

Loppuraportti: Turvemaiden kestävän metsänhoidon talouspaketti

Anssi Ahtikoski, Soili Haikarainen, Hannu Hökkä, Artti Juutinen, Pentti Niemistö, Paavo Ojanen, Jaakko Repola, Markku Saarinen, Sakari Sarkkola, Jouni Siipilehto ja Leena Stenberg

Luonnonvarakeskus, Luke

Johdanto

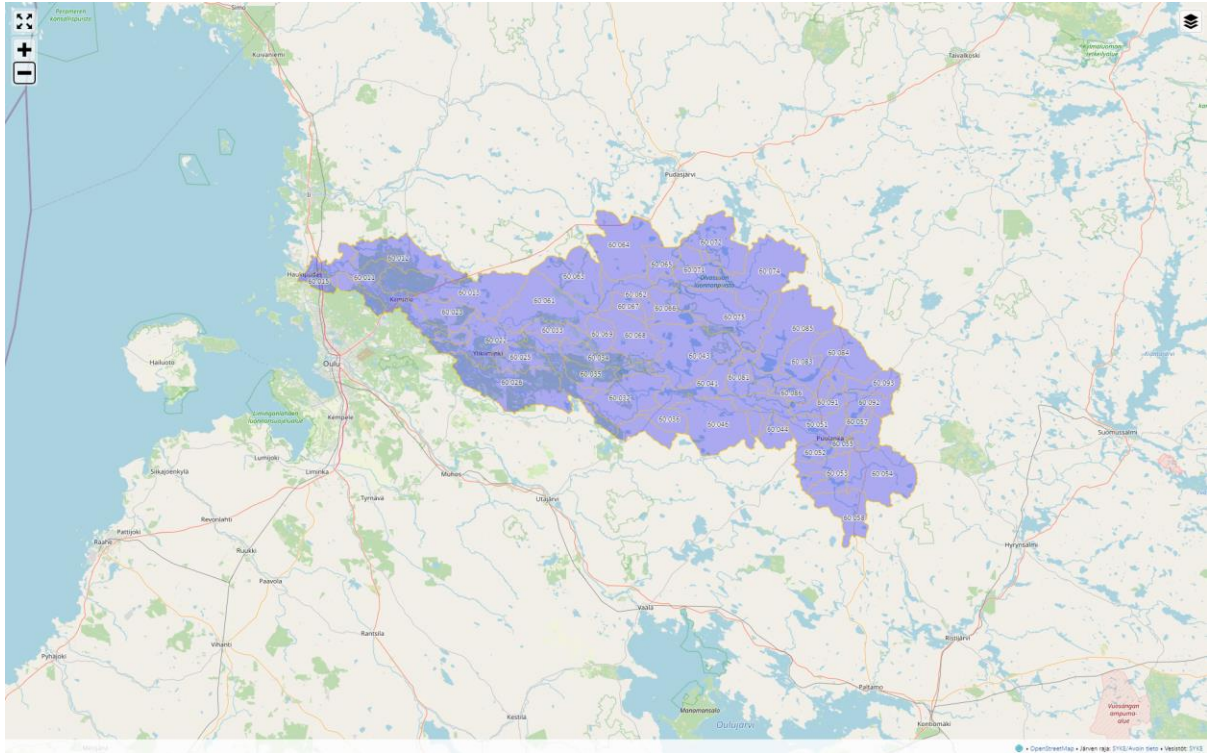
Vuonna 2020 alkaneessa Luonnonvarakeskuksen ”Kestävää metsänhoitoa turvemaiilla – ratkaisuja taloudellisiin ja ekologisiin ongelmiin”, eli SUOPPP-projektin (public-private partnership) työpaketissa ”Turvemaiden kestävän metsänhoidon talouspaketti” (päättös: VN/5623/2020) keskityttiin viiteen erilliseen kokonaisuuteen, joille tässä loppuraportissa esitetään talouslaskelmien avulla ratkaisuja. Nämä viisi kokonaisuutta (OSIO 1-5) olivat: jatkuvapeitteisen kasvatuksen kannattavuus mäntyvaltaisissa turvemaiden metsiköissä (1), tuhkalannoituksen kannattavuus (2), kuusen uudistamisvaihtoehtojen kannattavuusvertailu (3), vaihtoehtoisten hakkuumenetelmien kannattavuus turvemaiilla (4) ja metsänkäsittelytapojen kokonaistaloudellinen tarkastelu (5). ”Turvemaiden kestävän metsänhoidon talouspaketti” sai jatkoajan (muutospäättös: VN/5623/2020-MMM-4) vuoden 2023 syyskuun loppuun, koska jatkuvapeitteisen metsänkasvatuksen turvemaiden puuston kasvumalleja ei saatu alkuperäisessä aikataulussa valmiiksi ja edelleen integroitua Motti-metsikkösimulaattoriin.

Tässä loppuraportissa esitetään kaikille viidelle kokonaisuudelle (OSIO 1-5) talouslaskelmien avulla ratkaisuja, joita voidaan soveltaa joko sellaisenaan käytännön metsätaloudessa tai hyödyntää päätöksenteon tukena. Lisäksi metsänkäsittelytapojen kokonaistaloudellisessa tarkastelussa (5) tuotettiin uutta tutkimustietoa päästöjen ja vesistökuormituksen kustannustehokkuudesta turvemaiden mäntyvaltaisissa metsiköissä. Tulosten painoarvoa lisää se, että osa tuloksista on jo julkaistu kansainvälisissä tiedesarjoissa. Loppuraportissa esitetään tiivistetysti kunkin kokonaisuuden tausta, laskennassa käytetyt menetelmät ja päätulokset. Kaikkien kokonaisuuksien (1-5) johtopäätökset esitetään keskitetysti loppuraportin Johtopäätökset-kappaleessa.

OSIO 1: Jatkuvapeitteisen kasvatuksen kannattavuus mäntyvaltaisissa turvemaiden metsiköissä

Jatkuvapeitteistä metsänkasvatusta verrattiin jaksolliseen metsänkasvatukseen Pohjois-Pohjanmaalla, Kiiminkijoen valuma-alueella seuraavasti. Ensiksi Kiiminkijoen valuma-alueesta (Kuva 1) muodostettiin miniatyyri, jossa valuma-alueen turvemaiden männiköt muodostivat simulointiaineiston. Miniatyyri a oletettiin 1 000 hehtaarin suuruiseksi. Kiiminkijoen valuma-alueen ojitettujen turvemaiden männiköiden kokonaispinta-ala on 12 893 ha. Miniatyyri muodostettiin teknisesti niin, että alkuperäisen valuma-alueen suotyyppien suhteelliset osuudet (%) pysyivät

identtisinä. Miniattyyrin muodostamisen tarkoituksena oli merkittävästi pienentää simuloitavien esimerkkimetsiköiden määrää kuitenkin hävittämättä mitään oleellisia metsiköiden piirteitä – kuten eri suotyyppien edustavuus tai puustojen keskitunnukset. Tässä yhteydessä on korostettava, että simuloinnit olivat aikaa vieviä, koska ne toteutettiin kuvioittain Motti-metsikkösimulaattorilla, eikä ns. eräajona. Yksittäisiin simulointeihin jouduttiin, koska Motin eräajoversiossa ei simulointien toteutuksen ajanhetkellä (syksy 2022- alkukevät 2023) ollut käytössä jatkuvapeitteisen metsänkasvatuksen malleja.



Kuva 1. Kiiminkijoen valuma-alue Pohjois-Pohjanmaalla.

Koska tämän osion päätarkoituksena oli määrittää jatkuvapeitteisen metsänkasvatuksen kannattavuus niin, että kannattavuutta voitaisiin peilata olemassa olevaan metsänkasvatuksen menetelmään, on ensiarvoisen tärkeää, että tarkasteluiden lähtöpuustot ovat identtisiä. Kiiminkijoen valuma-alueen turvemaiden mäntyvaltaisten metsiköiden kuviodatasta poimittiin keskiarvopuustot kullekin edustavalle suotyyppille. Kaikkiaan eri suotyyppejä oli aineistossa 11. Jos suotyypin edustavuus oli yli 8 % kokonaispinta-alasta, niin tällöin ko. suotyypin kuviodata pilkottiin keskiarvoon sekä ala- ja ylä- kvartiileihin (10 %; kriteerinä puuston kokonaistilavuus). Menettelyllä pyrittiin sisällyttämään lähtöpuustojen vaihtelua mukaan tarkasteluihin (Taulukko 1).

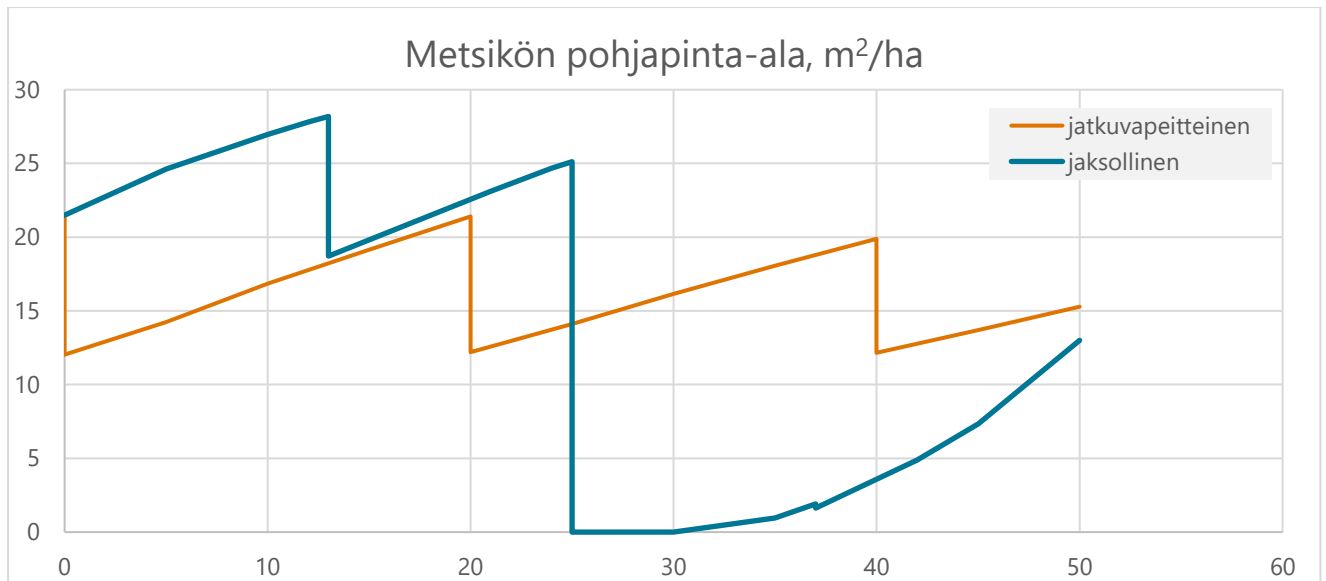
Taulukko 1. Kiiminkijoen valuma-alueen miniattyyrin suotyypit, niiden suhteellinen pinta-ala ja simuloinnin lähtöpuustotiedot. Harmaalla väripohjalla rämeet, valkoisella korvet.

Suotyyppi & tarkenne	suhteellinen pinta-ala	Ikä, v	Keskipituus, m	Keskilpm, cm	PPA, m ² /ha	Runkoluku, kpl/ha	Tilavuus, m ³ /ha
Varputurvekangas, keskiarvo	20.6%	59 ¹⁾	11.0	14.6	8.8	747	51.9
		58	10.0	13.1	1.2	116	6.8
		46	10.1	11.0	1.2	150	6.4
Varputurvekangas, yläkvartiili ²⁾	3.2%	65	15.3	19.1	15.8	723	119
		70	13.6	17.5	3.7	211	25.6
		54	13.2	14.0	4.0	335	25.4
Puolukkaturvekangas, alakvartiili	6.0%	47	9.2	11.9	5.3	813	27.5
		42	7.6	10.3	0.4	68	1.9
		34	7.5	8.3	0.6	205	2.7
Puolukkaturvekangas, keskiarvo	49.5%	61	13.5	17.3	12.4	767	83.7
		61	11.6	15.4	1.8	132	10.4
		50	11.5	13.1	1.9	189	10.7
Puolukkaturvekangas, yläkvartiili	4.8%	67	16.1	20.7	15.7	611	123.8
		73	14.5	19.4	4.5	215	31.8
		57	13.7	15.0	5.0	386	33.0
Mustikkaturvekangas, alakvartiili	0.8%	50	10.3	13.7	6.2	641	36.3
		49	9.2	12.8	1.4	168	6.9
		39	9.3	10.8	1.1	372	5.3
Mustikkaturvekangas, keskiarvo	6.6%	64	15.0	19.5	12.9	581	95.7
		67	13.1	17.8	3.1	175	19.9
		53	12.8	14.4	3.1	258	18.6
Mustikkaturvekangas, yläkvartiili	0.8%	72	16.9	21.7	15.1	512	123.9
		77	15.3	21.0	6.5	259	47.2
		63	14.5	16.0	7.3	497	49.2
Puolukkaturvekangas, keskiarvo	2.2%	57	13.4	17.9	8.3	494	57.0
		60	11.9	16.3	4.8	350	29.8
		50	12.1	13.8	5.2	540	31.6
Mustikkaturvekangas, keskiarvo	4.7%	62	14.5	19.7	8.2	365	61.0
		66	13.4	18.9	6.3	319	42.3
		55	13.1	15.3	7.0	556	45.3
Ruohoturvekangas, keskiarvo	0.8%	59	14.4	18.8	7.2	316	54.6
		66	13.4	18.3	6.0	280	41.0
		52	13.3	15.0	7.7	519	51.0

¹⁾ ylin lukuarvo edustaa mäntyä, toinen rivi kuusta, kolmas hieskoivua, 2) ainoastaan yläkvartiili otettiin mukaan, sillä alakvartiiliin mukainen lähtöpuusto osoittautui tekniseksi haasteeksi

Puuston kehitysennusteet sekä jatkuvapeitteisessä että jaksollisessa kasvatuksessa laadittiin Motti-metsikkösimulaattorilla (esim. Salminen ym. 2005, Hynynen ym. 2015, Ahtikoski ja Hökkä 2019) siten, että simuloinnit aloitettiin lähtöpuustotiedoista.

Lähtökohtaisesti kullekin lähtöpuustolle simuloitiin vähintään kaksi puuston kehitysennustetta: jatkuvapeitteinen ja jaksollinen. Kuvassa 2 on havainnollistettu Mustikkaturvekankaan (korpi) puuston kehitysennusteet seuraavalle 50 vuodelle. Todettakoon, että tämän projektin toisessa osiossa (OSIO 5) hyödynnettiin tämän osion Motti-simulaatioiden kasvu- ja tuotostuloksia nimenomaan seuraavan 50 vuoden aikana, vaikka taloustulokset lasketaankin nykyhetkestä ikuisuuteen. Tällainen menettely, jossa biologiset tunnuksot ovat määritetty eri aikajaksolle kuin taloustulokset, on alan kirjallisuudessa varsin yleinen tapa (esim. Juutinen ym. 2020a).



Kuva 2. Esimerkki: mustikkaturvekankaan (korpi) puuston kehityssennusteet jatkuvapeitteisen ja jaksollisen metsänkasvatuksen mukaan. Vaaka-akselilla simulointiaika vuosina lähtötilanteesta.

Talouselaskennassa sovellettiin viimeisintä koko maan 10 vuoden aikasarjaa metsänhoidon kustannusten (Luken Tilastotietokanta 2022, Metsänhoito- ja metsänparannustyöt) ja kantohintojen osalta (Luken Tilastotietokanta 2022, Teollisuuspuun kauppa). Aikasarja kattoi kalenterivuodet 2012–2021 ja Taulukossa 2 on esitetty keskiarvot reaalisina (Tilastokeskus 2023).

Taulukko 2. Talouselaskennassa käytetyt reaaliset kantohinnat ja metsänhoidon kustannukset. (MäT=mäntytukki, MäK=mäntykuitu, KuT=kuusitukki, KuK=kuusikuitu, KoT=koivutukki ja KOK=koivukuitu).

Hakkuutapa	MäT (MäK), €/m ³	KuT (KuK), €/m ³	KoT (KoK), €/m ³
Ensiharvennus	39.23 (12.11)	40.68 (11.93)	32.75 (11.84)
Harvennus	48.00 (15.35)	48.82 (15.77)	37.03 (14.76)
päätehakkuu	56.68 (18.19)	57.97 (19.47)	43.60 (17.62)
Metsänhoidon kustannukset, €/ha			
Uudistusalan raivaus	194.17		
Äestys	227.64		

Laikkumätästys	411.62
Kylvö	273.35
Istutus	706.18
Taimikon varhaishoito	388.03
Taimikonhoito	464.41
Nuoren metsän kunnostus	460.85
Metsälannoitus	387.75
Kunnostusojitus	241.72

Talouselaskentaa varten puuston kehitysennusteet laadittiin seuraavasti. Kullekin lähtöpuustolle simuloitiin sekä jatkuvapeitteisen että jaksollisen kasvatuksen mukaisia vaihtoehtoisia kasvatusketjuja, joista valittiin aina taloudellisesti parhaan tuloksen mukainen kasvatusketju molemmissa kasvatusmenetelmissä. Tässä yhteydessä on syytä korostaa, että raportissa ei sovellettu metsikkötason optimointia vaan kokeiltiin simuloimalla vaihtoehtoisia kasvatusketjuja, joiden määrä vaihteli lähtöpuustoittain siten, että minimissään vaihtoehtoja oli ainoastaan yksi molemmissa kasvatusmenetelmissä ja maksimissaan 3–4 kpl. Perusidea oli, että kasvatusketju olisi mahdollisimman realistinen – niin kasvu- ja tuotoksen kuin puustopääoman mukaan. (esim. ei liian alhaisia pohjapinta-aloja jatkuvapeitteisessä kasvatuksessa, jotta puustolla on riittävä haihduntapotentialiaali – simuloinnissa ei alle 10 m²/ha puustopääomia hakkuun jälkeen). Simulointien yhteydessä tarkkailtiin mm. juoksevaa keskikasvua (m³/ha/vuosi), runkolukua ja luonnonpoistumaa.

Jatkuvapeitteisen kasvatuksen kohdalla Motti-simuloinneissa edettiin kaksivaiheisesti. Ensin simuloitiin ns. *konversiovaihe*, jossa ensimmäisen ojituksenjälkeisen puusukupolven turvemaan mäntymetsä muutettiin eri-ikäisrakenteiseksi joko yhden tai kahden hakkuun kautta. Tämän jälkeen simuloitiin ns. *steady state* -vaihe (tasapainotila), jota toistettiin ikuisuuteen. Vastaavasti, jaksollisen kasvatuksen mukaisessa simuloinnissa lähtöpuustojen kehitystä simuloitiin noudattamalla Hyvän metsänhoidon suosituksia (Äijälä ym. 2014). Nykypuusukupolven päätehakkuun jälkeen perustettiin uusi metsä viljelemällä paitsi varputurvekankailla, jotka uudistettiin luontaisesti. Simulointien mukaiset hakkuukertymät, hakkuusykli ja kiertoajat on esitetty Taulukossa 3 lähtöpuustoittain.

Taulukko 3. Hakkuiden ajoitus, hakkuukertymät ja kiertoaika (jaksollinen kasvatus) lähtöpuustoittain. Harmaalla väripohjalla rämeet, valkoisella korvet.

Suotyyppi & tarkenne (lähtöpuusto)	jatkuvapeitteinen		jaksollinen kasvatus	
	konversio	steady state	nykyinen ⁴⁾	seuraavat ⁴⁾
Varputurvekangas, keskiarvo	15: 32.7 (8.5) ¹⁾ 45: 41.6 (23.4) ²⁾	45 [30]:37.2 (16.0) ³⁾	48: 65.6 (18.3) ⁴⁾ PH56: 141.9 (60.5)	SP16: 21.3 (15.7) ⁵⁾ PH115: 164.4 (30.1)
Varputurvekangas, yläkvartiili	0: 81.4 (36.6) 30: 51.2 (28.0)	30 [30]:51.2 (28.0)	0: 53.9 (12.8) PH50: 205.5 (103.4)	SP16: 21.3 (15.7) PH115: 164.4 (30.1)
Puolukkaturvekangas, alakvartiili	40: 53.3 (31.8)	40 [25]: 53.3 (31.8)	PH48: 221.2 (124.0)	44: 49.3 (2.0) 56: 62.1 (13.4) PH74: 271.6 (182.0)
Puolukkaturvekangas, keskiarvo	10: 55.8 (31.4) 35: 61.8 (41.7)	35 [25]:58.8 (36.6)	24: 65.4 (30.0) PH34: 218.2 (143.7)	44: 49.3 (2.0) 56: 62.1 (13.4) PH74: 271.6 (182.0)
Puolukkaturvekangas, yläkvartiili	0: 97.9 (49.3) 20: 55.5 (37.9)	20 [25]:51.3 (34.1)	0: 64.2 (16.5) PH20: 217.3 (129.8)	44: 49.3 (2.0) 56: 62.1 (13.4) PH74: 271.6 (182.0)
Mustikkaturvekangas, alakvartiili	30: 56.8 (31.7) 50: 63.9 (43.5)	50 [20]:60.4 (37.6)	PH40: 263.0(143.9)	39: 56.0(2.6) 51: 76.5(20.4) PH67: 287.9(200.4)
Mustikkaturvekangas, keskiarvo	5: 70.3 (42.9) 25: 65.1 (42.1)	25 [20]:67.7 (42.5)	PH26: 274.5(167.2)	39: 56.0(2.6) 51: 76.5(20.4) PH67: 287.9(200.4)
Mustikkaturvekangas, yläkvartiili	0: 114.3(62.1) 15: 67.8(43.0)	15 [20]:64.7(40.0)	0: 71.9(23.5) PH17: 149.0(138.0)	39: 56.0(2.6) 51: 76.5(20.4) PH67: 287.9(200.4)
Puolukkaturvekangas, keskiarvo	5: 52.8(19.6) 25: 50.8(28.2)	25 [25]:54.4(32.1)	17: 55.5(20.2) PH32: 153.6(65.8)	46: 60.1(3.3) 64: 85.9(42.5) PH89: 362.8(314.3)
Mustikkaturvekangas, keskiarvo	0: 62.9(26.1) 20: 62.6(37.4)	20 [20]:57.2(2.9)	13: 71.7(25.8) PH25: 226.3(137.2)	36: 51.9(0.3) 52: 86.4(37.9) PH80: 405.7(349.8)
Ruohoturvekangas, keskiarvo	0: 59.9(27.0) 15: 56.0(24.3)	15 [20]:55.3(25.9)	9: 63.7(12.1) PH24: 193.0(164.3)	35: 54.1(0.1) 47: 119.2 (90.6) PH68: 352.3(307.2)

¹⁾lihavoitu lukuarvo (15) ilmoittaa hakkuun ajankohdan nykyhetkestä vuosina, ensimmäinen lukuarvo, 32.7 hakkuukertymän ja lukuarvo suluissa (8.5) tukkikertymän, m³/ha, ²⁾lihavoitu lukuarvo (45) kuvaa hakkuun ajankohtaa nykyhetkestä vuosina, ensimmäinen lukuarvo, 41.6 hakkuukertymän ja lukuarvo suluissa (23.4) tukkikertymän, m³/ha, ³⁾lihavoitu lukuarvo 45 ilmoittaa, milloin steady state-vaihe alkaa, vuosia nykyhetkestä, hakasuluissa oleva lukuarvo [30] hakkuusyklin pituuden steady state-vaiheessa ja ensimmäinen lukuarvo kaksoispisteen jälkeen hakkuukertymän, 37.2 ja lukuarvo suluissa (16.0) tukkikertymän, m³/ha, ⁴⁾ ”nykyinen” tarkoittaa nykypuusukupolvea, ”seuraavat” kaikkia tulevia puusukupolvia (päättymätön toistuva sarja), lihavoitu lukuarvo (48) ilmoittaa harvennushakkuun ajankohdan, ensimmäinen lukuarvo, 65.5 hakkuukertymän ja suluissa oleva lukuarvo (18.3) tukkikertymän, ”PH56” tarkoittaa päätehakkuuta, joka ajoittuu 56 vuoden päähän nykyhetkestä, ⁵⁾ ”SP16” tarkoittaa siemenpuiden poistoa 16 vuoden päästä nykyhetkestä, ensimmäinen lukuarvo, 21.3 kuvaa hakkuukertymää (m³/ha), suluissa oleva lukuarvo (15.7) tukkikertymää, ”PH115” tarkoittaa 115 vuoden päässä olevaa päätehakkuuta metsikön perustamishetkestä.

