266 (95/4)
400	163 (84/16)	183 (117/-17)	158 (118/-19)		223 (97/3)	270 (95/4)
440	166 (85/16)	186 (116/-17)	161 (117/-18)		227 (97/3)	275 (96/4)
480	169 (84/16)	191 (116/-16)	165 (117/-18)		233 (97/3)	282 (96/4)

Taulukko 41. Lannoituskustannus/kasvun lisäys kolmella lannoituksella (suluissa tukki- ja kuitupuun osuus (%) kasvunlisäyksestä).

Table 41. Fertilization cost/incremental cubic meter when fertilized three times (in parenthesis presentage share of sawtimber and pulpwood of growth increment).

keskimääräinen typen määrä (kg/ ha) – average amount of nitro- gen (kg/ha)	ikäluokka – age group					
	25	35	45	55	65	75
kuusi pituusboniteetti 27 – spruce site index 27						
240	146 (83/18)	172 (118/-18)	150 (116/-16)		216 (97/3)	249 (95/4)
300	143 (83/18)	168 (118/-18)	146 (116/-16)	162 (101/-1)	212 (97/3)	243 (95/4)
360	143 (83/18)	168 (117/-18)	147 (116/-16)	166 (101/-1)	212 (97/3)	244 (95/4)
420	146 (83/18)	172 (117/-17)	150 (116/-16)	166 (101/-1)	217 (97/3)	249 (95/4)
480	149 (83/17)	176 (116/-17)	153 (116/-17)	170 (101/-1)	222 (97/3)	255 (95/4)
540	154 (83/17)	181 (116/-16)	158 (116/-17)		228 (97/3)	263 (96/4)
600	158 (83/17)	187 (116/-16)	163 (116/-17)		235 (97/3)	272 (96/4)
660	164 (83/17)	193 (115/-16)	169 (116/-17)		243 (97/3)	283 (95/4)
720	170 (83/17)	201 (115/-15)	175 (116/-16)		252 (97/3)	293 (96/4)

Taulukko 42. Lannoituskustannus/kasvun lisäys neljällä lannoituksella (suluissa tukki- ja kuitupuun osuus (%) kasvunlisäyksestä).

Table 42. Fertilization cost/incremental cubic meter when fertilized four times (in parenthesis presentage share of sawtimber and pulpwood of growth increment).

keskimääräinen typen määrä (kg/ ha) – average amount of nitro- gen (kg/ha)	ikäluokka – age group					
	25	35	45	55	65	75
kuusi pituusboniteetti 27 – spruce site index 27						
320	141 (83/18)	168 (116/-17)	146 (116/-16)	167 (101/-1)	211 (97/3)	241 (95/4)
400	141 (83/17)	168 (116/-17)	146 (116/-16)	163 (101/-1)	211 (97/3)	241 (95/4)
480	146 (83/17)	173 (116/-16)	151 (116/-16)	166 (101/-1)	218 (97/3)	250 (95/4)
560	153 (83/17)	182 (116/-16)	158 (116/-16)	168 (101/-1)	228 (97/3)	262 (96/4)
640	162 (83/17)	192 (116/-16)	167 (116/-16)	171 (101/-1)	241 (97/3)	278 (96/4)
720	172 (83/17)	204 (115/-16)	177 (116/-16)		255 (97/3)	296 (96/4)
800	184 (83/17)	218 (115/-16)	190 (116/-16)		272 (97/3)	318 (96/4)
880	197 (83/18)	234 (115/-15)	204 (116/-16)		292 (97/3)	343 (96/4)
960	213 (83/18)	253 (115/-15)	221 (116/-16)		314 (97/3)	373 (96/4)

Taulukko 43. Lannoitetun metsän osuus ikäryhmittäin, kasvupaikkatyypeittäin ja lannoituskerroittain männiköissä riskitasolla $\alpha = 60\%$ – 99% .

Table 43. Percentage share of fertilized forest area by age group, site index and number of fertilizations in pine stands when risk level $\alpha = 60\%$ – 99% .