Seuraavien 50 vuoden aikana jatkuvapeitteisessä kasvatuksessa kasvu ja tuotos oli keskimäärin noin 20 %-yksikköä pienempi kuin jaksollisessa kasvatuksessa. Tämä vastaa viimeaikaisten tutkimusten tuloksia (Hynynen ym. 2019, Bianchi ym. 2020).

Teknisesti jatkuvan kasvatuksen taloustulos määritettiin alla olevan kaavan avulla:

$$\Pi_{CCF} = \sum_{i=0}^T b^{t_i} \sum_{l=1}^L CR_{t_i}^l + \frac{b^{t_S} * CR_{t_S}}{1-b^{t_S}} * b^{t_T} \quad [1]$$

, jossa CR^l on hakkuutulot konversiovaiheessa vuonna t_i , €/ha, $l = 1, \dots, L$, t_S on hakkuusykli *steady state*-vaiheessa, vuosia, b on diskonttaustekijä eli $b = 1/(1+r)$, missä r on laskentakorko (%), t_T on aika lähtötilanteesta (vuosia) kunnes saavutetaan *steady state*. Lyhyesti, kaavan oikeanpuolen kaksi ensimmäistä summaa kuvaa harvennusten taloutta siihen asti, kunnes *steady state* saavutetaan, ja kolmas termi kuvaa *steady state* -tilan taloustulosta päättymättömän sarjan summana.

Vastaavasti jaksollisen kasvatuksen taloustulos määritettiin kaavalla:

$$\Pi_{RF} = \sum_{i=0}^T b^{t_i} \sum_{k=1}^K CR_{t_i}^k + \frac{\sum_{n=1}^N b^{t_n} \sum_{h=1}^H CR_{t_n}^h - \sum_{m=0}^M b^{t_m} \sum_{p=1}^P sc_p t_m}{1-b^{t_N}} * b^{t_T} \quad [2]$$

, jossa CR^k on hakkuutulot nykypuusukupolvessa vuonna t_i , €/ha, $k=1, \dots, K$, CR^h on seuraavassa puusukupolvessa hakkuutulot vuonna t_n , €/ha, $h=1, \dots, H$, t_N on seuraava puusukupolven kiertoaika vuosina, sc_p on metsänhoidon kustannukset työajissa p vuonna t_i , €/ha, b on diskonttaustekijä (Ks. kaava [1]) ja t_T on aika lähtötilanteesta (vuosia) kunnes uusi puusukupolvi perustetaan nykypuusukupolven päätehakkuun jälkeen.

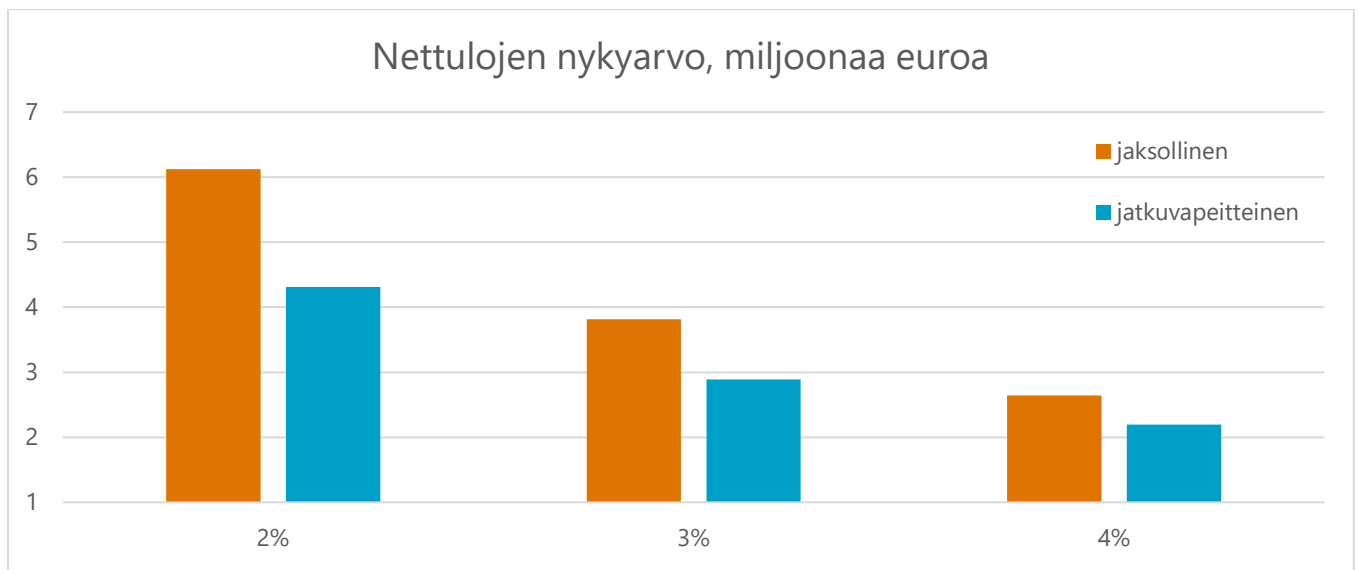
Taloustulokset osoittavat varsin selkeästi jaksollisen kasvatuksen olevan kannattavampaa kuin jatkuvapeitteinen kasvatus (Taulukko 4). Pääosin tämä johtuu lähtöpuustojen rakenteesta, mutta tässä yhteydessä on korostettava, ettei metsänkäsittelyä optimoitu vaan simuloinneissa pyrittiin ensisijaisesti tuottamaan sellaisia metsänkäsittelyvaihtoehtoja, jotka olisivat käytännössä suoraviivaisia toteuttaa. Lisäksi simuloinneissa vältettiin käsittelyitä, jotka nykytietämyksen valossa ovat epävarmoja vaikutuksiltaan. Esimerkiksi, jatkuvapeitteisessä kasvatuksessa hakkuun jälkeen alhainen pohjapinta-ala (< 8 m²/ha), saattaa edellyttää kunnostusojitusta. Tässä raportissa kunnostusojitusta ei kategorisesti oleteta tehtävän jatkuvapeitteisessä kasvatuksessa. Näin ollen hakkuun jälkeen pohjapinta-alan tuli olla vähintään 10 m²/ha jatkuvapeitteisen kasvatuksen simuloinneissa.

Taulukko 4. Jaksollisen ja jatkuvapeitteisen kasvatuksen taloustulokset kolmen eri laskentakorkokannan (2 %, 3 % ja 4 %) mukaan, €/ha. Talouslaskennassa aikajänne lähtötilanteesta ikuisuuteen (Ks. kaavat [1], [2]). Lihavoidulla lukuarvot tilanteissa, joissa jatkuvapeitteinen on kannattavampi kuin jaksollinen kasvatus. Harmaalla väripohjalla rämeet, valkoisella korvet.

Suotyyppi & tarkenne	jaksollinen kasvatus	jatkuvapeitteinen kasvatus
Varputurvekangas, keskiarvo	1906 / 1130 / 702 ¹⁾	1811 / 1113 / 773 ²⁾
Varputurvekangas, yläkvartiili	3950 / 2743 / 2065	4705 / 3700 / 3230
Puolukkaturvekangas, alakvartiili	4394 / 2256 / 1298	2394 / 1185 / 661
Puolukkaturvekangas, keskiarvo	7024 / 4355 / 2977	4643 / 3032 / 2238
Puolukkaturvekangas, yläkvartiili	8991 / 6482 / 5198	6860 / 5396 / 4674
Mustikkaturvekangas, alakvartiili	6258 / 3396 / 2071	2394 / 1184 / 661
Mustikkaturvekangas, keskiarvo	8891 / 5628 / 3968	7266 / 4958 / 3823
Mustikkaturvekangas, yläkvartiili	10998 / 7891 / 6342	8690 / 6912 / 6025
Puolukkaturvekangas, keskiarvo	7439 / 4420 / 3013	4433 / 3015 / 2319
Mustikkaturvekangas, keskiarvo	9533 / 5852 / 4157	6487 / 4609 / 3694
Ruohoturvekangas, keskiarvo	11743 / 7097 / 4950	5972 / 4391 / 3612

¹⁾ensimmäinen lukuarvo (1 906 €/ha) kuvaa taloustulosta 2 %:n, toinen lukuarvo (1 130 €/ha) 3 %:n ja kolmas lukuarvo (702 €/ha) 4 %:n korkokannan mukaan jaksollisessa kasvatuksessa, ²⁾ ensimmäinen lukuarvo (1 811 €/ha) kuvaa taloustulosta 2 %:n, toinen lukuarvo (1 113 €/ha) 3 %:n ja kolmas lukuarvo (773 €/ha) 4 %:n mukaan jatkuvapeitteisessä kasvatuksessa

Kun taloustuloksia tarkasteltiin keskimäärin jaksollisen ja jatkuvapeitteisen kasvatuksen välillä, huomataan että jaksollinen kasvatus oli jatkuvapeitteistä kasvatusta kannattavampaa kaikilla kolmella laskentakorkokannalla 2 %, 3 % ja 4 % (Kuva 3).



Kuva 3. Kiiminkijoen valuma-alueen miniatyyrin (1 000 ha) nettotulojen nykyarvo, kun turvemaiden mäntyvaltaisia metsiä käsitellään joko jaksollisen tai jatkuvan kasvatuksen mukaisesti, miljoonaa euroa.

Esimerkiksi 2 %:n laskentakorkokannalla jaksollisen kasvatuksen mukainen nettotulojen nykyarvo on 6,12 miljoonaa euroa, kun se jatkuvapeitteisen mukaan on 4,31 miljoonaa euroa (Kuva 3). Kun lukuarvot muutetaan hehtaariohjeiksi, osoittautuu jaksollinen kasvatus keskimäärin noin 1 800 euroa hehtaarilla kannattavammaksi kuin jatkuvapeitteinen kasvatus, laskentakorkokannan ollessa 2 %. Vastaavasti, 3 %:n laskentakorkokannalla jaksollinen kasvatus oli noin 925 €/ha ja 4 %:n laskentakorkokannalla noin 450 €/ha kannattavampaa kuin jatkuvapeitteinen kasvatus. Puhtaasti taloudellisessa mielessä metsänomistaja häviää, jos hän kategorisesti siirtyy kaikilla kohteilla jatkuvapeitteiseen kasvatukseen. Tässä yhteydessä on syytä kuitenkin korostaa, että jatkuvapeitteisellä metsänkasvatuksella voidaan saavuttaa muita hyötyjä, joita tarkastellaan tämän raportin Osiossa 5 (Metsänkäsittelytapojen kokonaistaloudellinen tarkastelu), jossa määritetään vaihtosuhteet (engl. trade-offs) taloustuloksen, vesistökuormituksen ja hiilensidonnan välillä.

OSIO 2: tuhkalannoituksen kannattavuus

Taustaa

Turvemaiden lannoituksella pyritään ennen muuta korjaamaan kasvupaikan epätasapainoisesta ravinnetaloudesta johtuvat puuston kasvuhäiriöt ja puiden hidastunut kasvu. Ravinne-epätasapaino on tavallisin sekatyypin soista kehittyneillä paksuturpeisilla II-tyyppin turvekankailla, jotka ovat luonnontilaisina olleet vähäpuustoisia ja märkiä. Runsastyypisten ($N > 2$ % kuiva-aineesta) II-tyyppin turvekankaiden turpeen suuren typpivaraston vuoksi lannoitus fosforia ja kaliumia sisältävällä

puutuhkalla tuottaa kasvunlisän, joka on niin suuri ja pitkäaikainen, että sitä voidaan verrata kasvupaikan tuotoskyvyn paranemiseen yhdellä tai kahdella luokalla (Höckä ym. 2012).

Ensimmäinen yhteenveto tuhkalannoituksen vaikutuksesta turvemaiden puuston kasvuun perustuen vanhoihin yksittäisiin koealoihin tai koealapareihin tehtiin jo yli 35 vuotta sitten (Huikari ja Silfverberg 1985). Järjestettyjä kokeita alettiin perustaa 1970- ja 1980-luvun taitteessa, ja niissä vertailtiin ennen muuta PK lannoitetta ja irtotuhkaa erilaisina annoksina. Useita tuhkalannoituskokeita perustettiin myös 1990-luvun lopulla toteutetun Metsätehon Tuhkaprojektin yhteydessä (Moilanen ja Issakainen 2003). Näissä kokeissa vertailtiin erilaisia tuhkia (puu-, turve-) sekä irtotuhkaa ja eri tavoilla rakeistettua tuhkkaa.

Tässä raportissa tukeudutaan lähinnä em. tuhkaprojektin yhteydessä ja 1980-luvun vaihteessa perustettujen kokeiden tuloksiin. Kaikki uudemmat tuhkalannoituskokeet sijaitsevat Pohjois-Suomessa, mutta vanhemmista kokeista osa oli myös Keski-Suomessa. Kokeet rajoittuvat etupäässä kohteisiin, joissa lannoitushetkellä on ollut nuori kasvatus- tai riukuvaiheen männikkö. Varttuneiden kasvatusmetsien reaktiosta tuhkalannoitukseen on vain vähän tietoa, mutta voidaan olettaa, että se ei ole niin suuri kuin nuoremmissa metsissä.

Aineisto

Aineistossa on kaikkiaan 17 koetta, joista yhdessätoista kasvupaikka on luokiteltu runsastyyppiseksi ja kuudessa niukkatyyppiseksi. Käytännössä runsastyyppisiä kasvupaikkoja ovat kaikki mustikka- ja puolukkaturvekankaiden II-tyypin kasvupaikat. Niukkatyyppisiä karuja kasvupaikkoja edustivat varputurvekankaille ja jäkäläturvekankaille perustetut kokeet. Karuilla soilla on oletettu tarvittavan aina tyypeä, jota tuhassa ei ole, joten karummille soille ei ole perustettu montakaan tuhkalannoituskoetta.

Kokeissa käytettyjen tuhkien ravinnepitoisuudet vaihtelivat melko paljon, ja sillä on ollut joissakin tapauksissa vaikutusta myös kasvureaktion suuruuteen ja keston. Vanhemmissa (ennen 1990-lukua perustetuissa) kokeissa käytettiin irtotuhkaa, myöhemmin myös itsekovetettua ja raetuhkaa, mutta tässä tarkastelussa on yhdenmukaisuuden vuoksi mukana vain irtotuhkakäsittelyt, ja niistä sellaiset tuhka-annokset, joiden ravinnemäärät lähinnä vastaavat nykysuosituksia. Esimerkiksi Lestijärven Niskankorvessa käytetyn sekatuhkan ravinnepitoisuus oli heikko, joten 20 tonnin annos on mukana siksi, että sen ravinnemäärä oli lähinnä nykysuositusta. Joidenkin tuhkien koostumus ei ole tiedossa; tiedetään vain käytetty tuhkamäärä ja että kyseessä on puuntuhka.

Kokeiden puustoa on mitattu vaihtelevasti. Osalla kokeista on puuston mittausta toistettu 5–10 vuoden välein, osalla on tehty vain yksi tai kaksi mittausta. Seurantajakson pituus lannoituksen jälkeen vaihteli 19 vuodesta 85 vuoteen, joten käytettävissä on pitkiä aikasarjoja. Kaikissa kokeissa tuhkalannoitus on tehty vain kerran. Viimeisimmät mittaukset on tehty vuosina 2011–2022.

Puuston kokonaistuotos lannoituksen jälkeen on laskettu vähentämällä viimeisen mittauksen kokonaistilavuudesta alkupuusto ja lisäämällä tehtyjen harvennusten käyttöpuun poistuma. Alkupuuston määrä ei kaikista kokeista ole ollut tiedossa, jolloin se on arvioitu koeselostuksen kuvauksen perusteella. Tällaiset kohteet olivat lähes poikkeuksetta taimikoita, joista puuston keskipituus oli kirjattu. Keskikasvu lannoituksen jälkeen on laskettu jakamalla kokonaistuotos koko

seurantajakson pituudella. Lisäkasvu on laskettu kunkin kokeen kontrollikoealojen ja lannoitettujen koealojen keskipituuksien erotuksena.

Keskipituuksien, lisäkasvu ja tuotos

Tyypillisiä rämkeitä edustavien kokeiden koko seurantajakson keskipituuksien oli 33 vuotta. Kontrollikoealojen (38 koealaa) keskipituuksien tuolla ajalla oli 2,66 m³/ha/v, tuhkalannoitettujen koealojen (67 koealaa) keskipituuksien oli 5,75 m³/ha/v ja PK-lannoitettujen koealojen (25 koealaa) keskipituuksien oli 4,53 m³/ha/v. Keskimääräinen tuhkalannoituksella saatu lisäkasvu oli siis 3,09 m³/ha/v, mikä 33 vuoden seurantajaksoilla tarkoitti 102,97 m³/ha suurempaa puuntuotosta lannoitetuilla kuin kontrolloilla. Vastaavasti PK-lannoituksen lisäkasvu oli seurantajaksoilla 1,87 m³/ha/v ja lisäinen puuntuotos oli 61,71 m³/ha.

Karuilla niukkatyyppisillä kasvupaikoilla seurantajakson pituus oli keskimäärin 44 vuotta. Kontrollikoealoilla (15 koealaa) keskipituuksien tuolla ajalla oli 1,65 m³/ha/v, tuhkalannoitetuilla koealoilla (37 koealaa) 4,32 m³/ha/v ja PK-lannoitetuilla (5 koealaa) 3,11 m³/ha/v. Tuhkalannoituksen tuottama lisäkasvu karuilla kasvupaikoilla oli 2,9 m³/ha/v, mikä 44 vuoden seurantajaksoilla tarkoitti 113,96 m³/ha. Vastaavasti PK-lannoitetuilla koealoilla keskimääräinen lisäkasvu suhteessa kontrolloihin oli 1,47 m³/ha/v ja lisäinen kokonaistuotos seurantajaksoilla 64,68 m³/ha.

Lannoituksen kannattavuus

Edellä kuvattujen empiiristen kokeiden mittaustulosten mukaan määritettiin lannoituksen kannattavuus kahdella eri tavalla. Ensiksi sovellettiin ns. break-even-tarkastelua, jossa laskettiin lannoituskustannukselle maksimi, jolloin lannoitus on vielä taloudellisesti perusteltua. Tämän lisäksi määritettiin lannoituksen sisäinen korko, joka tässä pohjautui laskennalliseen lukuarvoon. Tällöin oletettiin, että maksimaalinen tuotto voidaan realisoida ajanhetkellä, jolloin ko. tuotto savutetaan. Käytännössä näin ei aina voida tehdä, koska metsänhoitosuosituksissa määritetään harvennuksille minimirajat, jolloin harvennus suositellaan tehtäväksi. Laskennallinen tuottoarvo ei välttämättä siis täysin vastaa reaalisoitavaa tuottoarvoa. Laskennallinen tuottoarvo kuitenkin indikoi erittäin hyvin lannoituskohteen taloudellisen kannattavuuden potentiaalia – toisin sanoen, laskennallisen tuoton mukaan lannoituskohteet voidaan asettaa paremmuusjärjestykseen.

Break-even-tarkastelussa sovellettiin kahta laskentakorkokantaa (3 % ja 5 %), joiden mukaan määritettiin suurin mahdollinen lannoituskustannus, jolloin lannoitus olisi vielä taloudellisesti kannattavaa. Teknisesti taloustarkastelu toteutettiin taulukkolaskimella käyttäen Ratkaisinta (Microsoft 365 Apps for enterprise) niin, että Ratkaisimella (engl. Solver) iteroitiin viiden vuoden aika-askelissa aikajänteellä {5,40} maksimilannoituskustannuksen lukuarvo, jolloin lannoituskustannus vastasi lannoituksella aikaansaadun kasvuisen rahallista nykyarvoa, kun laskennassa sovellettiin joko 3 %:n tai 5 %:n laskentakorkoa. Kantohintoina käytettiin viimeisen 10 vuoden aikasarjan keskiarvoa puutavaralajeittain niin, että ensin nimelliset kantohinnat oli muutettu reaalisiksi deflatoimalla ne elinkustannusindeksillä. Taulukossa 5 esitetään talouselaskennassa käytetyt kantohinnat. Kaavana ilmaistuna laskenta toteutettiin:

$$MAXF_{cost} = \frac{\Delta TR_t}{(1+r)^t} \quad [3]$$

, missä $MAXF_{cost}$ on break-even lannoituskustannus (ts. suurin mahdollinen lannoituskustannus, jolla lannoitus vielä kannattavaa), €/ha, ΔTR_t on lannoituksella aikaansaadun kasvunlisän rahallinen arvo vuonna t , r on laskentakorkokanta (tässä joko 3 % tai 5 %), ja t on aikajänne $t \in \{5,40\}$. On huomattava, että kun t kasvaa (5→40) $MAXF_{cost}$ on funktio, jolla on eksplisiittinen maksimi annetulla aikajänteellä $\{5,40\}$.

Taulukko 5. Harvennustavoitteiset (ensiharvennus, harvennus ja päätehakkuu) reaaliset kantohinnat, joita käytettiin talouslaskennassa, €/m³.

Puutavaralaji	Ensiharvennus	Harvennus	Päätehakkuu
mänty, tukki	41.87	51.22	60.49
mänty, kuitu	12.92	16.38	19.41
kuusi, tukki	43.32	52.10	61.87
kuusi, kuitu	12.74	16.83	20.78
koivu ^{*)} , tukki	34.95	39.52	46.53
koivu, kuitu	12.63	15.76	18.80

^{*)} hies- ja rauduskoivu ja muut lehtipuut

Break-even-tarkastelu osoitti, että tuhkalanhoitus oli keskimäärin varsin kannattavaa – break-even-lannoituskustannuksen keskiarvo runsastyyppisillä kokeilla oli 3 %:n laskentakorkokannalla 1 455 €/ha ja 5 %:n laskentakorkokannallakin 882 €/ha (Taulukko 6: lukuarvojen aritmeettinen keskiarvo). Molemmat lukuarvot ylittävät kirkkaasti lannoituskustannusten 10 vuoden keskiarvon, 388 €/ha. Karuilla soilla break-even-lannoituskustannuksen keskiarvo oli vieläkin suurempi: 3 %:n mukaan 1 833 €/ha ja 5 %:n mukaan 1 111 €/ha (Taulukko 6). Runsastyyppisillä kohteilla tuhkalanhoitus aikaansai kasvunlisän, joka vaihteli välillä 0,3 ja 6,5 m³/ha/vuosi. Karuilla soilla tuhkalanhoituksen aikaansaama kasvunlisä oli 0.8–5.9 m³/ha/vuosi. Kasvunlisän tukkipuuprosentti vaihteli runsastyyppisillä soilla välillä 5 %–76 %, ja karuilla soilla 18 %–79 %. Break-even-lannoituskustannustuloksia (Taulukko 6) voidaan tulkita niin, että lähes poikkeuksetta (Teura ja Kalliolampi) tuhkalanhoitus on taloudellisesti perusteltua vähintään 5 %:n sijoitetun pääoman tuottovaateella.

Taulukko 6. Kokeittain korkein break-even-lannoituskustannus, kun kustannus määritetty viisivuotisaskelittain 5 vuodesta 40 vuoteen lannoituksen jälkeen, €/ha. Laskentakorkokanta 3 % ja 5 %. Viimeisen 10 vuoden (2012–2021) tilastoitu, reaalin lannoituskustannus on ollut 387,7 €/ha. Runsastyyppiset kohteet ilman pohjaväriä, karut suot harmaalla pohjavärillä. Lihavoituna break-even-lannoituskustannukset, jotka ylittävät edellä mainitun keskiarvon 387,7 €/ha.

KOE	kasvupaikka	käsittely ¹⁾	seurantajakso ²⁾	laskentakorko 3 %	laskentakorko 5 %
Teura 2	Mtkgll	T7,4	30 v	275.2 ³⁾ (35 v) ⁴⁾	166.7 (20 v) ⁴⁾
Kalliolampi	Mtkgll	T5	35 v	736.9	449.4
Ropsajoki	Mtkgll	T5	39 v	1010.9	612.6
Hannula	Mtkgll	PK+T5	36 v	432.8	262.3
Ala-Akkunus	Mtkgll	T10	20 v	1799.5	1090.5
Itkusuo346	Ptkgll	T10	19 v	1627.0	986.0
Varissaari	Ptkgll	T5	40 v	1160.8	703.5
Jouhteneenjärvi	Mtkgll	T5	20 v	1580.9	958.0
Ruukki2AB	Ptkgll	T4,5	36 v	1791.9	1085.9
Pelso-Tuulisuo	Mtkgll	T5	23 v	3437.2	2083.0
Leppiniemi	Rhtkg	T8	64 v	3358.7	2035.4
Pälli	Ptkgll	T5	40 v	777.1	470.9
Niskankorpi	Vatkg	T20	40 v	795.5	482.1
Pelso-Resula	Vatkg	T15	20 v	929.8	563.5
Kivisuo	Vatkg	10T+200U ⁵⁾	36 v	1640.6	994.2
Rumo	Vatkg	T6	65 v	2801.8	1697.8
Jaakkoinisuo	Vatk	T5	55 v	1685.9	1021.7

¹⁾käsittelyllä tarkoitetaan tuhkalannoituksen toteutusta (esim. tuhkan määrä; "T5"= 5 000 kg tuhkaa/ha),

²⁾alkuperäinen lannoituskokeen seurantajakso, vuosia, ³⁾break-even-lannoituskustannus, €/ha, ⁴⁾vuosiluku, jolloin suurin break-even-kustannus saavutetaan (jos vuosiluku ylittää alkuperäisen seurantajakson, niin tällöin seurantajaksolla mitatun vuotuisen kasvureaktion oletetaan jatkuvan samansuuruisena aina vuoteen 40, joka on tarkastelujakson loppu), ⁵⁾ annettu myös 500 kg ureaa tuhkan ohella perustamisen yhteydessä.

Toisessa taloustarkastelussa määritettiin kokeittain lannoituksen sisäinen korko. Sisäinen korko pohjautui laskennalliseen lukuarvoon, jolloin oletettiin, että maksimaalinen tuotto voidaan realisoida ajanhetkellä, jolloin ko. tuotto savutetaan. Sisäinen korko määritettiin kaavalla:

$$387.7 = \frac{\Delta TR_t}{(1+r)^t} \quad [4]$$

, missä 387,7 (€/ha) on reaalin lannoituskustannus 10 vuoden keskiarvona lannoituskustannuksen aikasarjasta 2012–2021, ΔTR_t on lannoituksella aikaansaadun kasvunlisän rahallinen arvo vuonna t , r on sisäinen korko, joka ratkaistaan iteroimalla (Ratkaisin, Microsoft 365 Apps for enterprise), kun aikaa t muutetaan eksogeenisesti. Teknisesti iterointi toteutettiin hyödyntämällä kunkin kokeen mukaista kasvunlisän ($\text{m}^3/\text{ha}/\text{vuosi}$) lukuarvoa: mitä korkeampi kasvulisäys (ja mitä suurempi tukkipuuprosentti), sitä pienempi t ja suurempi lannoituksen sisäinen korko, %.

Parhaimmillaan tuhkalannoituksen (laskennallinen) sisäinen korko oli peräti 29,9 % (Taulukko 7). Lukuarvo on kuitenkin ainoastaan laskennallinen, sillä se saavutettiin ainoastaan neljä vuotta tuhkalannoituksen jälkeen. Käytännössä tuhkalannoituksella aikaansaatua kasvunlisää tuskin realisoidaan alle viidessä vuodessa. Lukuarvo kuitenkin osoittaa ko. kokeen talouspotentiaalin erinomaisena lannoituskohteena. Toisaalta huonoin sisäinen korko saatiin kokeella Teura_2 – ainoastaan 2,1 %, jota voidaan pitää varsin alhaisena lannoituksen sisäisenä korkona. Teuravuoman

koe oli lannoitushetkellä ja on edelleen vajaapuustoinen (n. 350 runkoa/ha), mikä selittää heikkoa tulosta (Taulukko 7). Suhteellisen heikko kannattavuus oli myös Pällin kokeessa. Koe on melko ohutturpeinen, joten puusto saanee ravinteita pohjamaasta. Siksi kontrollikoealojenkin puuston tilavuus oli vuoden 2022 mittauksessa yli 300 m³/ha.

Taulukko 7. Tuhkalannoituksen sisäinen korko kokeittain, %. Kasvupaikat ja käsittelyt kokeittain identtiset Taulukon 6 kanssa. Korkein sisäinen korko runsastyyppisillä ja karuilla kokeilla lihavoitu. Runsastyyppiset kohteet ilman pohjaväriä, karut suot harmaalla pohjavärillä

KOE	sisäinen korko	ajankohta, v
Teura 2	2.11 % ¹⁾	43 ²⁾
Kalliolampi	5.82 %	18
Ropsajoki	8.02 %	13
Hannula	4.46 %	23
Ala-Akkunus	14.70 %	7
Itkusuo346	13.21 %	8
Varissaari	9.26 %	11
Jouhteneenjärvi	12.81 %	8
Ruukki2AB	14.63 %	7
Pelso-Tuulisuo	29.94 %	4
Leppiniemi	29.19 %	4
Pälli	6.11 %	17
Niskankorpi	6.25 %	16
Pelso-Resula	6.11%	17
Kivisuo	13.33 %	8
Rumo	23.77 %	5
Jaakkoinsuo	13.72 %	8

¹⁾sisäinen korko (%) tarkoittaa laskentakorkokantaa, jolla lannoituskustannus (387,7 €/ha) on yhtä suuri kuin ko. laskentakorkokannalla t vuoden päästä diskontattu ΔTR_t , ²⁾ajankohta tarkoittaa t vuotta lannoitushetkestä eteenpäin, jolloin yhtälön [4] oikea puoli on yhtä suuri kuin yhtälön vasen puoli (387,7 €/ha), kun sisäinen korko r (%) saavuttaa maksiminsa

Kuten Taulukosta 7 nähdään, vaihtelee tuhkalanannoituksen sisäinen korko merkittävästi kokeittain, samoin kuin ajankohta, jolloin sisäisen koron maksimi saavutetaan. Keskiarvona karut suot pärjäsivät hieman paremmin kuin runsastyyppiset: sisäinen korko 15,3 % vs. 12,0 %. Toisaalta tarkastelussa karuja soita oli viisi, kun taas runsastyyppisiä kaikkiaan 11 kappaletta (Taulukko 6 ja 7). Voidaan luotettavasti todeta, että mitattujen ja pitkään seurattujen kokeiden perusteella turvemaiden tuhkalannoitus on taloudellisesti varsin perusteltua ja lannoitusinvestoinnin tuottavan vuotuisesti keskimäärin yli 10 %.

Tarkastelua

Lannoituksen aikaansaamaan kasvureaktioon vaikuttaa lannoitteen sisältämien ravinteiden ja levitetyn ravinnemäärän lisäksi myös ravinteiden liukoisuus. Tuhkan sisältämä fosfori on hidasliukoista ja rakeistus edelleen hidastaa fosforin liukenemistä, mutta ei paljonkaan vaikuta kaliumin liukenemiseen (Nieminen 2007). Raetuhka tuottaa pääsääntöisesti hitaamman puustoreaktion kuin vanhoissa lannoituskokeissa käytetty irtotuhka (Hytönen ja Hökkä 2020). Tämän aineiston kasvureaktion kuvaukset perustuvat valtaosin koealoihin, joissa on käytetty irtotuhkaa.

Tuhkalannoitus lisää puiden kasvua voimakkaasti typpirikkailla kasvupaikoilla: mitä runsastyypisempi suo on ja mitä epätasapainoisempi puuston ravinnetila on typen ja muiden ravinteiden suhteen, sitä suurempi on lannoituksen tuottama absoluuttinen ja suhteellinen lisäkasvu (Moilanen ja Hökkä 2009). Absoluuttinen lisäkasvu on suurempi eteläisessä Suomessa kuin pohjoisessa (Hökkä ym. 2012).

Kasvuvasteen suuruuteen vaikuttaa myös tarkastelujakso. Tuhkalla kasvureaktion kesto riippuu ennen muuta tuhkan kaliumin riittävydestä ja siihen puolestaan vaikuttaa lannoitteessa annettu kaliumin määrä ja liukoisuus. Keskimääräinen PK- tai tuhkalannoituksen tuottaman pitkän ajan kasvuvaste (20–30 v) on $1\text{--}3\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}\text{ a}^{-1}$ kasvupaikasta (Ptkg I – Mtkg II) riippuen (Hökkä ym. 2012). Tässä tarkastelussa sekä typpirikkailla, että niukkatyyppisillä soilla keksimääräinen kasvuvaste oli n. $3\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}\text{ a}^{-1}$. Ero aiempaan selittyy sillä, että tässä selvityksessä ei ollut mukana pelkästään PK-lannoitettuja koealoja eikä koealoja, joilla annetut ravinnemäärät olivat selvästi alle nykysuositusten. Niukkatyyppisten soiden varsin hyvä kasvureaktio on asia, jota ei aiemmin ole raportoitu. Toki on huomattava, että saman lisäkasvun tason saavuttaminen edellytti 10 vuotta pidempää kasvujaksoa kuin runsastyypisillä ja että lisäkasvua selittää myös lannoittamattomien koealojen heikko kasvu ilman lannoitusta. Aiemmat päätelmät niukkatyyppisten soiden heikosta reaktiosta lannoitukseen perustunevat suhteellisen lyhyeen seurantaan PK-lannoituksen jälkeen (Moilanen ja Issakainen 1990, Silfverberg ja Moilanen 2008).

OSIO 3: Viljavan turvemaan luontaisen uudistamisen ja viljelyn vaihtoehdot kuuselle – puuntuotos ja kannattavuus

Johdanto

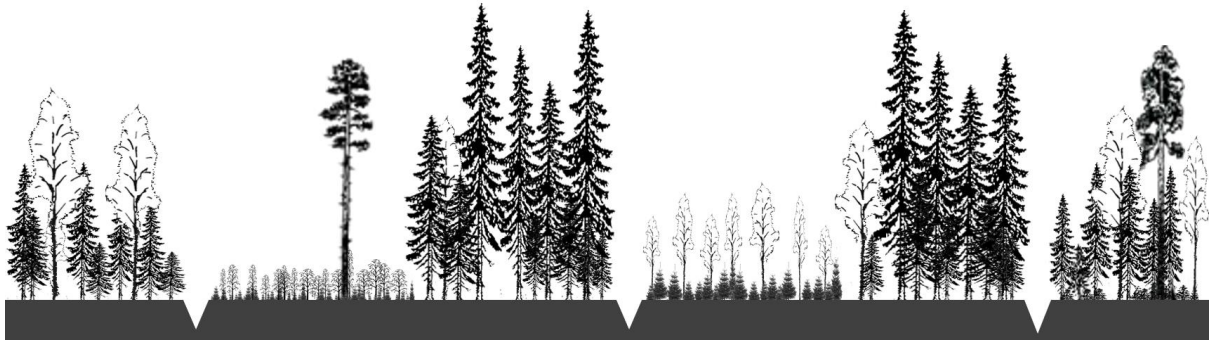
Metsäntutkimuslaitoksen suontutkimuksen professorina vuosina 1928–1958 toiminut sekä myös suomalaisen suometsätieteen uranuurtajana tunnettu Oskari J. Lukkala kirjoitti vuonna 1946 laajan tutkimusartikkelin korpimetsien luontaisesta uudistamisesta (Lukkala 1946). Julkaisun johdannossa hän kertoo, kuinka jo 1920-luvulta alkaen Suomessa on laajalti ja menestyksellisesti uudistettu luontaisesti korpikuusikoita ”lohkoittaisilla ja kaistaleittaisilla paljaaksihakkauksilla”.

Tutkimusraporttinsa yhteenvedossa Lukkala kuvailee, kuinka eri kokoisten ja leveydeltään vaihtelevien kaistaleiden avoaloille nousee ensimmäisen 10 vuoden aikana runsas koivun taimisto. Samaan aikaan ilmestyy reunametsässä sekapuuna esiintyvien mäntyjen määrän mukaan myös männyn taimia. Kuusen taimia sen sijaan on verraten runsaasti jo hakattavan metsän alla valmiina jatkamaan kasvuaan nousevan koivun taimiston suojassa. Ensimmäisen 10-vuotiskauden aikana

hakkuun jälkeen kuusten määrä lisääntyy noin kolmanneksella ja vähitellen toisen vuosikymmenen aikana niitä syntyy jonkin verran lisää. Kuusen taimimäärä lisääntyy hakkuun jälkeen varsin hitaasti mutta kyse oli harventamattoman ja tiheän koivikon alla tapahtuvasta taimettumisesta. Hieskoivikon voimakkaan itseharvenemisen myötä kaistaleelle kuitenkin nousee ”nuori koivikko, jonka seassa on alikasvoskuusia kohtalaisen runsaasti”. Koivujen ja mäntyjen pituuskasvu pysyttelee ”muutaman vuosikymmenen” ajan kuusten pituuskasvua nopeampana kuusten saadessa yhä selkeämmän alikasvosluonteen. Noin viiden vuosikymmenen kuluttua kuuset, joiden pituuskasvu on jo voittamassa koivujen kasvun, pyrkivät työntämään latvojaan koivujen latvojen korkeudelle.

Edellinen kuvaus on ollut jo vuosia lähtökohtana ajatukselle, jossa ojitettujen korpikuusikoiden avohakkuun, mätästyksen ja kuusen istutuksen rinnalla korprien uudistamisessa voitaisiin harkita myös luontaisen uudistamisen vaihtoehtoa. Kuusen luontainen uudistaminen on useimmiten nähty väljennys- ja suojuspuuston kautta tapahtuvana ”kuusi kuusen alle” uudistamisketjuna. Sen vaihtoehtona hieskoivun hyvinkin ”aggressiiviseen” taimettumiseen ja kuusen luontaiseen alikasvosuudistumiseen perustuvaa luontaista ”kuusi koivun alle” ketjua ei käytännössä ole senkään vertaa sovellettu kuin suojuspuumenetelmää. Koivun kuitupuukasvatuksen heikko taloudellinen kannattavuus lienee tähän suurimpana syynä varsinkin, kun turvemaiden hieskoivikoita hyvin harvoin voidaan kannattavasti kasvattaa kaksijaksoisesti kuusen ”päällä” vaneripuumittoihin asti.

Tämän tutkimuksen tausta-ajatuksena on edellisen takia ollut perehtyä tarkemmin viljelyketjun ja luontaisen koivu-kuusi-uudistamisen kannattavuusvertailuun. Kuinka paljon kannattavampaa on viljellä kuusen taimet verrattuna siihen, että perataan ja harvennetaan korpikaistaleen avoalalle ”väkisin syntyviä koivupusikoita” kuitupuukoivun kasvattamiseksi ja alikasvoskuusikoiden syntymisen edistämiseksi? Hieskoivun uudistaminen ja kuitupuukasvatus ei sinällään ole mielekäs ja kannattava metsänuudistamisen tavoite, mutta entä jos se on osa kuusikon luontaista uudistamista alikasvoksen kautta? Jos viljely on taloudellisesti kannattavin vaihtoehto, niin kuinka suuri on kannattavuusero eli paljonko joudutaan taloudellisesti tinkimään luontaisen vaihtoehdon valinnassa, mikäli valinta perustuu esimerkiksi ekologisiin tavoitteisiin? Mahdollisia ekologisia hyötyjä voisivat olla esimerkiksi metsiköiden ”rakenteellisen” monimuotoisuuden lisääminen (kuva 1) ja ojitetuilla turvemaidella ympäristövaikutusten vähentämiseen tähtäävä turpeen vedenpinnan tason säätely erityisesti mustikka- ja ruohoturvekankaiden viljavuustasoilla. Viimeksi mainitun tavoitteen merkitys korostuu sen myötä, mitä laajempia pienaukkoja ja kaistaleita tehdään ja erityisesti metsälain määrittelemän mukaisen jatkuvapeitteisyyden suurimman avoalan (0,3 ha) ylittävillä hakkuualoilla. Näissä tapauksissa avoalalle nopeasti kehittyvän koivutaimikon voimakas haihdutusvaikutus voi merkittävästi lieventää aukon keskellä kohoavan vedenpinnan haitallisia vaikutuksia. Koivutaimikon haihdutustaikutusta ei toistaiseksi ole tutkittu mutta se on kuitenkin kuusen istutustaimikkoon verrattuna huomattavasti voimakkaampaa.



Kuva 4. Periaatepiirros ojitusaluekuusikon luontaisesta koivu-kuusi-uudistumisesta ja kaksijaksoiskasvatuksesta pienialaiseen avohakkuuseen tai pienaukko- ja kaistalehakkuuseen sovellettuna

Seuraavassa esiteltävä aineisto ja sen pohjalta tehdyt kannattavuuslaskelmat pyrkivät vastaamaan seuraavaan kysymysten asetteluun tilanteessa, jossa ollaan perustamassa uusi puusukupolvi:

- 1) Mikä on luontaisella koivu-kuusi-uudistamisella aloitetun jaksollisen metsänkasvatuksen paljaan maan arvo verrattuna kuusen istutuksella aloitettuun jaksolliseen kasvatukseen? Jatkokysymyksenä vertailu luontaiseen uudistamiseen tehdään erikseen tilanteissa, joissa kuusen viljely onnistuu kolmella eri tavalla (tarkemmin aineiston kuvauksessa).
- 2) Mikä on luontaisella koivu-kuusi-uudistamisella aloitetun kasvatuksen paljaan maan arvo verrattuna viljelyn kolmeen eri onnistumislukkaan, kun koivua kasvatetaan eri mittaisia aikoja kuusen päällä joko vain verhopuustona tai sitten kuitupuukasvatusta varten joko ensiharvennuksella tai ilman (tarkemmin aineiston kuvauksessa ja kuvassa 3)

Kaikissa kannattavuuslaskelmissa paljaan maan arvo lasketaan puunkasvatuksen tulojen ja menojen nettohyötyarvosta, kun tarkastellaan ensimmäistä kasvatusta metsikön perustamishetkestä päätehakkuuseen ja sen jälkeen seuraavia puusukupolvia ikuisuuteen viljelyllä aloitettavaa kasvatusohjelmaa toistaen. Näin ollen tulevat puusukupolvet lasketaan viljellen aloitettavilla kasvatusketjuilla sekä luontaisen alikasvosuudistamisen että viljelyuudistamisen tapauksissa.