Lannoitetun metsän prosenttiosuus (%) – Percentage share (%) of fertilized forest area			
Pituusboniteetti – Site index	24	24	24
Lannoitusten lukumäärä – Number of fertilizations	3	4	4
Ikäryhmä – Age group	65	65	85
Rikitaso $\alpha = 60\%$ – Risk level $\alpha = 60\%$	100,0	0,0	0,0
Rikitaso $\alpha = 70\%$ – Risk level $\alpha = 70\%$	22,7	77,3	0,0
Rikitaso $\alpha = 80\%$ – Risk level $\alpha = 80\%$	19,5	80,5	0,0
Rikitaso $\alpha = 85\%$ – Risk level $\alpha = 85\%$	18,1	81,9	0,0
Rikitaso $\alpha = 95\%$ – Risk level $\alpha = 95\%$	9,5	14,2	76,3
Rikitaso $\alpha = 99\%$ – Risk level $\alpha = 99\%$	7,7	11,7	80,6

8 Yhteenvedo

Tutkimuksessa selvitettiin toistuvan lannoituksen kannattavuutta Etelä-Suomen kangasmailla. Laskelmia tehtiin sekä metsikkö- että metsälötasolla. Tutkimuksessa kannattavuutta puntaroiitiin kolmella mittarilla: nimellisellä sisäisellä korolla, nykyarvolla ja ns. kustannuskertoimella, joka ilmoittaa, paljonko toistuvilla lannoituksilla aikaansaatu lisäkuutiometri maksaa. Menetelmien käyttöön liittyy joukko edellytyksiä, joiden oletettiin olevan voimassa. Nykyarvolaskelmat suoritettiin kolme eri laskentakorkokantaa käyttäen. Investoinnin pitoaika oli aina 18 vuotta.

Kannattavuuslaskelmia varten selvitettiin investoinnista odotettavat tulot ja kustannukset. Tuloina otettiin huomioon lannoitetun metsikön harvennustulot ja loppupuustojen erotus tämän ollessa positiivinen sekä kustannuksina tai tulonvähennyksinä vastaavan lannoittamattoman metsikön harvennustulot, lannoituskustannukset ja loppupuustojen erotus tämän ollessa negatiivinen. Kokonaiskannattavuutta laskettaessa otettiin kustannuksena huomioon myös alkupuusto ja pinta-alaan perustuva metsävero. Jonkin verran tarkasteltiin myös metsänparannusrahoituksen vaikutusta kannattavuuteen.

Kasvua ja lannoituksen aiheuttamaa lisäkasvua samoin kuin puutavaralajien osuuksien muutosta ja puuston järeytymistä laskettaessa käytettiin aikaisemmissa kasvu- ja tuotostutkimuksissa esitettyjä malleja. Tältä osin ei siis suoraan käytetty koeala-aineistoa. Laskelmat laadittiin erikseen sekä lannoitetuille että lannoittamattomille metsiköille. Laskennan kulku on selvitetty kaavioina kuvissa 1–2. Malleihin liittyvä riski otettiin huomioon laskelmissa.

Harvennukset suoritettiin kummassakin metsikössä erikseen pohjapinta-alan saavuttaessa harvennusmallien mukaisen ylärajan. Harvennusmallit on esitetty taulukossa 5.

Lannoituksia suoritettiin 2–4 kertaa tasaisin välein (12, 6 tai 4 vuotta) siten, että viimeinen lannoitus tapahtui 12 vuoden kuluttua ensilannoituksesta. Männiköissä lannoitteina käytettiin ureaa ja oulunsalpietaria ja kuusikoissa lisäksi metsän PK-lannosta. Lannoituksissa kerta-annoksen annettiin vaihdella 80 ja 240 kg N/ha välillä eli reilusti nykysuositusten kummankin puolen.

Tuottojen ja kustannusten laskentaa varten ennustettiin kantohintojen, lannoitteiden hintojen, työpalkkojen ja metsäveron tuleva kehitys tutkimusjakson aikana. Ennustamiseen käytettiin ko. hintasarjojen aiempaa kehitystä ja näistä pienimmän neliösumman menetelmällä laadittua lineaarista trendiä. Ennusteisiin liittyvä riski otettiin huomioon laskelmissa. Ennusteet on esitetty kuvissa 3–10 sekä matemaattisesti taulukossa 21. Tuotoista ja kustannuksista on esimerkkejä taulukoissa 6–17.

Metsälötasoisia laskelmia varten kehitettiin lineaarisen mallin pohjalta riskirajoitteinen ohjelmointimalli. Mallissa voidaan ottaa huomioon päätöksentekijän riskikäyttäytyminen. Mallissa tavoitteena on toistuvilla lannoituksilla aikaansaadun metsälön eri metsiköiden lannoitetuilla pinta-aloilla painotetun keskimääräisen sisäisen koron maksimointi. Rajoituksina mallissa on lannoituksiin käytettävä markkamäärä ja kestävien hakkuumahdollisuuksien säilyminen tulevaisuudessa. Mallin kertoimet ovat normaalisti jakautuneita satunnaismuuttujia.