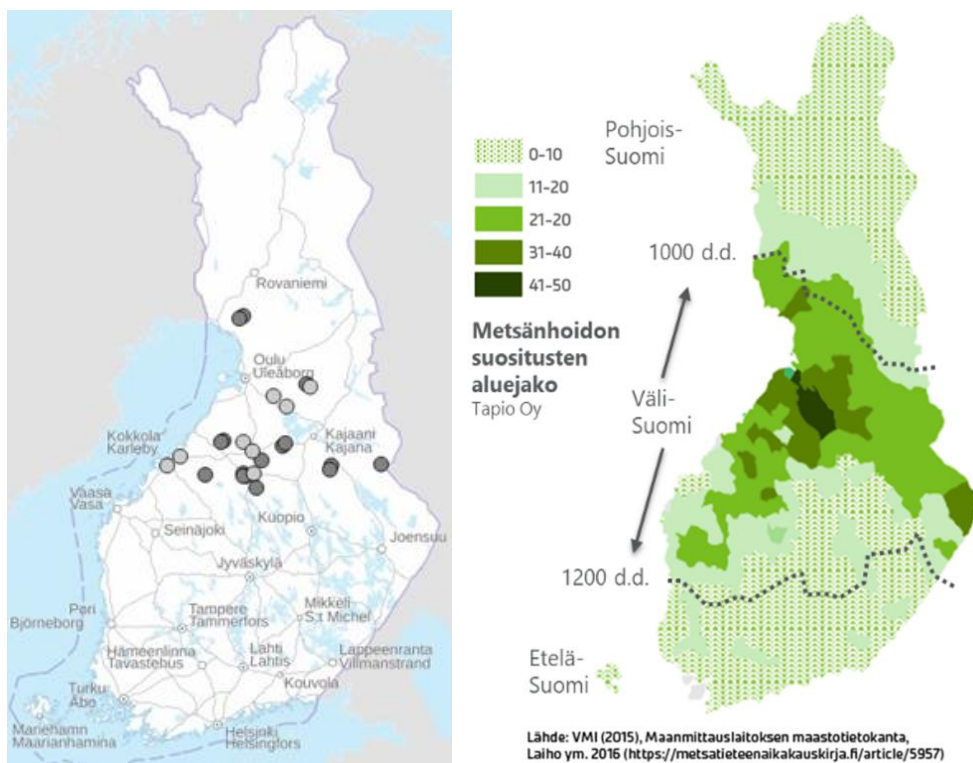
Edellä kuvatun ja avohakkuun hetkellä tehtävän päätöstilanteen lisäksi asetettiin päätöksentekokysymys myös hetkellä, jolloin koivua oli kasvatettu ensiharvennusta edellyttävään hetkeen asti. Varsinkin Keski- ja Etelä-Pohjanmaalla esiintyy runsaasti viljavia ja kuusen kasvatukselle soveliaita hieskoivuvaltaisia vanhoja ojitusalueita, joissa usein joudutaan kyseenalaistamaan koivun jatkokasvatuksen kannattavuus. Tällöin vaihtoehtoina ovat:

- 1) Koivun avohakkuu, mätästys ja kuusen istutus
- 2) Koivun harvennus ja jatkokasvatus 20 vuotta 55 vuoden kiertoajalla ilman kuusialikasvosta
- 3) Koivun harvennus ja harvennushetkeen mennessä syntyneen luontaisen kuusialikasvoksen vapautus 10 vuoden jatkokasvatuksen jälkeen
- 4) Koivun harvennus ja kuusen istutus muokkaamattomaan maahan kuusen alle ja vapauttaminen 10 tai 20 vuoden jatkokasvatuksen jälkeen

Käsillä oleva aineisto mahdollistaa myös viimeksi mainitun vaihtoehdon vertailun avohakkuulle ja kuusen viljelylle sillä suurin osa tämän aineiston alikasvoskuusista oli istutettu koivikon alle.

Aineisto ja menetelmät

Syksyllä 2014 mitattiin otannalla yhteensä 16 mätästetylle avoalalle istutettua 10–15 vuoden ikäistä kuusitaimikkoa ruoho- ja mustikkaturvekankaiden vanhoilta ojitusalueilta. Otannan kohteeksi valittiin Keski- ja Pohjois-Pohjanmaan sekä Kainuun valtionmailta löytyvät vuosina 2004–2009 viljellyt kyseisten kasvupaikkojen uudistamisalat siten että ne olisivat alueellisesti ja ilmastollisesti mahdollisimman hyvin vertailukelpoiset kaksijaksoisten hieskoivukuusi-koemetsiköiden kanssa (viljelytaimikoiden ja kaksijaksoisten koemetsiköiden sijainnit kuvassa 2). Metsähallituksen paikkatietojärjestelmästä poimittiin taimikon iän, kasvupaikan ja sijainnin vaatimukset täyttävistä viljelyaloista kaikki ne, jotka karttatarkastelun mukaan olivat vähintään kahden sarkaojan ojitusaluekuvioita. Tällä periaatteella karsittiin pois kaikki yhden ojan korpinotkot, jotka usein ovat ohutturpeisia ja kuvion reunaosiltaan todellisuudessa kivennäismaita kuviotietojen turvemaa-merkinnästä huolimatta. Maastossa lisäksi varmistettiin, että kaikki kuviot olivat paksuturpeisia ja määttävät puhtaasta turpeesta muodostuneita. Kaikki mainitut kriteerit täyttäneitä uudistamisaloja löytyi edellä mainitut 16 uudistamisalaa, jotka kaikki mitattiin.



Kuva 5. Tutkimuksen alueellinen yleistettävyyys suhteessa metsänhoidon suositusten (Tapio Oy) aluejakoon sekä ojitettujen soiden osuuteen (%) puuntuotannon metsämaasta. Viljelytaimikot tummilla ja kaksijaksoiset koemetsiköt vaaleilla ympyröillä.

Luontaiseen koivu-kuusi-uudistamiseen ja kaksijaksoiseen kasvatukseen perustuva aineisto saatiin Metsäntutkimuslaitoksen (myöhemmin Luonnonvarakeskus) 1970-1980-luvuilla perustamilta harvennuskokeilta (taulukko 1), jotka sijaitsivat uudisojituksen jälkeen luontaisesti hieskoivikoiksi

kehittyneillä viljavilla turvemaidella (Niemistö 2013). Osalle näistä koemetsiköistä on viljelty tai syntynyt luontainen kuusialikasvos (Niemistö ja Poutianen 2004) eri tiheyksiin harvennettujen hieskoivikoiden alle. Alikasvoskuusia varoen koivut on poistettu vapautushakkuissa eri ajankohtina (1989-2005) metsurityönä (Lehto 2019) tai vuonna 2008 hakkuukonetyönä, jolloin tutkittiin myös puunkorjuun ajanmenekkiä ja kuusten vaurioitumista (Niemistö ym. 2012).

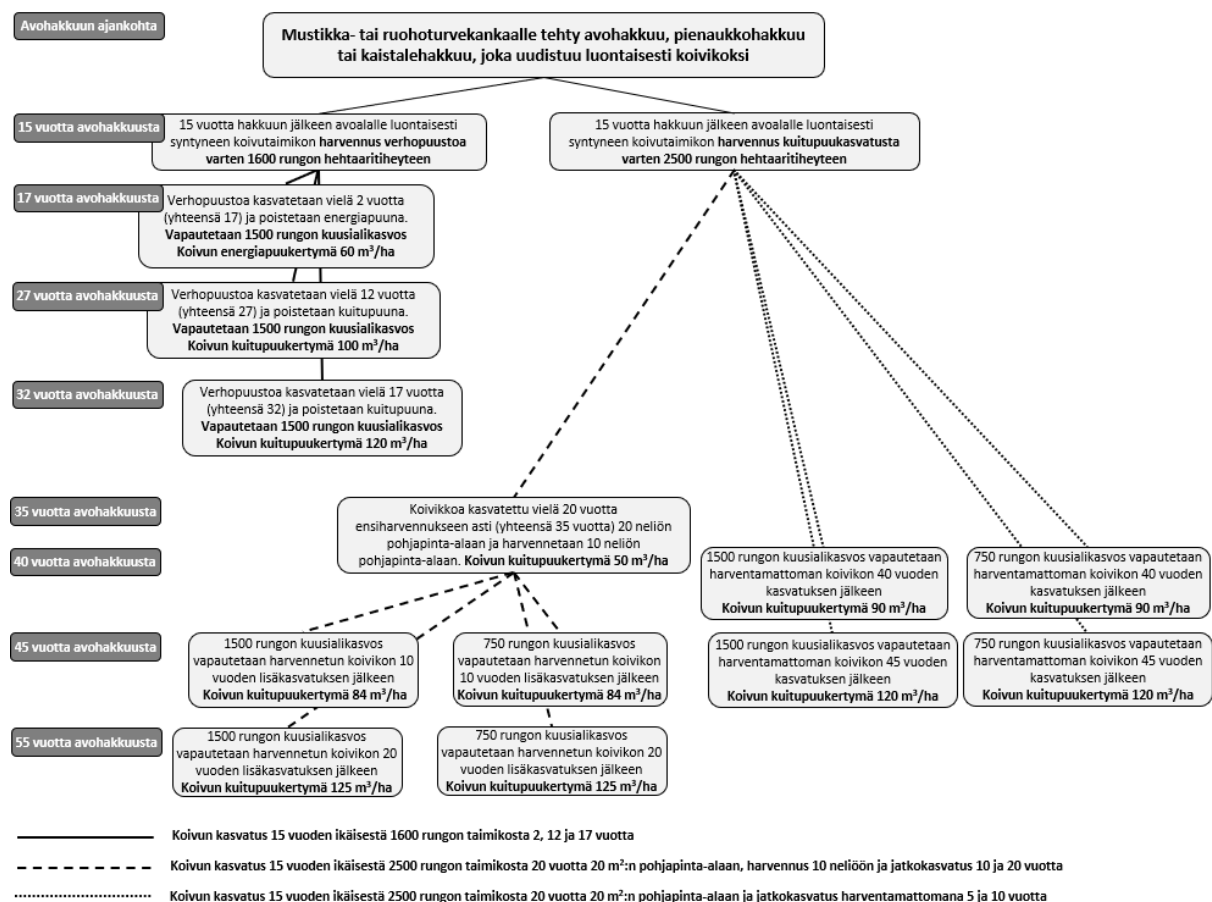
Taulukko 8. Kaksijaksoisten koivu-kuusi-koemetsiköiden sijainti-, kasvupaikka- ja puustotietoja.

Koe	Paikkakunta	Turve- kangas- tyyppi	Pituus- boniteetti H ₅₀	Perustamis- vuosi	Kuusen istutus n=luontaiset	Taimitiheys* keskiarvo ha-1 /keskihajonta	Kuusilali- -kasvos- ruutujen määrä	Kuusi-ruutujen pinta-ala m ²
1	Haapavesi	Rhtkg	15,6	s1974	n+1967	1260/400	27	1000
2	Kärsämäki	Rhtkg	14,1	s1976	1987	1070/227	9	1000
3	Pyhäjärvi	RhSNmu	16,6	s1976	1987	1105/593	9	1000
4	Utajärvi	Mtkg	15,1	s1991	n+1992	1286/676	10	1000
5	Kruunupyy	Mtkg	17,6	k1978	n	6000/1225	8	75
6	Vaala (99)	Rhtkg		s1989	1991–1995	2192/695	6	200
7	Puolanka	Rhtkg	17,5	s1989	1991	2369/461	8	200

*Alikasvoksen tiheys ennen vapautushakkuuta

Erilaiset kasvatuskombinaatiot suhteessa koivun käsittelyyn ja alikasvokuusten vapauttamisen ajankohtiin on esitetty kuvan 3 kaaviossa. Avohakkuun jälkeen syntyneen ja 15 vuoden ikään kehittyneen koivutaimikon harvennuksen yhteydessä jatkokasvatus jakautuu kahteen linjaan. Toisessa koivikko harvennetaan 1600 koivun hehtaariitiheyteen verhopuustoksi tarkoituksena suojata jo varhaisessa vaiheessa koivun sekaan kehittynyt kuusen taimikko hallavaurioilta. Toisessa kasvatuslinjassa kuusen taimet syntyvät huomattavasti myöhemmin, jolloin koivikko harvennetaan kuitupuukasvatusta ajatellen 2500 rungon hehtaariitiheyteen.

Kumpikin kasvatuslinja jakautuu sen mukaan, kuinka pitkään koivua kasvatetaan. Verhopuukasvatuksessa (1600 runkoa hehtaarilla) aikaisin alikasvoksen vapautus tehdään jo kahden vuoden kuluttua taimikonhoidosta (17 vuotta avohakkuusta) kuusen varhaisen taimettumisvaiheen vuoksi. Kuusi on syntynyt jo avohakkuun yhteydessä tai sitten kyse on jo ennen avohakkuuta vallinneen kuusen taimiaineksen varttumisesta varhaisessa vaiheessa verhopuukoivujen latvuksiin. Piiskaantumisvaaran vuoksi verhopuusto poistetaan energiapuuna ja kuuset vapautetaan. Mitä suurempi on koivun ja kuusen pituusero, sitä pitempään koivua voi kasvattaa ennen kuusen vapautusta. Verhopuuvaihtoehdossa on varhaisimman kahden vuoden kasvatuksen lisäksi koivun kasvatukset 12 ja 17 vuotta taimikonharvennuksen jälkeen (27 ja 32 vuotta avohakkuun jälkeen), jolloin verhopuusto poistetaan kuitupuukertymänä.



Kuva 6. Kaavio kaksijaksoisten hieskoivu-kuusi-sekametsiköiden kasvatusvaihtoehtoista, alikasvoskuusten vapauttamisen ajankohdista ja koivun kuitupuusaantona kertyneestä käyttöpuutuotoksesta kunkin hakkuutapahtuman yhteydessä

Kuitupuukasvatuksen linjassa koivua kasvatetaan taimikonhoidon jälkeen 2500 rungon hehtaariitiheydessä vielä 20 vuotta kunnes saavutetaan 20 neliömetrin pohjapinta-ala (koivikon 35 vuoden iässä). Sen jälkeen tehdään joko ensiharvennus 10 neliömetrin pohjapinta-alaan tai kasvatetaan ennen kuusen vapauttamista yhä ilman harvennusta vielä 5 tai 10 vuotta eli yhteensä 40 tai 45 vuotta avohakkuusta.

Ensiharvennuksella käsitellyissä koivikoissa harvennettua koivikkoo kasvatetaan joko 10 tai 20 vuotta kunnes koivikko saavuttaa 45 tai 55 vuoden päätehakkuiän. Kaikissa eri vaihtoehtoissa hakkuissa korjataan kuitupuuta, joiden kertymät näkyvät kuvassa 3. Kuitupuukasvatuksen linjassa kuuset syntyvät vähitellen koivun alle taimikonhoidon jälkeen siten, että ensiharvennuksen ajankohtana 35 vuotta avohakkuun jälkeen koivikon alla on varttumassa noin rinnankorkeuden mitan saavuttanut kuusialikasvos. Alikasvoskuusten vapauttamisen jälkeen kuusen kasvua on seurattu 15 vuotta ja sen pituuskehityksestä tehtiin mallit, joiden pohjalta kuusen "kasvatusta" jatkettiin Motti-simulaattorilla 29 cm:n läpimittaan asti ennen kuusen päätehakkua. Koivikon poistamisen yhteydessä alikasvoskuusia oletettiin säilyvän vapautushakkuussa joko 1500 tai 750 kuusta hehtaarilla

Avoalojen istutuskuusikoiden mittaus

Kohteiden maastotarkastelussa todettiin, että suurin osa uudistamisaloista oli pahoin hallan vaurioittamia. Sen takia kaikki uudistamisalat päätettiin osittaa kolmeen laatuluokkaan tai taimikkotyyppiin seuraavasti:

1. Häiriintymättömästi kehittyneet, haaroittumattomat ja terveen näköiset taimikon osat, joissa taimien pituuskehityksen arvioitiin edustavan kasvupaikan kasvupotentiaalia. Taimikon osassa ei siis katsottu olevan normaalia pituuskasvua haitanneita tuhoja.
2. Taimikot tai niiden osat, joissa pituuskehitystä haitanneita hallavaurioita mutta kuuset edelleen kehityskelpoisia siten että niitä kannattaa kasvattaa yhdessä luontaisesti syntyneiden mäntyjen ja hieskoivujen kanssa
3. Taimikot tai niiden osat, joissa istutuskuuset niin pahoin vaurioituneita, että taimikkoa kasvatetaan jatkossa pelkästään luontaisten taimien varassa.

Yksittäinen uudistusala saattoi jakaantua kaikkiin kolmeen taimikkotyyppiin mutta se saattoi olla myös kokonaisuudessaan vain yhtä edellä mainituista taimikkotyypeistä. Taimikon koosta riippuen taimet mitattiin 3–6 ympyränäytealalta, joiden säde oli 3.99 m (pinta-ala 50 m²). Jos taimikossa esiintyi kaikkia kolmea taimikkotyyppiä, niin siinä tapauksessa mitattiin 1–2 ympyräalaa kustakin ja kahden taimikkotyypin tapauksessa kolme kummastakin tyyppistä. Mikäli jokin taimikkotyyppi oli huomattavasti toisia tai toista suurempi, jaettiin näytealaympyröiden määrää suunnilleen vastaavassa suhteessa.

Tarkoituksena oli asettaa ympyräalat mittaajan oman näkemyksen mukaan sellaisiin kohtiin, jotka näyttäisivät edustavan mahdollisimman hyvin edellä kuvattuja taimikkotyyppejä. Taimikon ikä huomioiden poikkeavan suuria puita kasvavia kohtia vältettiin, jos oli oletettavissa, että puusto sisältää avohakkuussa säästyneitä ja viljelytaimia vanhempia puita. Tavoitteena oli hakea edustavia näytealoja kustakin taimikkotyyppistä eikä pyrkiä taimikkoa kokonaisuudessaan edustavaan satunnaisotantaan.

Ympyrältä laskettiin kaikki viljelykuuset sekä luontaisista taimista ne, jotka ovat vähintään puolet viljelytaimen pituudesta eli valtapuustoon yltävät luonnontaimet. Kahden pisimmän istutuskuusen pituuden keskiarvo merkittiin valtapituudeksi. Mediaanipuuksi (pituudeltaan silmämääräisesti keskimäinen) valitun kuusen pituus merkittiin keskipituudeksi. Mediaanipuusta mitattiin läpimitta sekä viiden viimeisimmän vuoden pituuskasvu. Jos hallan pahoin vikuuttaman kuusen pituuskasvun määrittäminen osoittautui vaikeaksi, tyydyttiin pelkkään pituuden mittaukseen.

Luontaisesti syntyneistä taimista mitattiin puulajeittain taimitiheydestä riippuen 2-5 pisintä puuta edustamaan valtapuustoa, joista valittiin silmävaraisesti keskimääräinen ja mitattiin sen pituus valtapituutena. Mediaanipuusta mitattiin puulajeittain keskipituus ja -läpimitta. Männyistä ja kuusista mitattiin mediaanipuun kasvu kuten istutetuista kuusistakin. Koivujen mediaanipuusta mitattiin vain pituus ja läpimitta.

Kaksijaksoisten hieskoivu- ja kuusikoemetsiköiden mittaukset

Koivupuuston mittaus aloitettiin kokeiden alusta ja kuusialikasvoksen mittaus valtaosin alle 1,3 m:n valtapituudessa (600 pisimmän taimen keskipituus, H600), joskin kokeella 1 selvästi myöhemmin (taulukko 9). Jatkomittaukset tehtiin useimmiten viiden kasvukauden välein. Ylispuuston kaikki puuyksilöt kartoitettiin (koordinaatit ruudun sisällä) ja mitattiin siten kuin on kuvattu erillisessä

tutkimusjulkaisussa (Niemistö 2013). Alikasvos mitattiin joko koko koeruudulta tai sitten ruudun keskipisteeseen sijoitetulta ympyräaalalta (75–200 m²). Niistä mitattiin pituus ja läpimitta rinnankorkeudelta, mikäli taimi oli saavuttanut kyseisen pituuden. Joka viides puu valittiin viiden edellisen vuoden pituuskasvun mittauksen koepuiksi (Niemistö & Poutiainen 2004).

Taulukko 9. Puustotunnuksia tutkimuksen tarkastelujakson alussa ja lopussa

Koe	Koivun ikä 1. mittauksessa	Koivun valta-pituus	Vapautus-hakkuu	Koivun valtapituus vapautus-hakkuussa	Kuusten 1. mittaust-vuosi	H600 1. mittaust	Kuusten viimeinen mittaust-vuosi	H600 viimeinen mittaust	H600 max viimeinen mittaust
1	44	13,78	1989, -94, -05	19,3	s1988	6,82	k2016	9,4	17,1
2	63	14,4	1997,2008	19,9	s1991	1,14	s2012	5,06	8,64
3	41	11,18	2008	19,2	s1991	1,20	s2012	4,15	7,43
4	52	16,46	2017	20,1	s2001	1,73	s2016	4,0	6,8
5	20	9,25	-	17,9	s1991	1,21	k2015	4,60	8,40
6		16,0	-		s1996	0,44	k2013	2,50	5,00
7	35	13,5	-	18,0	s1999	0,54	k2013	2,6	5,4

Tässä tutkimuksessa hieskoivujakson kehitys ja kuitupuun tuotos (taulukko 3) laskettiin Niemistön (2013) tutkimusaineistosta koealapuustoista, joiden kehitysvaihe ja tiheys vastasivat kuvassa 3 määriteltyjä kasvatusohjelmia.