Sisäisten korkojen ja nykyarvojen odotusarvot ja hajonnat on esitetty ryhmiteltynä puulajin, pituusboniteetin, ikäluokan ja levitetyn puhtaan kokonaistyyppimäärän mukaisiin luokkiin esimerkinomaisesti kuvissa 11–22. Sisäisten korkojen odotusarvoihin vaikuttavat lannoituksella saatu kasvureaktio, kantohinnat, lannoituskustannukset ja työpalkat sekä hajontoihin vastaavat hajonnat. Esimerkkejä sisäisen

koron kehitystä kuvaavista polynomeista 95 %:n luottamusväleinen on esitetty myös taulukoissa 23–27. Hajontojen selville saamiseksi suoritettiin useita kymmeniä miljoonia simulointeja antaen lannoitemäärän ja -lajin vaihdella siten, että kaikki mahdolliset lannoituskombinaatiot tulivat huomioituiksi. Samanaikaisesti kaikki aiemmin esitetyt tuotto- ja kustannustekijät vaihtelivat vapaasti jakautumiensa mukaisesti. Simulointi suoritettiin ns. Monte-Carlo -periaatteella (ks. Naylor & Vernon 1969) kuten luvussa 7 on esitetty. Kustannuskertoimia ja lisäkuutiometriä rakenteita on esitetty esimerkkitaulukoissa 28–42.

Metsikkötason laskelmien perusteella lannoitusten lukumäärällä ei ole kovin-kaan suurta vaikutusta kannattavuustunnusten odotusarvoihin. Paras kannattavuus saavutettiin yleensä 3 tai 4 kertaa lannoitettaessa. Sen sijaan lannoitettavan metsikön ikä on ratkaiseva tekijä. Parhaita lannoituskohteita ovat 45–65 vuotiaat männiköt, joissa kasvupaikasta riippuen saatiin 22–41 % nimellinen sisäinen korko ja nykyarvo kohoaa 5 % laskentakorolla 4 000–5 000 markkaan/ha. Kuusikoissa päästiin pituusboniteetilla 5–22 % nimellisiin sisäisiin korkoihin ja 300–1 100 mk/ha nykyarvoihin. Metsänparannusrahoitus nosti sisäistä korkoa 5–10 prosenttiyksikköä ja nykyarvoja 1 000–2 000 mk/ha. Tulosten perusteella lannoitteena tulisi männiköissä suosia ureaa ja kuusikoissa oulunsalpietaria, mutta urealannoitukset tulisi tehdä syksyllä. Sopiva kerta-annos on männiköissä 150–200 kg N/ha ja kuusikoissa 100–120 kg N/ha. Toistuvilla lannoituksilla aikaansaatu puukuutiometri maksaa männiköissä keskimäärin 100–200 mk ja kuusikoissa 200–300 mk koko tarkastelujakson ajalta laskettuna.

Metsälötasolla asiaa tarkasteltaessa parhaita lannoituskohteita olivat pituusboniteetin 24 kasvatusmänniköt. Näissä lannoituksen tulisi tapahtua yleensä neljä kertaa neljän vuoden välein. Metsälötason laskelmien tulokset on esitetty taulukossa 43. Siinä on selvitetty, kuinka monta prosenttia kutakin kasvupaikkatyyppiä ja ikäluokkaa tulisi lannoittaa lannoituksiin käytettävän rahasumman ollessa rajoittava tekijä. Metsälökohtaisesta esimerkkilaskelmasta on kuusikot jätetty kokonaan pois metsikkötason laskelmissa saatujen tulosten perusteella.

9 Summary / Conclusion

The present study reports on the profitability of repeated fertilization in mineral soil forests in southern Finland. Calculations were conducted on both stand and woodlot levels. Profitability was evaluated using three instruments: nominal internal rate of interest, current value and a cost coefficient, the latter being a coefficient indicating the cost of an additional cubic metre of wood produced by repeated fertilization. The implementation of these methods involves the presence of a host of presuppositions. Current value calculations were conducted using three different calculation rates of interest. The investment period applied was eighteen years.

The yields and costs to be expected from the investment were determined to facilitate profitability calculations. Yields consisted of thinning income from sales of timber grown in fertilized stands and the difference between the final timber crops when positive in value and, as costs or reductions in income, the income from sales of timber grown in corresponding unfertilized stands, the fertilization costs and the difference between the final timber crops when negative in value. In calculating the overall profitability, the initial timber crop and area-based forest tax were included as costs. Some consideration was also afforded to the influence on profitability of forest improvement financing.

When calculating the growth and the additional growth induced by fertilization as well as changes in timber assortment proportions and the increase in diameter of the growing stock, use was made of mathematical models presented in previous growth and yield studies. This is to say that sample plot material was not directly used in this connection. The calculations were formulated separately for fertilized and non-fertilized stands. The calculation procedure is described in Figs. 1–2. The risk associated with the models was taken into account in the calculations.

Thinnings in the two stands were carried out separately when the basal area reached the upper limit defined in thinning models. The thinning models are presented in Table 5. Two to four fertilizations were performed at even intervals (of 12, 6 or 4 years) so that the last fertilization treatment was carried out 12 years after the first one. In pine stands the fertilizers used were urea and ammoniumnitrate with lime. In spruce stands we also used N and P. The fertilizer doses were allowed to vary within the range 80–240 kg N/ha; i.e. well on either side of the current recommended values.

Future developments in stumpage prices, fertilizer prices, labour costs and forest taxation were predicted to facilitate the calculation of yields and costs. Past trends and linear trends derived from these using the sum of least squares method were made use of in predicting. The risk associated with the predictions was taken into account in the calculations. The predictions are presented in Figs. 3–10 and in mathematical form in Table 21. Examples of yields and costs are presented in Tables 6–17. Woodlot-level calculations were facilitated by the development of a chance-constrained programming model based on a linear model. The model can be used to take into account the decision maker's risk behaviour. The purpose of the model is maximise the mean internal rate of interest (weighted with area fertilized) of different stands in stands raised through repeated fertilizations. The constraints in the model are the amount of money to be used for fertilization and the retaining of sustainable felling possibilities in the future. The coefficients in the model consist of normally distributed random variables.

Figs. 11–22 show by way of examples the expected values and distributions of

the internal rates of interest and the current values grouped by tree species, site index, age class and the amount of nitrogen applied. The expected values of the internal rates of interest are influenced by the fertilization-induced growth reaction, stumpage prices, fertilizer costs and labour costs. Deviation is influenced by the corresponding deviations. Examples of the polynomials (with 95 % confidence intervals) depicting the development of the internal rate of interest are presented in Tables 23–27. The deviations were determined by conducting several tens of millions of simulations with fertilizer amounts and types being allowed to vary so, that all possible fertilizer combinations were included. Alongside this variation, the yield and costs factors varied freely within the limits of their distributions. Examples of the cost coefficients and structures of the additional cubic metres of wood produced are presented in Tables 28–42.

When examined with stand-level calculations as the basis, the number of fertilizer applications did not have a considerable influence on the expected values of the profitability parameters. The best profitability was generally achieved with 3 or 4 fertilizer applications. On the other hand, stand age was a decisive factor. The best fertilization targets were pine stands 45–65 of age in which, depending on site quality, the nominal internal rates of interest varied between 22–41 % and the net present value (when using a calculation rate of interest of 5 %) rose to 2 000–5 000 FIM/ha. Stands of Norway spruce produced correspondingly internal rates of interest between 6–23 % and net present values varied from 300 to 650 FIM/ha. Forest improvement financing raised the internal rate of interest by 5–10 percent units and current values by 1 000–2 000 FIM/ha. The results obtained indicate, that urea should be used with pine and ammoniumnitrate with lime with spruce. An appropriate dose in pine stands would appear to be 150–200 kg N/ha and in spruce stands 100–120 kg N/ha. The additional cubic metre of wood obtained by repeated fertilization costs an average of 100–200 FIM in the case of pine and 200–300 FIM in the case of spruce, when calculated for the entire period examined.

On examining the matter at the woodlot level, the best fertilization targets were thinning stands of pine on sites corresponding to the height-based site index of 24. Fertilization in such stands should usually be done four times at intervals of four years. The results of woodlot-level calculations are presented in Table 43. It shows how many percent of each site type and age class should be fertilized with the sum of money available for fertilization being the constraining factor. Stands of spruce have been omitted from the woodlot-specific sample calculation on the basis of the results obtained from stand-specific calculations.