Taulukko 10. Taimikkona tiheyteen 2500 kpl/ha harvennetun hieskoivikon kuitupuukertymä 35 vuoden iässä (12,5 m keskipituudessa) pohjapinta-alaan 10 m²/ha tehdyssä voimakkaassa harvennuksessa ja tulevat päätehakkuukertymät 5–25 vuoden kasvatusajalla harvennetussa ja harventamattomassa puustossa (Niemistö 2013).

Hakkuu Ikä	Harvennus 35 v	Koivikon poistohakkuu kuusia varoen		
		40 v	45 v	55 v
Harvennettu	50	-	84	125
Harventamatta	-	90	120	-
Verhopuuston poisto kuusia varoen				
Ikä		17 v, 9 m	27 v 12 m	32 v 13 m
Harvennettu		60	100	120
verhopuusto				

Vapautushakkuiden kantohintoihin tehtiin kuusten varomisesta johtuva vähennys vastaavista korjuuolosuhteista tehtyjen ajanmenekkimallien avulla (Taulukko 4; Niemistö ym. 2012).

Harvennuksissa vähennys tehtiin männiköiden harvennuksista saatujen vastaavien tulosten perusteella (Niemistö & Muhonen 2021).

Taulukko 11. Alikasvoksen varomisen aiheuttama kuitupuun korjuukustannusten lisäys koivujen poistohakkuussa laskettuna Niemistön ym. (2012) ajanmenekkimalleilla taulukosta 3. Tehotunnit muunnettiin käyttötunneiksi hakkuussa kertoimella 1,393 ja metsäkuljetuksessa kertoimella 1,302 (Laitila & Väättäinen 2011). Tuntikustannus hakkuukoneella oli 100 € ja ajokoneella 75 €. Harvennushakkuun lisäkustannus perustuu mäntykuusi 2-jaksometsien harvennuksiin (Niemistö & Muhonen 2021)

Ajankohta (vuosia avohakkuusta):	17	27	32	35	40	45	50	55
Hakkuukäsittely								
Ensiharvennus	-	-	-	3,00	-	2,19	2,31	2,39
Ei ensiharvennusta	-	-	-	-	3,49	3,57	3,63	-
Verhopuukoivikon poisto	3,42	3,52	3,57	-	-	-	-	-

Alikasvoksen valtapituuden eli vallitsevien kuusten (600 pisintä per ha) keskipituuden ja keskiläpimitan kasvu mallitettiin erikseen alikasvosvaiheessa ja vapautuksen jälkeen koivujakson tiheyden funktiona. Molemmille jaksoille laskettiin em. kasvatusohjelmien keskimääräisen kehityksen rinnalle ylä- ja alakvartiilin mukaiset kehitysvaihtoehdot (hieskoivikoille suoraan mittaushavainnoista, kuusikoille mallien residuaaleista). Sekä hieskoivikoiden että kuusialikasvosten kasvun ennustaminen sisältää paljon kasvupaikkoihin ja puuston kuntoon liittyvää epävarmuutta, joka otettiin tässä tutkimuksessa huomioon kvartiilien avulla siten, että 25 %:ssa tapauksista puuston kasvu on huonompi kuin alakvartiilin mukaisessa tapauksessa ja 25 %:ssa se on parempi kuin yläkvartiilin mukaisessa tapauksessa. Alikasvoksen vapauttamisen jälkeinen jatkekehityksen simulointi esitetään tässä tutkimuksessa kuitenkin vain keskimääräistä puustoa edustavien alikasvosten osalta. Mallit on esitelty liitteessä 2.

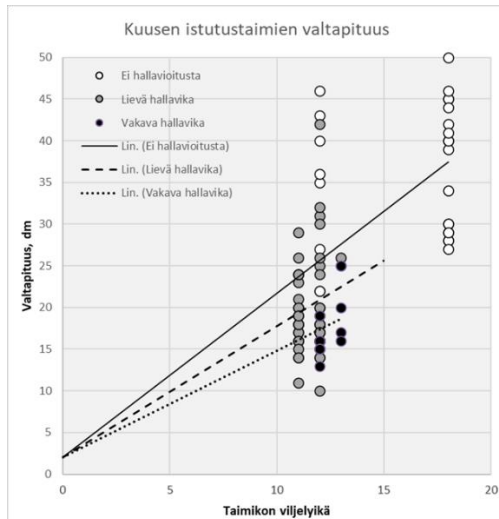
Kuusitaimikon valtapuiden (600 pisintä tainta hehtaarilla) kehitys ennustettiin alikasvokselle laadituilla kasvumalleilla 5-vuotisjaksoissa (liite 1) vapautushakkuuseen saakka ja hakkuun jälkeen vapautetun kuusikon kasvumalleilla 15 vuoden ajan, jonka jälkeen niiden kehitys ja puuntuotos kiertoajan loppuun simuloitiin Motti-mallilla.

Motti-simuloinnit

Kuusen istutustaimikoiden simuloinnit

Avoalalle syntyvien puustojen lähtöpuustot Motti-simuloinneissa valittiin mitatun taimiaineiston keskimääräisten ja taimikon ikään suhteutettujen metsikkötunnusten mukaan. Taimikoiden viljelyhetkestä laskettu ikä (viljelyikä) vaihteli välillä 11–18 vuotta. Kustakin kolmesta taimikkotyypistä tehtiin yksinkertainen lineaarinen regressiomalli kuvaamaan keskipituutta, valtapituutta (kuva 7) ja keskiläpimittaa viljelyiän funktiona kuusen istutustaimista, sekä luontaisista koivun ja männyn

taimista. Vastaavasti laskettiin kyseisten taimien kappalemääräiset hehtaari tiheydet taimikkotyypeittäin. Taimikoiden seitsemän vuoden ikävaihtelun vuoksi nämä ns. metsikkötason keskitunnukset valittiin kustakin taimikkotyyppistä regressiomallin tietyn viljelyiän kohdalta, joka taimikkotyyppissä 1 oli 15 vuotta ja vastaavasti 12 vuotta taimikkotyypeissä 2 sekä 3. Näin saadut keskitunnukset syötettiin Motti-simulaattorilla tehtävän kasvatusohjelman aloitusvaiheen eli 0-ajankohdan kuviotiedoiksi.



Kuva 7. Kuusen istutustaimien valtapituus hallavioituksen eri luokissa

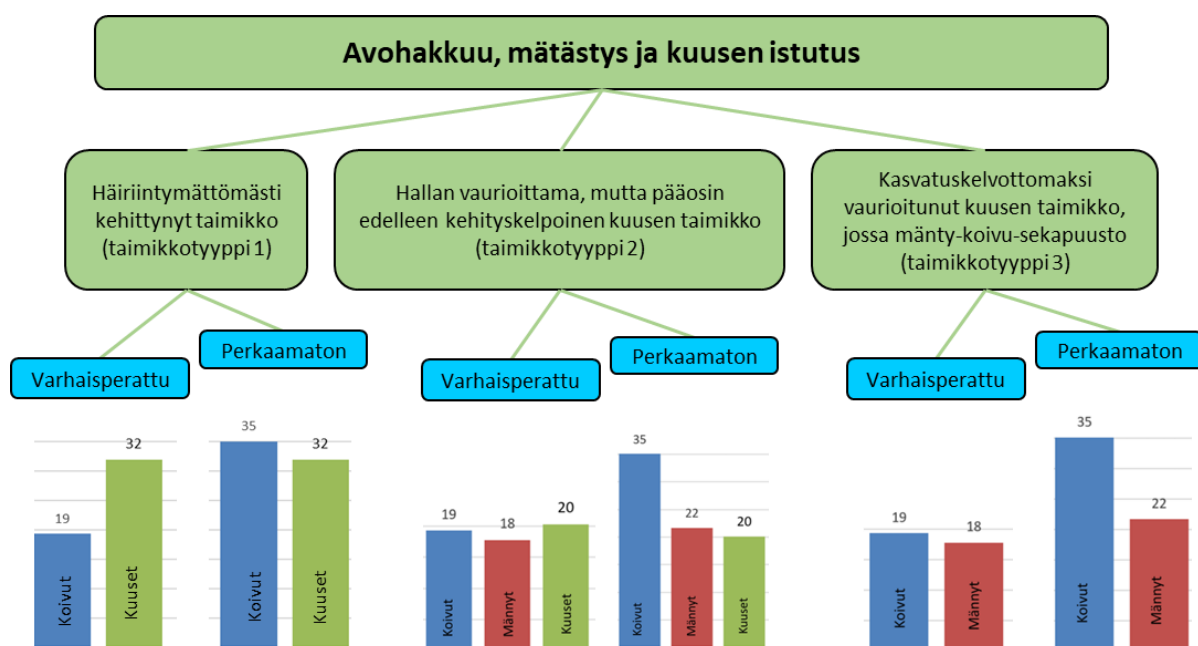
Inventoiduissa taimikoissa oli selvästi havaittavissa, kuinka niihin kehittyneiden luontaisten koivujen valtapituus vaihteli sen mukaan, oliko taimikkoon tehty varhaisperkaus vai ei (kuva 8). Simulointien alkupuustoiksi valittiin sellaiset puustotunnukset puulajeittain, jotka vastasivat varhaisperattuja taimikoita. Simuloinnin aloitushetken taimikonhoidon lisäksi paljaan maan arvojen laskennat sisälsivät näin ollen myös varhaisperkauksen kustannukset viisi vuotta istutuksen jälkeen.

Motti-simulaattorissa aloitustaimikon metsikkötunnukset määräytyvät kasvupaikkatyypeittäin simulaattoria varten tehtyjä taimikoiden varhaiskehityksen malleja noudattaen. Aloitustaimikko voidaan siis luoda antamalla pelkästään simuloitavan puusto-ositteen puulaji, puujakso (ylispuujakso, vallitseva jakso tai alempi jakso) sekä syntytapa ja puuston ikä. Näiden tietojen pohjalta määritetään simuloitavan puuston runkoluku, pohjapinta-ala keskiläpimittaa ja valtapituus simulaattorissa olevien mallien mukaan, kun tiedetään metsikön sijaintikunta. Sijainnin mukaan määräytyy kasvuun ja tuotokseen voimakkaasti vaikuttava ilmastollinen lämpösumma. Koska Motin antamat puustotunnukset eivät tietyllä iällä aina vastanneet täsmällisesti todellisia tämän aineiston taimikoista mitattuja tunnuksia, jouduttiin toisinaan muuttamaan Mottiin syötettävää todellista taimikon ikää ja joskus myös siitä mitattua tiheyttä. Kun pituus- ja läpimittatiedot saatiin aloitustaimikossa vastaamaan mitattua todellisuutta ei alkuperäisellä taimitiheydellä ollut enää merkitystä, sillä jokainen simulointikierron alkoi taimikonhoidolla. Taimikonhoitokäskyllä kasvatettavan puuston puulajikohtaiset tiheydet valittiin kaikkiin kolmeen taimikkotyyppiin sopivimman aloitustiheyden mukaan seuraavasti:

1. Häiriintymättömästi kehittyneissä taimikoissa (taimikkotyyppi 1) kuusen taimien hehtaari tiheys 1900 runkoa, jotka kaikki kasvatetaan puhtaana yhden puulajin taimikkona päätehakuun

tavoiteläpimitaan. Kuusten valtapituus 3,2 m, keskipituus 2,2 m ja keskiläpimitta 3,0 cm. Simuloidussa taimikon harvennuksessa poistetaan kaikki pääasiassa hieskoivuja käsittävä lehtipuusto (4350 runkoa hehtaarilla).

- Hallan vaurioittamissa mutta pääosin edelleen kehityskelpoisissa kuusen taimikoissa (taimikkotyyppi 2) kuusen keskimääräinen mitattu taimitiheys 12 vuoden viljelyiässä oli niin ikään 1900 runkoa, joista 1300 runkoa katsottiin kehityskelpoisiksi. Kasvatettavien kuusten valtapituus oli 2,0 m, keskipituus 1,8 m ja keskiläpimitta 1,5 cm. Taimikkoa päätettiin simuloitavassa taimikon harvennuksessa kasvattaa siten että 1300 kuusen lisäksi täydentäviksi taimiksi valittiin kaikki ne luontaiset männyt, joita oli keskimäärin 700 runkoa hehtaarille. Niiden valtapituus oli 1,8 m, keskipituus 1,4 m ja keskiläpimitta 2,0 cm. Koivuja tämän taimikkotyypin taimikoissa oli keskimäärin 6300 tainta hehtaarilla. Niiden mitat olivat vastaavasti 1,9 m, 1,6 m ja 0,6 cm. Koivut olivat pääosin taimikoissa tehtyjen varhaisperkausten jälkeen syntyneitä. Tämän taimikkotyypin simuloinnissa ne päätettiin simuloinnin aloitushetkellä tehtävällä taimikonharvennuskäskyllä perata kaikki pois
- Kasvatuskelvottomiksi vaurioituneissa kuusen taimikoissa (taimikkotyyppi 3) oli mittausten mukaan luontaisesti syntyneitä männyn taimia hehtaaria kohden keskimäärin 1700. Niiden valtapituus oli 1,8 m, keskipituus 1,4 m ja keskiläpimitta 2,2 cm. Hieskoivuja oli keskimäärin 13000 tainta hehtaarilla. Niiden valtapituus oli 1,9 m, keskipituus 1,6 m ja keskiläpimitta 1,2 cm. Simulointi aloitettiin taimikon harvennuksella, jossa koivut pääosin poistettiin ja kasvatettiin kaikkien 1700 männyn taimien lisäksi 300 täydennyskoivua.



Kuva 8. Istutuskusten sekä luontaisten männyn ja koivun taimien valtapituudet eri taimikkotyypeissä

Alikasvoksena kehittyneiden kuusikoiden simuloinnit

Vapautushakkuun puunkorjuun aiheuttama kuusten tuhoutuminen kuusia varottaessa laskettiin Niemistön ym. (2012) mallilla, joka perustuu hieskoivuylispuuston ja kuusialikasvoksen runkolukuihin. Malli sisältää ajourien hakkuun, joten se soveltuu tämän aineiston kasvatusvaihtoehtoihin, joissa koivikossa ei tehty kaupallista harvennusta ennen kuusten vapautusta. Kyseisen tutkimuksen mukaan valtaosa kuusten tuhoutumisesta tapahtui ajouralla, joten harvennetussa koivikossa ne ovat tuhoutuneet jo harvennuksessa.

Männiköissä valmiilta ajourilta tehdyssä alikasvoksen vapautuksessa tuhoutui Hurskaisen (2019) mukaan keskimäärin 6,8 % ja harvennuksessa keskimäärin 4,1 % kuusista. Tällä perusteella hieskoivikon harvennuksessa tuhoutui 24 % taimista. Niistä 20 %-yksikköä oli ajourilla, joita oli 20 metrin uravälillä 500 m per ha ja uraleveys oli 4 m (telojen ulkoleveys 3 m + 2*0,5 m niiden ulkopuolella). Vanhoilta urilta tehtävässä kuusten vapautushakkuussa laskettiin tuhoutuvan vielä 6,8 % taimista (taulukko 12). Molempien tutkimusten mukaan puunkorjuussa tuhoutui tasaisesti kaiken kokoisia kuusia, joten kuusten runkoluvun vähennys tehtiin suhteellisesti samansuuruisena kaiken kokoisille kuusille. Tällöin alkuun arvioidusta 2100 kuusesta hehtaarilla tuhoutui ensiharvennuksessa noin 500 runkoa ja koivikon päätehakkuussa eli alikasvoskuusten vapautushakkuussa vielä noin 100 runkoa, jolloin vapautuksen jälkeen jäi 1500 runkoa kasvatettavaksi (taulukko 12). Vastaavasti harventamattoman koivikon päätehakkuussa tuhoutui yhteensä noin 600 kuusen runkoa. Tässä tutkimuksessa arvioitiin alikasvoskuusten tiheyden vaikutusta kannattavuuteen siten että simuloinnit ja laskelmat tehtiin myös puolta pienemmällä kuusten tiheydellä, jossa simuloinnin lähtöpuustoksi saatiin 750 kasvatettavaa kuusen runkoa vapautushakkuun jälkeen.

Taulukko 12. Puunkorjuussa tuhoutuvien ja vapautuksen jälkeen kasvamaan jäävien kuusten määrä hieskoivikon harvennuksen ja poistohakkuun, sekä tiheän koivikon poistohakkuun jälkeen.

Alussa	Käsittely	Tuhoutuneita taimia, kpl ha-1		Kasvatettava
		Harvennus	Vapautushakkuu	puusto, kpl ha-1
2100 kpl ha-1	Harvennus > 10 m2	24 %* = 500	6,8 %* = 100	1500
	Tiheä, 20 m2/ha		600	1500
1050 kpl ha-1	Harvennus > 10 m2	24 %* = 250	6,8 %* = 50	750
	Tiheä, 20 m2/ha		300	750

*Tuhoutuneita ajouralla 20 % + 4 % harvennuksessa ja 6,8 % vapautushakkuussa (Hurskainen 2019)

Alikasvoksena kehittyneiden kuusikoiden Motti-simulointien lähtöpuustoiksi kussakin kasvatusvaihtoehdossa valittiin vapautettujen kuusikoiden mittausaineistosta sellainen koeala, jonka vallitsevan kuusikon keskiläpimitta ja keskipituus olivat mahdollisimman lähellä ko. kasvatusvaihtoehdolle ennustettua puustoa 15 vuotta vapautuksen jälkeen. Valituilta koealoilta edellytettiin myös sitä, että runkoluku oli tutkittavien tiheyksien 750 ja 1500 kpl ha⁻¹ (taulukko 12) välillä, mahdollisimman lähellä puoliväliä. Simuloinnin lähtöpuusto täsmäytettiin ko. runkolukuihin lisäämällä tai vähentämällä valitsevaa puustoa pienempien puiden määrää hehtaarilla (niiden lukumääräkerrointa pienentäen tai suurentaen), jolloin vallitsevan puuston tunnuksiset eivät muuttuneet.

Paljaan maan arvon laskenta

Viljelykuusikoiden osalta pelkkä kasvatusjakson paljaan maan arvo saatiin suoraan Motti-simulaattorin tuottamana ottaen huomioon kuitenkin mahdollinen muunnos taimikon todellisessa iässä. Kuten kuusen viljelytaimikoiden simulointeja esittelevässä kappaleessa todettiin, Motin antamat puustotunnukset eivät tietyllä iällä aina vastanneet täsmällisesti todellisia tämän aineiston taimikoista mitattuja tunnuksia. Tällöin jouduttiin toisinaan muuttamaan Mottiin syötettävä ikä todellista taimikon ikää nuoremmaksi. Todellisen taimikon iän ja simulaattoriin syötetyn iän ero huomioitiin paljaan maan arvon laskennassa diskonttaamalla simulaattorin antama paljaan maan arvo vastaavaa vuosimäärää aiempaan ajankohtaan. Koska kaikki simuloidut taimikot olivat selkeästi varhaisperattuja, ilman että varhaisperkauksesta olisi ollut mitään dokumentoitua tietoa, lisättiin kaikkiin paljaan maan arvoihin vielä varhaisperkauksen kustannus viiden vuoden ajankohdasta 0-hetkeen eli avohakkuuhetkeen diskontattuna. Lopuksi lisättiin vielä taimikon perustamisen kustannukset kuten hakkuualan raivaus, mätästys ja kuusen istutus. Näin saatua viljelyketjun ja viljelytaimikon kasvatusjakson paljaan maan arvoa verrattiin koivun kasvatukseen ja sen alla alikasvoksena kehittyneiden kuusikoiden kasvatusjaksojen paljaan maan arvoihin. Kaikkien istutuskuusikoiden kasvatusten paljaan maan arvot laskettiin sekä kunnostusojitettuna että ilman ojituksia. Istutuskuusikoiden osalta kunnostusojitus ajoitettiin ensiharvennuksen yhteyteen. Tämän raportin tulosten yhteydessä on kuitenkin rajoitettu istutuskuusikoiden osalta kasvatusketjuihin ilman ensiharvennuksen yhteydessä tehtävää kunnostusojitusta.

Alikasvoksena kehittyneiden kuusikoiden simuloimalla saadut paljaan maan arvot yhdistettiin koivun kasvatuksen nettohyötyarvojen kanssa koko kaksijaksoiskasvatuksen paljaan maan arvoiksi kolmen prosentin korolla seuraavan laskentaketjun mukaisesti:

- 1) Liitteessä 1 olevan taulukon hakkuutapakohtaisia kantohintoja käyttäen laskettiin koivun harvennus- ja päätehakkuun kuitupuukertymän arvo vähennettynä alikasvoksen varomisesta aiheutuvilla lisäkustannuksilla. Eri ajankohtina saadut kuitupuukertymän arvot diskontattiin avohakkuun ajankohtaan
- 2) Koivikon harvennuksen kustannus, joka ajoittui 15 vuotta avohakkuun jälkeen, diskontattiin avohakkuuhetkeen ja vähennettiin koivikon diskontatuista hakkuutuloista. Taimikon harvennuksen hinta, samoin kuin muutkin metsänhoidon kustannukset liitteessä 2
- 3) Koivikon päätehakkuun eli kuusen vapauttamisen hakkuun kuitupuukertymä lasketaan kuten edellä mukaan lukien kuusen varomisesta aiheutuvat korjuun lisäkustannukset. Kaikissa alikasvoksen kasvatuslinjoissa liitettiin kuusen vapauttamishetkeen kunnostusojitus, jonka kustannukset vähennettiin kuitupuukertymän arvosta ja erotus diskontattiin avohakkuuhetkeen.
- 4) Vapautuksen jälkeinen ja Motti-simulaattorilla saatu kuusen kasvatuksen paljaan maan arvo (kasvatusjakson nettohyötyarvo + tulevien kiertoaikojen nettohyötyarvo) diskontataan avohakkuuhetkeen ottamalla huomioon, että vapautushetken ja simuloinnin aloitushetken väliin mahtuu 15 vuoden aikajakso, jossa alikasvoskuusten kehitys on tätä tutkimusta varten mallinnettu liitteessä 2 esitettyjen mallien mukaisesti. Kuusen kasvatuksen avohakkuuhetkeen diskontattu paljaan maan arvo lisättiin aloitushetkeen aiemmin diskontattuihin tuloihin ja menoihin.