Kirjallisuus

- Allen, R.G.D. 1960. *Mathematical Economics*. MacMillan and Co. New York. 812 p.
- Beale, E.M.L. 1968. *Mathematical programming in practice*. Pitman Publishing. London. 191 p.
- Bellman, R. and Cook, K.L. 1963. *Differential-Difference Equations*. Academic Press. New York. 455 p.
- and Dreyfus, S. 1962. *Applied Dynamic Programming*. Princeton University Press. Princeton, N.J. 363 p.
- Buhlmann, H. 1970. *Mathematical methods in risk theory*. Springer-Verlag. Berlin. 201 p.
- Charnes, A. & Cooper, R.W. 1959. *Chance-constrained programming*. *Management Science* 10: 73-79.
- & Symonds, G. 1958. *Cost horizons and certaining equivalents: An approach to stochastic programming of heating oil*. *Management Science* 10: 73– 79.
- Cox, D. & Miller, R. 1965. *The theory of stochastic processes*. Methuen & Co Ltd. London. 398 p.
- Dietrich, C. 1973. *Uncertainty, calibration and probability*. Adam Hilger. London. 411 p.
- Draper, N.R. & Smith, H. 1966. *Applied regression analysis*. John Wiley & Sons, Inc. New York. 709 p.
- Dudenicz, E.J. & Mishra, S.N. 1988. *Modern mathematical statistics*. Addison-Wesley. New York. 864 p.
- Fan, L.T. 1966. *The Continuous Maximum Principle - A Study of Complex Systems Optimization*. John Wiley & Sons. New York. 411 p.
- Fisher, I. 1930. *The theory of interest*. The MacMillan Company. 566 p.
- Geoffrion, A. 1967. *Stochastic programming with aspiration or fractile criteria*. *Management Science*. 9: 672–679.
- Hadley, G. 1964. *Nonlinear and Dynamic Programming*. Reading, Mass.: Addison-Wesley. 484 p.
- Harvey, A.C. 1981. *Time Series Models*. Philip Allan Publishers Limited. Southampton. 229 p.
- Heinonen, J. 1981. *Koelajen peruslaskenta. (Programme for calculating stand characteristics)*. *Moniste. Metsäntutkimuslaitos, matemaattinen osasto*. 32 s.
- Hillier, F.S., and Lieberman, G.J. 1974. *Introduction to operations Research*. Holden-Day. San Francisco. 639 p.
- Hirshleifer, J. 1970. *Investment, interest and capital*. Prentice-Hall Inc. Hoel, P., Port, S. & Stone, C. 1972. *Introduction to Stochastic Processes*. Houghton Mifflin Company. Boston. 189 p.
- Hoer, H.F. & Solberg, B. 1992 *Potential efficiency of fixing CO₂ in forest biomass -*

principal issues and empirical investigation. A manuscript for Forest Science. NLH. Ås. 38 s.

Honko, J. 1966. Investointien suunnittelu ja tarkkailu. WSOY. Porvoo. 235 p.

Hämäläinen, J. 1973. Profitability comparisons in timber growing: underlying models empirical applications. CIFF 90(3). 178 p.

– , Laakkonen, O. & Kukkola, M. 1989. Toistuvan lannoituksen kannattavuus kangasmailla. Summary: Profitability of repeated fertilization on mineral soils. FF 740. 20 p.

Johnsen, E. 1968. Studies in multiobjective decision models. Berlingska Boktryckeriet. Lund. 628 p.

Kaplan, E. 1964. Ordinary Differential Equations. Reading, Mass.: Addison-Wesley. 534 p.

Karjalainen, T. & Kellomäki, S. 1992. Kasvihuoneilmiötä voidaan hidastaa metsien avulla. Metsä ja Puu 10.

Keipi, K. & Laakkonen, O. 1980. Päätehakkuikäisten metsiköiden urealannoituksen kannattavuusvertailuja. Summary: Profitability comparisons of urea fertilization in old stands. FF 420. 35 p.

Keltikangas, M. 1973. Aikatekijän käsittely puunkasvatukseen liittyvissä laskelmissa. Summary: Handling of time factor in investment calculations concerning timber growing. Helsingin yliopiston metsätalouden liiketieteen laitoksen julkaisu nro 10. 35 p.