Tilanteessa, jossa vaihtoehtojen kannattavuutta vertailtiin koivikon ensiharvennushetken näkökulmasta, diskontattiin kaikki ensiharvennushetken (35 vuotta avohakkuusta) jälkeen saatavat koivun päätehakkuun tulot samoin kuin päätehakkuussa vapautettujen alikasvoskuusten kasvatusjaksojen paljaan maan arvot avohakkuuhetken sijasta kyseiseen 35 vuotta myöhempään päätöstilanteeseen eli ensiharvennusvaiheeseen. Näin ollen tarkastelun oletuksena oli, että saman ikäinen harventamaton koivikko on jo ennestään ollut olemassa.

Kyseiseen hetkeen kuuluvana yhtenä vaihtoehtona oli koivun poistaminen samalla hetkellä ja kuusen viljely. Näin ollen kannattavuus laskettiin kaikilla kolmella viljelykuusikoiden kohdalla sovelletuilla taimikkotyypeillä kuusen viljelyn onnistumisen mukaan (taimikkotyypit 1,2 ja 3). Mainitut kolme kuusen viljelyn taimikkotyyppiä paljaan maan arvoineen diskontattiin ensiharvennusajankohtaan koivun kuitupuukasvatuksen päättymisen ajankohdasta. Samoja kolmea taimikkotyyppiä käytettiin myös tilanteessa, jossa koivua kasvatettiin ilman alikasvoskuusia vielä ensiharvennuksen jälkeen ja uudistettiin viljelemällä kuusikoksi koivun päätehakkuun jälkeen.

Mikäli alikasvoskuusia ei luontaisesti ole syntynyt vielä koivun ensiharvennusajankohtaankaan mennessä, on se mahdollista istuttaa koivun alle välittömästi ensiharvennuksen jälkeen. Tämän tapauksen kannattavuuslaskelmassa siihen lisättiin kuusen viljelykustannus muokkaamattomaan maahan. Koska luontainen alikasvos katsottiin olevan ensiharvennushetkellä jo rinnankorkeutta vastaavassa keskipituudessa, diskontattiin viljelytapauksessa vapautetun alikasvosken paljaan maan arvo kymmenen vuotta myöhemmästä ajankohdasta. Näin ollen sen rinnankorkeusmittaan kasvamisen aikavaatimus ennen vapautushakkuuta tuli laskelmassa otettua huomioon.

Tulokset

Uudistamisvaihtoehtojen vertailut avohakkuualan päätöksentekotilanteessa

Kuvassa 6 esitetyt kolme koivun kasvatuslinjaa ja niihin sisältyvät eri ajankohdat alikasvoskuusten vapauttamiselle on seuraavassa paljaan maan arvoja esittelevässä taulukossa 13 ja vastaavassa käyttöpuun kokonaistuotosten taulukossa 14 nimetty seuraavasti:

Kaksijaksoisen koivu-kuusimetsikön kasvatuslinja 1: Koivun kasvatus 15 vuoden ikäisenä harvennetusta 1600 rungon verhopuutaimikosta, jota kasvatetaan kuusen päällä harvennuksen jälkeen joko 2, 12 tai 17 vuotta

Kaksijaksoisen koivu-kuusimetsikön kasvatuslinja 2: Koivun kasvatus 15 vuoden ikäisenä kuitupuukasvatusta varten harvennetusta 2500 rungon taimikosta, jota kasvatetaan kuusen päällä ensiharvennushetkeen 20 vuotta ja harvennuksen jälkeen vapautetaan joko 10 tai 20 vuoden kuluttua eli joko 45 tai 55 vuoden kuluttua avohakkuusta lukien.

Kaksijaksoisen koivu-kuusimetsikön kasvatuslinja 3: Koivun kasvatus 15 vuoden ikäisenä kuitupuukasvatusta varten harvennetusta 2500 rungon taimikosta, jota kasvatetaan kuusen päällä ilman ensiharvennusta, kunnes vapautetaan joko 40 tai 45 vuoden kuluttua avohakkuusta lukien.

Taulukon 13 mukaisesta paljaan maan arvojen koosteesta ilmenee, että kannattavimmaksi osoittautuneet vaihtoehdot liittyvät kuusen luontaiseen taimettumiseen ensimmäisen 15 vuoden aikana avohakkuusta lukien. Siis niihin kaksijaksoisen koivu-kuusimetsikön kasvatuslinjan 1 tilanteisiin, joissa koivu on harvennettu verhopuustoksi jo varhain syntyneen kuusialikasvoksen päälle ja verhopuusto poistetaan joko 2, 12 tai 17 vuoden kuluttua (17, 27 tai 32 vuotta avohakkuusta).

Kuusen viljelyn kasvatuslinja eli avohakkuualan raivaus, mätästys, istutus, varhaisperkaus ja taimikonhoito tuottivat lähes yhtä hyvän taloudellisen tuloksen edellyttäen kuitenkin viljelyn ja taimikon kehityksen optimaalista onnistumista eli 1900 tervettä istutettua puuyksilöä aina ensiharvennukseen asti. Verrattuna luontaiseen alikasvosuudistamiseen, oli onnistunut istutuslinja paljaan maan arvoltaan vähintään 1000 € kannattavampi kuin kaksijaksoinen kasvatus (kasvatuslinjat 2 ja 3), jossa kuusen taimiaines syntyi vasta koivutaimikon harvennuksen (15 vuotta avohakkuusta) ja ensiharvennushetkellä kuusen taimet olivat noin rinnankorkeutta vastaavassa keskipituudessa.

Taulukko 13. Paljaan maan arvot (€ hehtaarilla) eri kasvatuslinjoissa. Laskentakorko 3 %.

Kasvatuslinja Ilman kunnostusojitusta kuusen ensiharvennuksessa	Kuusen vapauttamisen ajankohta vuosina avohakkuusta ja koko kasvatuslinjan kiertoaika kuusen 29 cm:n läpimittaan						
	17 60	27 65	32 64	40 86– 88	45 82– 84	50 81– 83	55 76–77
Kaksijaksoisen koivu-kuusimetsikön kasvatuslinja 1 1500 vapautettua alikasvoskuusta	2801	2680	2693				
Kaksijaksoisen koivu-kuusimetsikön kasvatuslinja 2 1500 vapautettua alikasvoskuusta 750 vapautettua alikasvoskuusta					1507 1241		1391 1123
Kaksijaksoisen koivu-kuusimetsikön kasvatuslinja 3 1500 vapautettua alikasvoskuusta 750 vapautettua alikasvoskuusta				1309 1075	1319 1090		
	Istutuslinjan kiertoajat						
	60	66	70				
Kuusen mätästyksen ja istutuksen kasvatuslinja Taimikkotyyppi 1 Taimikkotyyppi 2 Taimikkotyyppi 3	2519	1969	-378				

Taulukkoon 14 on koostettu vastaavien kasvatuslinjojen tuottamat käyttöpuun (tukki- ja kuitupuu) kokonaistuotokset. Sen mukaisesti erot eri kasvatuslinjoilla ovat huomattavasti pienemmät suhteessa paljaan maan arvoihin. Riippumatta itse kasvatuslinjasta suurimmat erot olivat luonnollisesti vapautetun alikasvoskuusen tiheyden aiheuttamia. Vapautettaessa 1500 kuusen tainta hehtaarilla saavutetaan keskimäärin noin 500 kuution kokonaistuotos, kun se 750 kuusen taimella jää 360 kuutioon. Vaikka taimitiheydellä 1500 hehtaaria kohden saavutetaan kasvatuslinjassa 2 suunnilleen samat tai vain hieman pienemmät kokonaistuotokset kuin kasvatuslinjassa 1 ja onnistuneessa viljelylinjassakin, on paljaan maan arvoissa luonnollisesti suuria eroja lähinnä alikasvoksen

vapauttamisajankohdista ja kasvatuslinjojen uudistamisvaiheen läpimittatavoitteesta (kuusen 29 cm:n keskiläpimitta) johtuvien kasvatusaikaerojen takia.

Taulukko 14. Käyttöpuun kokonaistuotokset (m³ hehtaarilla) eri kasvatuslinjoissa.

Kasvatuslinja Ilman kunnostusojitusta kuusen ensiharvennuksessa	Kuusen vapauttamisen ajankohta vuosina avohakkuusta ja koko kasvatuslinjan kiertoaika kuusen 29 cm:n läpimittaan						
	17 60	27 65	32 64	40 86– 88	45 82– 84	50 81– 83	55 76–77
Kaksijaksoisen koivu-kuusimetsikön kasvatuslinja 1 1500 vapautettua alikasvoskuusta	522	521	506				
Kaksijaksoisen koivu-kuusimetsikön kasvatuslinja 2 1500 vapautettua alikasvoskuusta 750 vapautettua alikasvoskuusta					492 370		505 380
Kaksijaksoisen koivu-kuusimetsikön kasvatuslinja 3 1500 vapautettua alikasvoskuusta 750 vapautettua alikasvoskuusta				462 354	453 348		
	Istutuslinjan kiertoajat						
	60	66	70				
Kuusen mätästys- ja istutuksen kasvatuslinja Taimikkotyyppi 1 Taimikkotyyppi 2 Taimikkotyyppi 3	520	545	343				

Toimenpidevaihtoehdot koivun kasvatuksen ensiharvennusvaiheessa

Kannattavuusvertailu tehtiin myös tilanteessa, jossa lähtökohtana oli jo ennestään olemassa oleva koivikko 35 vuoden ikäisenä eli sen ensiharvennusajankohtana. Kuvassa 6 esitetyn kasvatuslinjan 2 harvennusajankohdassa tehtävät jatkotoimenpiteiden vaihtoehdot ovat seuraavassa paljaan maan arvoja esittelevässä taulukossa 15 nimetty seuraavasti:

Koivikon välittömän avohakkuun ja viljelykuusikon kasvatuslinja: Päätetään 2500 rungon tiheyteen harvennetun koivikon kasvatus ja tehdään avohakkuu, mätästys, kuusen istutus, varhaisperkaus sekä taimikonhoito ja kasvatetaan kuusikko 29 cm läpimittaan. Seuraavat tulevat kiertoajat oletetaan perustettavan vastaavalla tavalla viljellen.

Koivun jatkokasvatuksen linja ilman kuusialikasvosta: Hyödynnetään koivun kuitupuukasvatuksen tuotospotentialiaali kokonaisuudessaan ilman alikasvoskuusia, mikäli sitä jostain syystä ei ole ensiharvennuksen mennessä luontaisesti syntynyt. Kasvatetaan koivua harvennuksen jälkeen 10 tai 20 vuotta ja tehdään päätehakkuu. Seuraavat tulevat kiertoajat oletetaan tässäkin olevan viljelykuusikoita.

Koivun ja luontaisen kuusen kaksijaksoiskasvatuksen linja: Koivun harvennus ja kasvatus 10 vuotta 45 vuoden kiertoajalla ja samanaikaisesti kaksijaksoinen kasvatus harvennushetkeen mennessä syntynyttä luontaista kuusialikasvosta hyödyntäen. Kuusen vapautus 10 tai 20 vuoden jatkokasvatuksen jälkeen. Siitä eteenpäin tulevat kiertoajat viljeltävinä kuusikoina.

Koivun ja istutetun kuusen kaksijaksoiskasvatuksen linja: Koivun harvennus ja kasvatus 10 vuotta 45 vuoden kiertoajalla ja samanaikaisesti kaksijaksoinen kasvatus harvennushetkellä koivun alle muokkaamattomaan maahan istutettua kuusen alikasvosta hyödyntäen. Kuusen vapautus 10 vuoden jatkokasvatuksen jälkeen. Tulevat kiertoajat kuusen viljelynä.

Ylivoimaisesti paras taloustulos saavutettiin, mikäli harvennusvaiheen koivikon (2500 runkoa hehtaarilla) alle oli luontaisesti syntynyt runsaan metrin mittainen kehityskelpoinen kuusialikasvos, joka ensiharvennuksen jäljiltä oli tiheydeltään noin 1600 kuusta hehtaarilla ja koivun päätehakkuun jälkeen (10 tai 20 vuotta ensiharvennuksesta) vapautettuna 1500 kuusta hehtaarilla. Kannattavuus oli 10 vuoden kuluttua vapautettuna noin 900 € ja 20 vuoden kuluttua vapautettuna noin 700 € parempi kuin heti tehtävällä koivun poistolla (koivikon avohakkuu) ja sen jälkeisellä onnistuneen (taimikkotyyppi 1) viljelykuusikon kasvatuslinjalla.

Kuusen viljely olemassa olevan koivikon alle välittömästi harvennuksen jälkeen muokkaamattomaan maahan näyttäisi kannattavan vähintään yhtä hyvin kuin onnistunut avomaaviljely koivikon harvennuksen ja päätehakkuun jälkeen

Taulukko 15. Nettonykyarvot (€ hehtaarilla) eri kasvatuslinjoissa, kun lähtökohtana jo olemassa olevan koivikon ensiharvennusvaihe. Laskentakorko 3 %.

Kasvatuslinja Ilman kunnostusojitusta kuusen ensiharvennuksessa	Kasvatuslinjan päätehakkuun ajankohta laskettuna 35-vuotiaan koivikon ensiharvennuksen ajankohdasta								
	53	57	60	66	70	76	80	86	90
Koivikon avohakkuun ja viljelykuusikon kasvatuslinja Taimikkotyyppi 1 Taimikkotyyppi 2 Taimikkotyyppi 3			4158	3608	1261				
Koivun jatkokasvatuksen linja ja kuusen uudistaminen Koivun kasvatus 10 vuotta harvennuksen jälkeen Taimikkotyyppi 1 Taimikkotyyppi 2 Taimikkotyyppi 3 Koivun kasvatus 20 vuotta harvennuksen jälkeen Taimikkotyyppi 1 Taimikkotyyppi 2 Taimikkotyyppi 3					3359	2949	1203 3179	2320	1575
Koivun ja luontaisen kuusen kaksijaksoiskasvatuksen linja Koivun kasvatus 10 vuotta harvennuksen jälkeen Koivun kasvatus 20 vuotta harvennuksen jälkeen	5055	4726							
Koivun ja istutetun kuusen kaksijaksoiskasvatuksen linja Koivun kasvatus 10 vuotta harvennuksen jälkeen	3182								

OSIO 4: Vaihtoehtoisten hakkuumenetelmien kannattavuus turvemailla

Turvemaiden metsänhoito on perinteisesti perustunut metsäojitukseen, harvennushakkuihin ja kunnostusojituksiin. Osa ojitetuista turvemaista on päätehakattu ja uusi sukupolvi on perustettu pääasiassa viljellen. Suuri osa turvemaista on kuitenkin edelleen uudistamatta ja viime aikoina päätehakkuun rinnalle on tullut vaihtoehdoksi jatkuvapeitteinen metsänkasvatus. Viime aikoina on jaksollisen kasvatuksen rinnalle tullut myös muita metsänkäsittelytapoja, jotka kirjallisuudessa luokitellaan lähtökohtaisesti ”osittaihakkuumenetelmiksi”, engl. partial cutting methods (Bose ym. 2014). Esimerkiksi, jatkuvapeitteinen metsänkasvatus (engl. continuous cover forestry, uneven-aged management) kuuluu tähän kategoriaan. Myös kaistalehakkuut luetaan samaan ryhmään. Mänty ns. valopuuna soveltuu kuusta paremmin kaistalehakkuuseen, ja tässä raportissa keskitytäänkin männyn kaistalehakkuihin.

Taloustarkastelua varten valittiin kolme eri paikkakuntaa, joille kaistalehakkuu simuloitiin ja edelleen määritettiin kannattavuus verrattuna perinteiseen, jaksolliseen kasvatukseen. Paikkakuntien (Akaa, Kuopio ja Oulu) valinnalla pyrittiin selvittämään metsän maantieteellisen sijainnin (lähinnä lämpösumma) vaikutusta kannattavuuteen. Simuloinnit perustuivat Motti-metsikkösimulaattorin kasvumalleihin (esim. Salminen ym. 2005, Hynynen ym. 2015). Motti-metsikkösimulaattorin kasvumallit ennustavat puuston kasvua sekä kivennäismailla (Juutinen ym. 2018) että turvemailla (Ahtikoski ja Hökkä 2019) varsin luotettavasti. Tässä Motti-metsikkösimulaattoriin oli lisäksi integroitu reunametsän varjostava vaikutus hakatun kaistaleen taimikon kehitykseen (Siipilehto 2006). Nämä uudet reunametsän vaikutuksia kuvaavat mallit oli empiirisesti sovitettu ja erikseen validoitu (Ahtikoski ym. 2022a). Molempien kaistaleiden (hakattu ja puustoinen) leveydeksi oletettiin 20 m, 35 m tai 50 m ja hakattujen kaistaleiden oletettiin taimettuvan samalla tavoin riittävän tiheiksi (Ahtikoski ym. 2022a). Simulointien lähtötilanteessa rämemännikön puuston tilavuus oli n. 216 m³/ha kaikilla paikkakunnilla. Talouslaskennassa käytettiin Taulukossa 16 esitettyjä kantohintoja ja metsänhoidon kustannuksia.

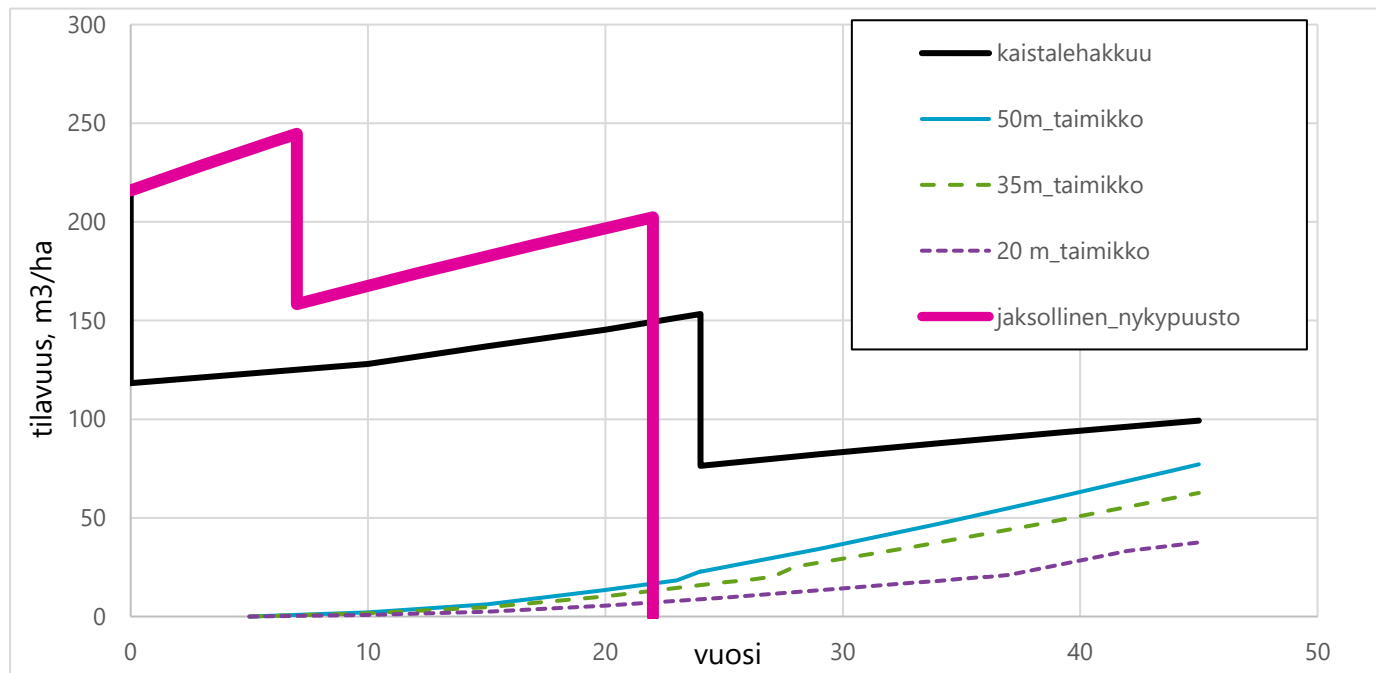
Taulukko 16. Kaistalehakkuun kannattavuuslaskelmissa (myös jaksollinen kasvatus) käytetyt kantohinnat ja metsänhoidon kustannukset (Ahtikoski ym. 2022a).

Maanmuokkaus ¹⁾	Istutus ¹⁾	Taimikonhoito ¹⁾	Kunnostusojitus ¹⁾	Mäntytukin kantohinta ²⁾	Mäntykuitupuun kantohinta ²⁾
409.0 € ha ⁻¹	634.5 € ha ⁻¹	458.2 € ha ⁻¹	221. 5 € ha ⁻¹	56.9 € m ⁻³	16.7 € m ⁻³

¹⁾ kustannus ainoastaan jaksollisessa kasvatuksessa, ²⁾ kantohinnat sekä kaistalehakkuussa että jaksollisessa kasvatuksessa

Talouslaskenta toteutettiin Ahtikoski ym. (2022a) artikkelissa esitettyjen matemaattisten kaavojen mukaan siten, että talouslaskennassa sovellettiin päättymättömän sarjan summia sekä

kaistalehakkuussa että jaksollisessa kasvatuksessa. Lyhyesti, kaistalehakkuu toteutettiin niin, että ensin simuloitiin ns. konversiovaihe, jonka aikana lähtötilanteen metsä vähitellen konvergoitiin ns. *steady state*-tilaan, jota puolestaan toistettiin ikuisuuteen. Lisäksi sekä konversiovaiheessa että *steady state*-tilassa puustoisella kaistaleella toteutettiin päätehakkuuta edeltävä harvennus, mikä todettiin taloudellisesti paremmaksi vaihtoehdoksi kuin pelkkä puustoisien kaistaleiden päätehakkuu. Taloustulokset laskettiin 2 %, 3 %, 4 % ja 5 % laskentakorkokannoilla. Simulointien perusidea on esitetty Kuvassa 9. Vastaavasti, jaksollisessa kasvatuksessa noudatettiin hyvän metsänhoidon suosituksia sekä nykypuusukupolvessa että tulevaisuudessa. Taulukossa 17 on seikkaperäisesti esitetty simulointien tulokset hakkuukertyminä kaistalehakkuussa (ml. konversiovaihe ja *steady state*) ja jaksollisessa kasvatuksessa (nykypuusukupolvi ja seuraavat puusukupolvet). Kuvasta 9 huomataan, että kaistaleen leveys selkeästi vaikutti kehittyvän taimikon kasvuun, mikä johtui reunametsän varjostavasta vaikutuksesta. Vastaavasti kaistaleen leveys vaikutti puustoisien kaistaleiden kasvuun positiivisesti siten, että mitä suurempi reunametsän osuus, sitä parempi kasvu. Kuvassa 9 yksinkertaistettu esitystapa, jossa puuston kehitys keskiarvostettu (ainoastaan yksi käyrä: ”kaistalehakkuu”) yli kaikkien kolmen kaistaleen leveyden.