Kukkola, M. & Saramäki, J. 1983. Growth response in repeatedly fertilized pine and spruce stands on mineral soils. Seloste: Toistuvalla lannoituksella saatava kasvunlisäys kivennäismaiden männiköissä ja kuusikoissa. CIFF 114. 55 p.

Kula, E. 1988. The economics of forestry. Modern theory and practice. Timber Press. Wilshire Portland. USA. 185 p.

Kuusela, K. 1961. Volume and increment calculation of a sample plot determined with the relascope. Selostus. Kuution ja kasvun laskenta relaskoopilla määritetyllä koelalla. AFF 71(6). 18 p.

Laakkonen, O. 1979. Optimal distribution of regional seedling production by nurseries; An economic study. Seloste: Tuotantomäärien optimaalinen jakaminen alueen taimitarhoille; Taloudellisuustarkastelu. CIFF 95. 32 p.

– , Keipi, K. & Lipas, E. 1983. Typpilannoituksen kannattavuus varttuneissa kangasmetsissä. Summary: Profitability of nitrogen fertilization in mature forests on mineral soils. FF 577. 20 p.

– 1989. Toistuvan lannoituksen kannattavuus Etelä-Suomen kuivahkon kankaan männiköissä. Summary: The profitability of repetitive fertilization on dryish mineral soil in southern Finland. FF 741. 26 p.

Laasasenaho, J. 1982. Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch. Seloste: Männyn, kuusen ja koivun runkokäyrä- ja tilavuusyhtälöt. CIFF 108. 74 p.

Malik, H. & Mullen, K. 1975. Applied statistics for portfolio selection. Management Science. Vol. 1. 15 p.

Metsä- ja uittoalan työehtosopimukset...

Metsätilastolliset vuosikirjat...

Montgomery, D. & Johnson, L. 1976. Forecasting and time series analysis. McGraw-Hill. New York. 304 p.

Murphy, R.E. 1965. Adaptive Processes in Economic Systems. Academic Press. New York. 209 p.

Naylor, T.H. & Vernon, J.M. 1969. Microeconomics and decision models of the firm. Harcourt, Brace & World, Inc. New York. 482 p.

Näslund, B. 1967. Decisions under risk. Repro Print Ab. Stockholm. 188 p.

Puro, T. 1977. Operaatio metsälannoitus II. Tuloksia uusintalannoituksesta. Summary: Results of the second fertilization with nitrogen. FF 304 15 p.

Puun hintasuositussopimukset 1.4.1990–31.3.1991. Maataloustuottajien Keskusliiton Metsävaltuuskunnan ja Teollisuuden Puuyhdistyksen sopimus.

Searle, S.R. 1971. Linear models. John Wiley & Sons. New York. 523 p.

Sengupta J. & Portillo-Campbell, J. 1970. A fractile approach to linear approximations for a chance constraint. Management Science 17: 736–749.

Seppälä, Y. 1971. Constructing sets of uniformly tighter linear approximations for a chance constraint. Management Science 17: 736–749.

Simon, H.A. 1956. Dynamic Programming Under Uncertainty with a Quadratic Function. Econometrica XXIV: 74–81.

Teicherow, D. 1964. An Introduction to Management Science Deterministic Models. John Wiley & Sons. New York. 713 p.

– , Robichek, A.A. & Montalbano, M. 1965. Mathematical analysis of return under certainty. Management Science. Vol 11. Nr 3. 9 p.

Theil, H., Boot, U. & Klock, T. 1965. Operations research and quantitative economics. McGraw-Hill. New York. 258 p.

Törnqvist, L. 1974. Aikasarjojen analyysi ja ennustaminen. Oy Gaudeamus Ab. Jyväskylä. 125 s.

Vuokila, Y. & Väliäho, H. 1980. Viljeltyjen havumetsiköiden kasvatusmallit. Summary: Growth and yield models for conifer cultures in Finland. CIFF. 99(2). 271 p.

Vuokila, Y. 1983. Viljelymetsiköiden harvennusmallit. Sammanfattning: Gallringsmallar for odlade bestend i Finland. Summary: Thinning models for forest cultures in Finland. FF 556. 25.

Wilde, D. 1964. Optimum Seeking Methods. Prentice-Hall. Englewood Cliffs, N.J. 202 p.



411 011

Kierrätykseen sopiva tuote
Alhaiset päästöt valmistuksessa

Hakapaino Oy, Helsinki 1994

Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 498

The Finnish Forest Research Institute. Research Papers 498

ISBN 951-40-1363-8

ISSN 0358-4283