Kuva 9. Simuloitu puuston kehitys lähtötilanteesta kaistalehakkuussa ja jaksollisessa kasvatuksessa Akaalla, m³/ha. Hakatun kaistaleen taimikon kehitys eri kaistaleen leveyksillä (20 m, 35 m ja 50 m), m³/ha. Lähtötilanteessa puuston tilavuus n. 216 m³/ha.

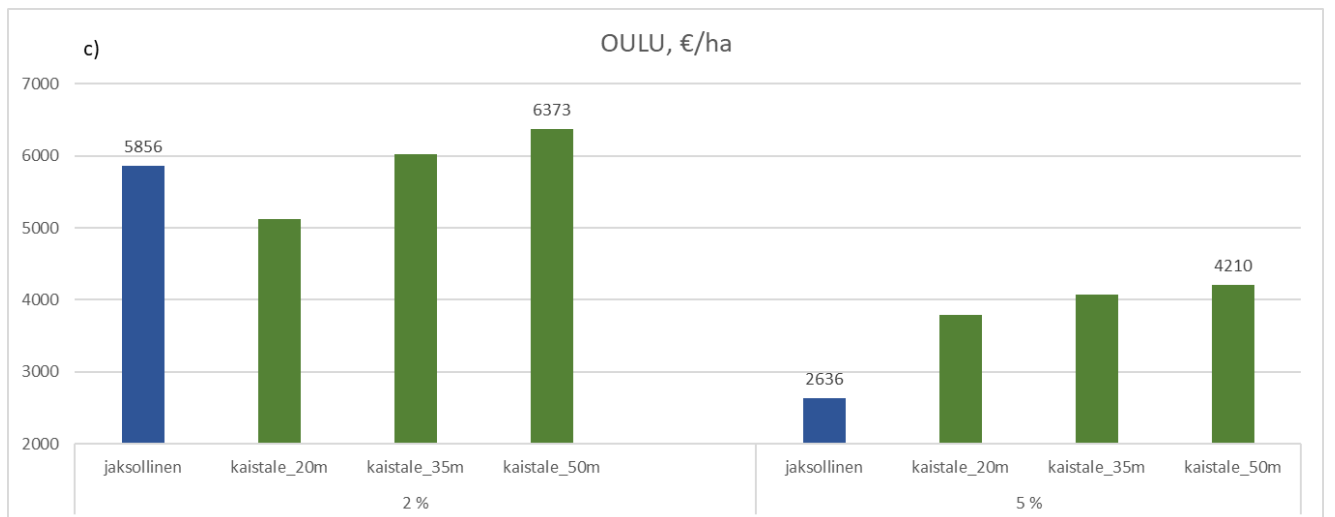
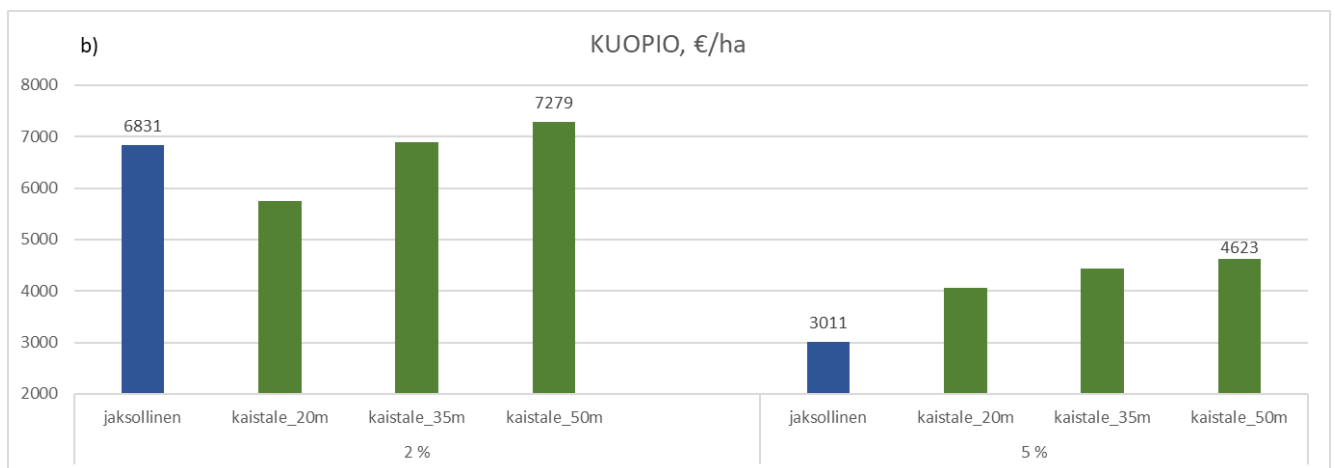
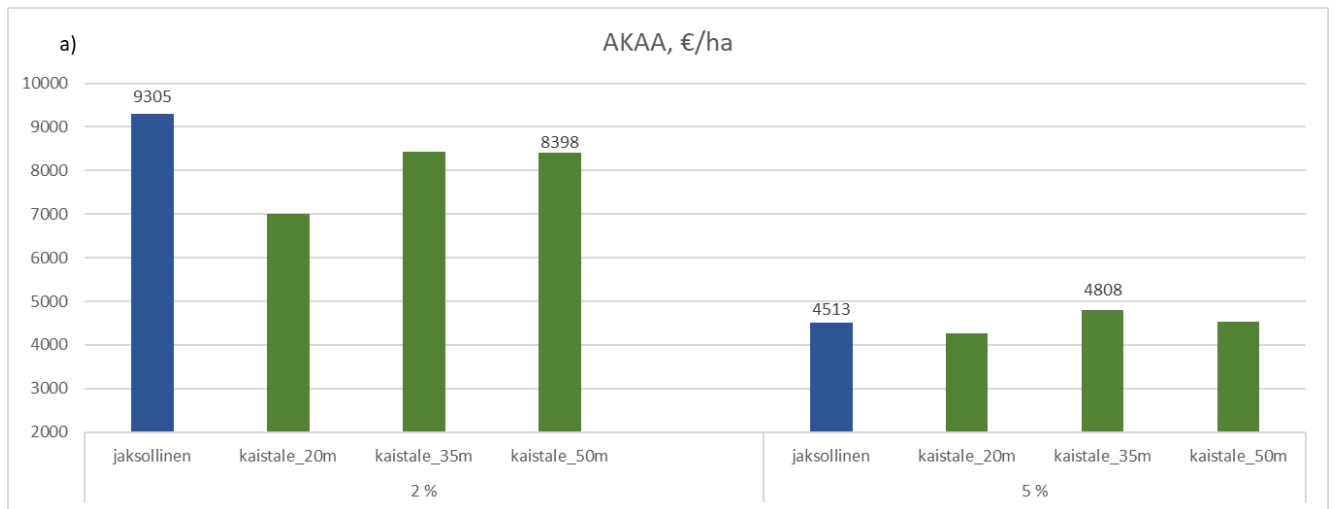
Taulukko 17. Motti-simulointien mukaiset hakkuukertymät (m^3ha^{-1}) kaistalehakkuussa ja jaksollisessa kasvatuksessa kolmella paikkakunnalla (Akaa, Kuopio ja Oulu).

Paikkakunta	Kaistaleen leveys	Konversiovaihe	<i>Steady state</i>
Akaa	50 m	334 (163) ^{a)} / 67 ^{b)}	168 (63) / 41 ^{c)}
	35 m	352 (179) / 75	165 (65) / 44
	20 m	363 (190) / 102	160 (63) / 53
Kuopio	50 m	317 (155) / 82	146 (49) / 50
	35 m	323 (162) / 92	145 (53) / 54
	20 m	334 (160) / 131	136 (50) / 66
Oulu	50 m	304 (144) / 92	137 (45) / 57
	35 m	307 (142) / 102	134 (47) / 62
	20 m	321 (148) / 150	128 (40) / 76
Jaksollinen kasvatusta	Nykypuusto		Tulevat kiertoajat
Akaa	285 (152) / 22		401 (197) / 85 [2] ^{d)}
Kuopio	274 (148) / 32		338 (244) / 99 [2]
Oulu	254 (129) / 30		304 (109) / 107 [2]

^{a)} paljas lukuarvo (334) ilmoittaa kokonaiskertymän, lukuarvo suluissa (163) tukkikertymän, m^3/ha ,

^{b)} konversiovaiheen kesto vuosina, ^{c)} hakkuusyklin pituus *steady state*-vaiheessa, vuosia, ^{d)} hakasuluissa harvennusten lukumäärä kiertoaikana

Taloustulokset osoittavat varsin selkeästi etelä-pohjoisgradientin. Esimerkiksi, kun Akaalla, Etelä-Suomessa 2 %:n laskentakorkokannalla jaksollinen kasvatusta tuotti paremman taloustuloksen kuin yksikään kaistalehakkuuvaihtoehto (kaistaleen leveys 20, 35 tai 50 m), niin Kuopiossa (keskinen Suomi) ja Oulussa (Pohjois-Suomi) sekä 35 m että 50 m kaistaleen leveydellä kaistalehakkuu oli jaksollista kasvatusta kannattavampi (Kuva 10b ja 10c). Lisäksi 5 %:n laskentakorkokannalla Kuopiossa ja Oulussa kaikilla kaistaleleveyksillä (20, 35 ja 50 m) kaistalehakkuu tuotti jaksollista kasvatusta paremman taloustuloksen (Kuva 10b, 10c). Sen sijaan Akaalla ainoastaan 35 kaistaleleveydellä kaistalehakkuu oli jaksollista kasvatusta kannattavampi (Kuva 10a). Kaistalehakkuun suhteellisen kannattavuuden paraneminen (vrt. jaksollisen kasvatuksen kannattavuuteen) pohjoiseen päin mentäessä johtuu pääasiassa siitä, että Pohjois-Suomessa puuston hidas kasvu Etelä-Suomeen verrattuna syö jaksollisessa kasvatuksessa uudistamisinvestoinnin kannattavuutta - onhan uudistamisinvestointi (maanmuokkaus, viljely ja taimikonhoito) käytännössä suuruudeltaan lähes identtinen Etelä- ja Pohjois-Suomessa.



Kuva 10. Jaksollisen kasvatuksen ja kaistalehakkuun (kaistaleen leveys 20, 35 tai 50 m) taloudellinen tulos, €/ha Akaalla (a), Kuopiossa (b) ja Oulussa (c). Sekä jaksollisen kasvatuksen että kaistalehakkuun paras taloudellinen tulos 2 % ja 5 % laskentakorkokannoilla esitetty lukuarvona.

Kuva 10 (a,b ja c) osoittaa, että laskentakorkokannan kasvaessa (tässä raportissa 2 %:sta 5 %:iin) kaistalehakkuu tulee jaksollista kasvatusta kannattavammaksi, riippumatta rämemännikön maantieteellisestä sijainnista. Tämän raportin tulos on linjassa kirjallisuudessa esitettyjen tulosten kanssa: laskentakorkokannan kasvaessa osittaihakkuumenetelmät - kuten jatkuvapeitteinen kasvatusta - tulevat jaksollista kasvatusta kannattavammiksi (esim. Juutinen ym. 2020b, Ahtikoski ym. 2022b).

OSIO 5: Metsänkäsittelytapojen kokonaistaloudellinen tarkastelu

Pohjavesipintojen simulointi

Kiiminkijoen valuma-alueen miniatyyrin päästö- ja vesistökuormituslaskentaa varten simuloitiin jokaiselle suotyyppille (Taulukko 1) pohjavesipinnat jaksollisen ja jatkuvapeitteisen metsänkasvatuksen tapauksilla. Pohjavesipintojen simulointiin käytettiin SUSI-suosimulaattorin (Laurén ym. 2021) hydrologista moduulia. SUSI laskee pohjavesipinnat päivän aika-askeleella käyttämällä päivittäistä säädataa. Lisäksi laskentaa varten tarvitaan tietoa puustosta, maaperästä (turvelaji ja turpeen maatuneisuus eri kerroksissa) ja kuivatuksesta (ojaväli ja ojien syvyys).

SUSI:lle annettiin lähtötietona puuston kehityksen 50 vuoden aikasarjat eri tapauksissa (esim. Kuva 2). Ojaväliksi oletettiin kaikkialla 40 m, joka on tyypillinen ojaväli suomalaisissa ojitetuissa turvemaametsissä. Ojasyvyyden oletettiin olevan 50 cm ellei ojaa syvennetty kunnostusojituksen yhteydessä. Kunnostusojituksessa ojaa syvennettiin nykysuositusten mukaiseen 80 cm:iin, minkä jälkeen ojan oletettiin madaltuvan lineaarisesti takaisin 50 cm:iin seuraavan 30 vuoden aikana. Säädatana käytettiin jokaisena simulointivuotena samaa dataa, jotta tuloksista voitaisiin tulkita mahdollisimman selvästi suotyyppien ja kasvatusmenetelmien välisiä eroja. Säädataksi valittiin Kiimingin vuoden 2009 data, jossa vuosisadanta (540 mm), kesä-elokuun sadanta (194 mm) ja kesä-elokuun lämpötila (14,5 °C) olisivat mahdollisimman lähellä jakson 1984–2013 keskimääräisiä arvoja (500 mm, 182 mm ja 14,6 °C). Turpeen parametrisoinnissa käytettiin kahta erilaista turvetta (Hökkä ym. 2021): heikommin vettä johtavaa rahkaturvetta (korvet ja Vatkg-rämeet) ja paremmin vettä johtavaa saraturvetta (muut kasvupaikat).

Päästöt ja päästövähennysten kustannukset

Kasvihuonekaasupäästöt laskettiin puuston biomassan hiilivaraston muutoksen ja maaperän kasvihuonekaasupäästöjen perusteella. Puuston päästö laskettiin puuston biomassan (sis. runko, latvus, kanto, juuret) muutoksesta (biomassa simuloinnin alussa – biomassa vuonna 50) olettamalla, että biomassasta puolet on hiiltä. Maaperän päästöt laskettiin turvekangastyypin ja pohjaveden pinnan syvyyden perusteella. Ne sisältävät turpeen hajoamisesta johtuvat CO₂-päästöt (Ojanen & Minkkinen 2019) ja N₂O-päästöt (Minkkinen et al. 2020) ja maaperän märkyydestä johtuvat CH₄-päästöt (Ojanen et al. 2010) sekä ojien CH₄-päästöt (Rissanen et al. 2023). Eri kaasujen päästöt muutettiin hiilidioksidiekvivalenteiksi. Hakkuiden ja metsänuudistamisen aiheuttaman häiriön vaikutusta maaperän kaasupäästöihin ei tutkimustiedon niukkuuden takia voitu ottaa huomioon,

lukuun ottamatta puuston haihdutuksen muutosten vaikutusta pohjaveden pintaan ja sitä kautta erityisesti CH₄-päästöihin.

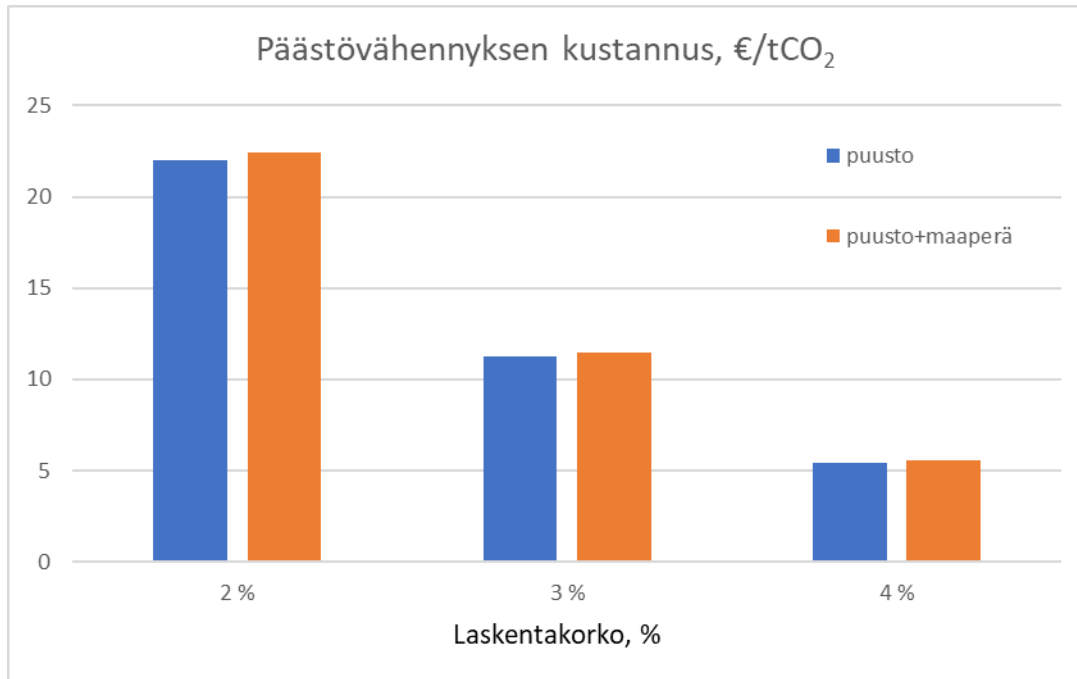
Jos Kiiminkijoen valuma-alueen miniatyyrin alueella (1 000 ha) siirryttäisiin jaksollisesta metsänkasvatuksesta kategorisesti jatkuvapeitteiseen metsänkasvatukseen, voitaisiin turvamaiden mäntyvaltaisten turvamaiden päästöjä pienentää hehtaarilla noin 82.9 tCO₂ ekv (puusto) seuraavan 50 vuoden aikana (73.5 --> -9.4). Vastaavasti päästövähennys hehtaarilla olisi hiukan pienempi, n. 81.5 tCO₂ ekv, jos myös maaperän päästöt sisällytettäisiin laskelmaan (93.5 -->12.0). Päästövähennykset johtuvat siitä, että puuston biomassassa olisi 50 vuoden päästä huomattavasti suurempi, jos jaksollisesta kasvatuksesta siirryttäisiin jatkuvapeitteiseen kasvatukseen. Maaperän päästöt sen sijaan lisääntyisivät hiukan, koska runsaampi puusto pitää suot kuivempina, mikä kasvattaa CO₂- ja N₂O-päästöjä. Taulukossa 18 esitetään suotyypeittäin (Ks. tarkennukset Taulukko 1) hehtaariohaiset päästöt erikseen puustolle ja yhteenlaskettuna maaperälle ja puustolle, tCO₂ ekv /ha.

Taulukko 18. Kiiminkijoen valuma-alueen miniatyyrin päästöt seuraavan 50 vuoden aikana suotyypeittäin jaksollisessa ja jatkuvapeitteisessä metsänkasvatuksessa, tCO₂ ekv/ha. Harmaalla väripohjalla rämeet, valkoisella korvet. Negatiivinen lukuarvo kuvastaa (hiili)nielua, positiivinen päästölähdettä.

Suotyyppi & tarkenne	puusto	maaperä+puusto
Varputurvekangas, keskiarvo	-47.0 ^{a)} -21.6	-66.0 -45.3
Varputurvekangas, yläkvartiili ²⁾	-34.7 99.0	-55.5 73.3
Puolukkaturvekangas, alakvartiili	39.8 -93.8	35.6 -98.8
Puolukkaturvekangas, keskiarvo	107.2 -21.6	110.4 -19.0
Puolukkaturvekangas, yläkvartaali	183.0 99.0	174.1 96.1
Mustikkaturvekangas, alakvartaali	46.6 -123.7	237.4 77.3
Mustikkaturvekangas, keskiarvo	123.0 1.3	313.0 199.4
Mustikkaturvekangas, yläkvartaali	172.7 121.4	354.6 333.6
Puolukkaturvekangas, keskiarvo	133.1 44.2	116.7 34.8
Mustikkaturvekangas, keskiarvo	138.3 51.6	288.6 233.0
Ruohoturvekangas, keskiarvo	98.92 -1.0	275.9 199.1

^{a)}ylärivi:jaksollinen kasvatus, alarivi:jatkuvapeitteinen kasvatus

Kun edellä esitettyjä hehtaariohittaisia päästövähennyksiä (82.9 ja 81.5 tCO₂ ekv/ha) verrataan jaksollisen ja jatkuvapeitteisen metsänkasvatuksen taloustuloksiin (Ks. Kuva 3; OSIO 1) voidaan muodostaa verranto, joka kuvaa päästövähennyksen yksikkökustannusta, €/tCO₂ ekv (Kuva 11). Kuvasta 11 nähdään, että päästövähennyksen kustannus on hieman kalliimpi, kun laskentaan sisällytetään maaperän päästöt. Ero pelkän puuston päästövähennyksen kustannukseen on kuitenkin varsin pieni (Kuva 11), koska maaperän päästöt vaikuttavat päästövähennyksiin vain vähän.



Kuva 11. Päästövähennyksen kustannus kolmella eri laskentakorkokannalla siirryttäessä jaksollisesta jatkuvapeitteiseen metsänkasvatukseen, €/tCO₂.

Vesistökuormitus

Sekä jaksollisen että jatkuvapeitteisen metsänkasvatuksen aiheuttama vesistökuormitus määritettiin 50 vuoden aikajaksolle (Taulukko 19). Vesistökuormituksen tunnuksena käytettiin ns. typpiekvivalenttia (NE, nitrogen equivalent factor), joka summaa yhteen typpi- ja fosforikuormituksen (Miettinen ym. 2020). Fosforikuorma on yhteismitallistettu typpikuorman kanssa rehevöitymistä aiheuttavien vesistövaikutusten osalta. Yksi fosforikuormayksikkö vastaa tässä 7,2 typpikuormayksikköä, joka vastaa typen ja fosforin suhdetta vesiplanktonissa (Wetzel 2001) Typpiekvivalentti lasketaan täten seuraavasti:

$$NE_i = TotN_i + 7,2TotP_i,$$

jossa NE on typpiekvivalentti (kg/ha), TotN on kokonaistyppikuorma (kg/ha) ja TotP on kokonaisfosforikuorma (kg/ha) aikayksikössä i. Kuormituslaskenta perustuu Avoin ry:n julkaiseman SILVA-metsälaskurin (<https://www.jatkuvakasvatus.fi/metsalaskuri>) laadinnassa Luonnonvarakeskuksessa tehtyyn mallinnus- ja laskentatyöhön (Nieminen ym. 2022a ja julkaisematon). Nämä puolestaan perustuvat 1) SUSI-mallinnukseen kasvavan puuston määrästä riippuvan pohjavedenpinnan ja typpi- ja fosforikuormituksen välisestä vuorosuhteesta, jota

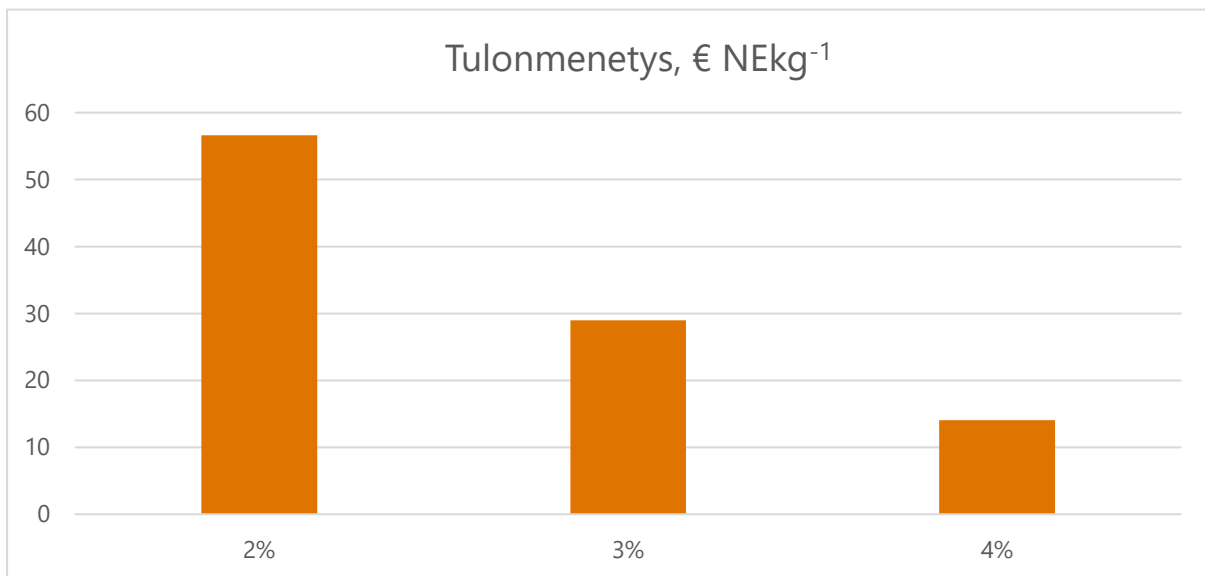
hyödynnettiin ns. ojituslisän laskennassa (Nieminen ym. 2020), 2) metsätalouden ominaiskuormituslukuihin (Finér ym. 2010) sekä 2) uuteen tietoon turvemaiden metsänkäsitteilyjen aiheuttamasta vesistökuormituksesta, jossa typpi- ja fosforikuormitusten määrä riippuu poistetusta puumäärästä (ks. Nieminen ym. 2022b). Metsänkäsitteilyn aiheuttama kuormitus lisätään ojituksen aiheuttamaan kuormanlisään, jolloin saadaan metsätalouden aiheuttama kokonaiskuormitus kullakin ajanhetkellä. Metsänkäsitteilyn aiheuttaman kuormitusvaikutuksen oletettiin kestävän 6-10 vuotta (Finér ym. 2010). Kuormitusta aiheuttavia simuloituja metsätaloustoimenpiteitä olivat hakkuut ja kunnostusojitukset. Kuormituslaskennat tehtiin edellä kuvatuille Motilla simuloituille lähtöpuustoille, joiden perusteella laskettiin puolestaan keskimääräiset simulointijakson aikaiset NE-kokonaiskuormitukset kullekin turvekangastyypille ja kasvatusohjelmalle.

NE-lukuarvoista nähdään, että jaksollinen metsänkasvatus kuormittaa jatkuvapeitteistä metsänkasvatusta enemmän vesistöjä – toisin sanoen, NE-lukuarvot ovat korkeammat (Taulukko 19). Koko Kiiminkijoen miniatyyrin alueella jaksollisessa metsänkasvatuksessa oli vesistökuormitus yhteensä 31 946 NE kg enemmän kuin jatkuvapeitteisessä metsänkasvatuksessa 50 vuoden aikajaksolla.

Taulukko 19. Jaksollisen ja jatkuvapeitteisen metsänkasvatuksen mukainen vesistökuormitus 50 vuoden aikajaksolla, NE kg/ha. (NE= nitrogen equivalent factor). Harmaalla väripohjalla rämeet, valkoisella korvet.

Suotyyppi & tarkenne	jaksollinen	jatkuvapeitteinen
Varputurvekangas, keskiarvo	84.5	76.7
Varputurvekangas, yläkvartaali ²⁾	83.5	69.6
Puolukkaturvekangas, alakvartaali	109.0	94.3
Puolukkaturvekangas, keskiarvo	166.2	121.6
Puolukkaturvekangas, yläkvartaali	127.9	105.2
Mustikkaturvekangas, alakvartaali	170.6	116.5
Mustikkaturvekangas, keskiarvo	173.5	119.7
Mustikkaturvekangas, yläkvartaali	142.8	140.1
Puolukkaturvekangas, keskiarvo	140.1	113.7
Mustikkaturvekangas, keskiarvo	144.5	124.6
Ruohoturvekangas, keskiarvo	163.9	123.4

Taulukossa 19 esitettyjen NE-lukuarvojen ja aiemmin esitettyjen taloustulosten (Ks. Kuva 3; OSIO 1) perusteella voidaan muodostaa verranto, joka kuvaa nettotulojen menetystä yhtä NE kg vähemmän kuormitusta hehtaarilla kohden, kun metsänomistaja käsittelee kaikkia suotyyppisiä jatkuvapeitteisen metsänkasvatuksen mukaisesti, toisin sanoen hän siirtyy jaksollisesta metsänkasvatuksesta jatkuvapeitteiseen. Kuvassa 12 on esitetty tulonmenetykset yhtä NE kg vähemmän kuormitusta hehtaarilla – toisin sanoen, paljonko maksaa vesistökuormituksen pienentäminen yhtä NE kg/ha kohden. Nettotulojen menetys vaihteli noin 14 eurosta noin 57 euroon/NE kg, riippuen laskentakorkokannasta (Kuva 12). Toisin sanoen, siirryttäessä jaksollisesta metsänkasvatuksesta jatkuvapeitteiseen voidaan pienentää metsätalouden vesistökuormitusta niin, että yhden NE kg pienempi vesistökuormitus maksaa tulonmenetyksinä metsänomistajalle 14–57 € (Kuva 12).



Kuva 12. Tulonmenetys yhtä NE kg vähenemää kohden, €/NE kg.

Johtopäätökset

Tässä raportissa tarkasteltiin viittä toisistaan erillistä kokonaisuutta, joista kullekin laadittiin talouslaskelmat. Tehtyjen taloustarkasteluiden pohjalta voidaan nyt aikaisempaa seikkaperäisemmällä tietopohjalla vastata turvemaiden metsänkasvatuksen talouskysymyksiin. Seuraavassa käydään läpi kokonaisuuksittain (1-5) päätulokset ja niistä tehtävät johtopäätökset.

Tässä raportissa (OSIO 1) osoitetaan ettei jokin tietty metsänkäsittelytapa (jaksollinen tai jatkuvapeitteinen) automaattisesti takaa parempaa taloustulosta metsänomistajalle määntyvaltaisissa turvemaiden metsiköissä vaan tulos riippuu monesta tekijästä, etenkin korkokannasta sekä metsikön kasvupaikasta ja alkutilasta (Ahtikoski ym. 2022b, c). Tulosten mukaan Kiiminkijoen valuma-alueen määntyvaltaisia turvemaan metsiköitä näyttäisi olevan perusteltua käsitellä enimmäkseen jaksollisen

metsänkasvatuksen mukaisesti. Esimerkiksi, 3%:n laskentakorkokannalla metsänomistajan nettotulojen nykyarvo oli keskimäärin 925 €/ha enemmän (4%: +450 €/ha) kuin jos turvemaan mäntyvaltaisia metsiä olisi hoidettu jatkuvapeitteisen metsänkasvatuksen mukaisesti. Lisäksi, jaksollisen metsänkasvatuksen mukainen kokonaistuotos (m^3) oli seuraavan 50 vuoden aikana noin 20%-yksikköä suurempi kuin jatkuvapeitteisen vastaava. Tuotostulos vastaa viimeaikaisia kasvu- ja tuotostutkimusten tuloksia (Hynynen ym. 2019, Bianchi ym. 2020). Kivennäismaiden vastaavissa talousvertailuissa jatkuvapeitteinen metsänkasvatus on yleensä ollut kannattavampi metsänkäsittelytapa kuin jaksollinen kasvatus 3 %:n laskentakorkokannalla (esim. Tahvonen 2016, Parkatti ym. 2019, Parkatti ja Tahvonen 2021). Syy eroaviin tuloksiin voi olla, että tässä raportissa talousvertailu aloitettiin olemassa olevasta turvemaan puustosta. Kivennäismaiden männiköissä paras taloudellinen tulos jatkuvapeitteisessä kasvatuksessa saavutetaan aikaisempien tutkimusten mukaan erittäin voimaperäisillä hakkuilla (esim. Parkatti ym. 2019). Tässä työssä rajoitettiin hakkuita siten, että pohjapinta-ala hakkuun jälkeen oli vähintään $10 m^2/ha$ (puuston haihdunta riittävää, jotta vältetään kunnostusojituksesta). Viimeaikaisessa turvemaan talousvertailussa jatkuvapeittein kasvatus oli kannattavampi kuin jaksollinen turvemaiden varttuneessa korpikuusikossa, jossa oli alkutilanteessa eri-ikäisiä ja erikokoisia puita (Juutinen ym. 2021). Kuusi sietää varjoisuutta paremmin kuin mänty, joten tässä mielessä kuusikot soveltuvat männiköitä paremmin jatkuvapeitteiseen kasvatukseen. Erot tuloksissa johtuvat myös osittain siitä, että aikaisemmissa tutkimuksissa jaksollisen ja jatkuvapeitteisen kasvatuksen erot puuntuotoksessa ovat olleet yleensä pienempiä kuin tässä tutkimuksessa. Tässä tutkimuksessa jatkuvapeitteisen kasvatuksen kasvumallit perustuivat uusimpaan mitattuun tietoon jatkuvan kasvatuksen koealoilta. On kuitenkin korostettava, että tässä tutkimuksessa jaksollista kasvatusta simuloitiin ainoastaan 50 vuotta, mikä voi aiheuttaa epätarkkuutta tuloksiin. Aikaisemmissa tutkimuksissa on havaittu, että alkutilan konvergointi tasapainotilaan (*steady state*) voi jatkuvapeitteisessä kasvatuksessa viedä yli 50 vuotta (Rämö ja Tahvonen 2017).

Vaikka turvemaiden lannoituksella pyritäänkin ensisijaisesti korjaamaan kasvupaikan ravinnetalouden epätasapainosta johtuvat puuston kasvuhäiriöt ja puiden hidastunut kasvu, osoitettiin tässä raportissa (OSIO 2) turvemaiden tuhkalannoituksen olevan varsin kannattavaa taloudellisesti. Laaja-alainen ja pitkään seurattu tuhkalannoitusten koesarja (yhteensä 17 koetta) keskittyi ensisijaisesti nuoriin kasvatus- tai riukuvaiheen männiköiden tuhkalannoitukseen (mittausten alkuhetki) pääosin Pohjois-Suomessa, osan kokeista sijaitessa Keski-Suomessa. Tässä raportissa esitetyt tuhkalannoitusten kasvureaktiot ovat pisimpään seurattujen kokeiden tuloksia Suomessa – seurantajakson ollessa pisimmillään yli 80 vuotta. Mitattujen kasvu- ja tuotostulosten perusteella tyyppirikkaiden rämemänniköiden tuhkalannoitus paransi vuotuista keskikasvua, verrattuna lannoittamattomiin koealoihin keskimäärin $3,09 m^3 ha^{-1}$ (seurantajakson keskipituus 33 vuotta). Vastaavasti, karuilla niukkatyyppisillä kasvupaikoilla tuhkalannoituksen tuottama lisäkasvu oli $2,9 m^3 ha^{-1}$ vuodessa (seurantajakson keskipituus 44 vuotta). Lähtökohtaisesti tuhkalannoituksen aikaansaama lisäkasvu on merkittävä. Onkin perustelua kysyä: kuinka taloudellisesti kannattavaa turvemaiden metsiköiden tuhkalannoitus on? Tämän raportin tulosten perusteella tuhkalannoitus on onnistuessaan (kohdevalinta) liiketaloudellisesti varsin perusteltu investointi: tuhkalannoitus tuottaa vuotuisesti keskimäärin yli 10% sijoitetulle pääomalle (lannoituskustannus, joka tässä $387,8 € ha^{-1}$). Lisäksi, herkkyyshanalyysi osoitti, että tuhkalannoituksen kustannus voi nousta reippaastikin, ja se on silti liiketaloudellisesti perusteltua. Esimerkiksi, parhaimmilla kokeilla tuhkalannoituksen kustannus voi

nousta yli 2 000 € ha⁻¹, tuhkalannoituksen ollessa vielä perusteltu investointi 5%:n laskentakorkokannalla (Taulukko 6).

Viljavilla turvemailla avohakkuualan päätöksentekotilanteessa eli hetkellä, jossa valitaan uuden puusukupolven perustamisen menetelmä, osoittautui uudistamisalan raivaus, mätästys ja kuusen istutus kannattavimmaksi vaihtoehdoksi kahdella reunaehdolla (OSIO 3). Ensinnäkin viljelyn pitää onnistua niin että lähes kaikki istutustaimet vakiintuvat taimikoksi ja varttuvat ilman kasvua haittaavia tuhoja kuten hallavioituksia. Toinen reunaehto viljelyvaihtoehdon paremmuudelle on vaihtoehtoisen kuusen luontaisen taimettumisen viivästyminen lähelle peratun koivutaimikon kehityksen ensiharvennusajankohtaa. Mikäli kuusi syntyy luontaisesti yhdessä koivun taimettumisen kanssa siten että noin 15 vuoden kuluttua avohakkuusta tehtävässä koivutaimikon harventamisessa koivua tarvitaan enää vain verhopuustona, mahdollistaa luontainen kuusialikasvos vähintään 1500 rungon kasvatustiheydellä yhtä kannattavan tai jopa kannattavamman kasvatuslinjan kuuselle kuin istuttaen perustettava onnistunut kuusen taimikko. Toisin sanoen kohteilla, joilla kuusen luontainen uudistuminen todennäköisesti onnistuu, on taloudellisesti perusteltua hyödyntää kuusialikasvosta sen sijaan että nuori koivikko päätehakattaisiin ja kohde istutettaisiin (ml. maanmuokkaus ja taimikonhoito) onnistuneesti (ilman taimikkotuhoja) kuuselle.

Koska lähtökohtana ja tavoitteena alikasvosten hyödyntämiselle ei aina ole avoalan uudistamisen tilanne vaan jo olemassa oleva koivikko mahdollisine alikasvoksineen, niin silloin on päätettävä kannattaako yhä kasvattaa koivikkoa vai uudistaa saman tien viljellen kuusikoksi. Jatkokasvatusvaihtoehdossa on mietittävä, onko alikasvokseksi syntynyt kasvatuskelpoista alikasvoskuusikkoa ja onko ehkä mielekästä viljellä kuusi koivun alle. Tämän selvityksen mukaan taloudellisin vaihtoehto on hyödyntää jo olemassa olevaa luontaista alikasvosta ainakin siinä tapauksessa, että se on saavuttanut noin metrin keskipituuden ja sen tiheys on koivun harvennuksen ja päätehakkuun jälkeen 1500 kuusta hehtaarilla. Alikasvoksen hyödyntäminen kyseisessä tilanteessa on huomattavasti kannattavampaa kuin heti tehtävä nuoren koivikon päätehakkuu ja kuusen uudistaminen avomaalle raivauksineen, mätästyksineen, viljelyineen ja taimikon hoitoineen. Näin siinäkin tapauksessa, että kuusen viljely onnistuu ilman minkäänlaisia taimikkotuhoja. Mikäli koivikon ensiharvennushetkellä ei ole kasvatuskelpoista kuusialikasvosta voidaan se viljellä harvennetun koivikon alle. Tämä on taloudellisesti mielekäs ratkaisu siinä tilanteessa, että heti avoimelle alalle tehtävässä kuusen viljelyssä voi olettaa olevan merkittävä hallatuhojen riski. Jos istutetuista kuusen taimista kolmannes tuhoutuu, niiden tilalla kasvatetaan luontaisesti syntyneitä männyn taimia ja loput kehityskelpoiset kuuset ovat terveitä noin 20–30 % lyhyempiä niin siihen verrattuna kuusen alikasvosviljelyn kannattavuus jo lähestyy heti tehtävän avoalaviljelyn kannattavuutta. Näin ollen edellä kuvattuja voimakkaammat hallatuhot muuttavat alikasvosviljelyn heti tehtävää avoalaviljelyä kannattavammaksi

Jos koivikkoa kasvatetaan ilman alikasvosta ja pyritään hyödyntämään koivun kuitupuukasvatuksen potentiaalinen kokonaistuotos harvennuksella ja 10 tai 20 vuoden kasvatuksella ennen päätehakkuuta, siirtyy seuraava viljeltävä kuusisukupolvi sen verran kauemmaksi tulevaisuuteen, että onnistuessaankin se on enää korkeintaan yhtä kannattava vaihtoehto kuin koivun harvennuksessa tehtävä viljely alikasvokseksi. Mikäli kuusta ei luontaisesti ole saatu koivun ensiharvennukseen mennessä ja koivua halutaan vielä kasvattaa 10 vuotta harvennuksen jälkeen, voidaan kuusi

vaihtoehtoisesti viljellä alikasvokseksi sen sijaan että se viljellään avoalalle vasta koivun päätehakkuun jälkeen.

Vaihtoehtoisista hakkuumenetelmistä tarkasteluun tässä raportissa valittiin rämemänniköiden kaistalehakkuu (OSIO 4). Kaistalehakkuussa metsänuudistaminen perustuu 20-50 m kaistaleisiin, jotka uudistuvat luontaisesti ko. kaistaleella avohakkuun jälkeen. Kaistalehakkuussa siis jokaisella ajanhetkellä valitulla metsäalueella on sekä paljaita (avohakattuja) että puustoisia kaistaleita. Ajan kuluessa avoin kaistale ja puustoinen kaistale ”vaihtavat paikkaa” – toisin sanoen, kun avoin kaistale on taimettunut ja puusto edelleen varttunut, voidaan puustoinen kaistale puolestaan hakata (joko ensin harventamalla tai suoraan päätehakkaamalla). Taloustuloksen kannalta oleellista on, kompensoituuko jaksollista metsänkasvatusta pienemmät hakkuukertymät sillä että maanmuokkauksesta, viljelystä ja kunnostusojituksesta ei synny kustannuksia kaistalehakkuussa? Kaistalehakkuun kannattavuutta tarkasteltiin tässä raportissa kolmella eri paikkakunnalla, jotka edustavat eri maantieteellistä aluetta: Etelä-, Keski-Suomi sekä Pohjois-Pohjanmaa. Tulokset osoittivat, että pohjoiseen päin mentäessä kaistalehakkuun suhteellinen kannattavuus (verrattuna jaksolliseen kasvatukseen) paranee. Tämä johtuu pääosin siitä, että pohjoiseen päin mentäessä puuston kasvu hidastuu (Etelä-Suomeen verrattuna), mikä syö uudistamisinvestoinnin kannattavuutta jaksollisessa kasvatuksessa. Kun uudistamisinvestointi (maanmuokkaus+viljely) on suuruudeltaan käytännössä sama Etelä- ja Pohjois-Suomessa, niin tällöin kaistalehakkuun suhteellinen kannattavuus paranee Etelä-Pohjois-gradientilla. Lisäksi laskentakorkokannan kasvaessa kaistalehakkuu tuli jaksollista kasvatusta kannattavammaksi, riippumatta rämemännikön maantieteellisestä sijainnista. Esimerkiksi, kun Etelä-Suomessa (Akaa) vielä 2%:n laskentakorkokannalla jaksollinen metsänkasvatus oli taloudellisesti parempi kuin kaistalehakkuu (riippumatta kaistaleen leveydestä: 20 m, 35 m tai 50 m), niin 5%:n laskentakorkokannalla kaistalehakkuun (35 m kaistaleleveys) oli jo parempi. Vastaavasti, Keski-Suomessa (Kuopio) 2%:n laskentakorkokannalla jaksollinen kasvatus oli taloudellisesti parempi kuin kaistalehakkuu 20 m kaistaleleveydellä, niin 5%:n laskentakorkokannalla kaistalehakkuu (20 m kaistaleleveydellä) oli jo merkittävästi taloudellisesti kannattavampi kuin jaksollinen kasvatus (Kuva 5).

OSIO 5:ssä tarkasteltiin jaksollisen ja jatkuvapeitteisen metsänkasvatuksen mukaisia kasvihuonekaasupäästöjä sekä vesistökuormitusta. Teknisesti laskenta toteutettiin monivaiheisesti (Motti-simuloinnit --> SUSI-simuloinnit --> päästö- ja vesistökuormituslaskelmat). Jos nykyisestä, jaksollisesta metsänkasvatuksesta siirryttäisiin jatkuvapeitteiseen metsänkasvatukseen, pienentyisivät sekä kaasupäästöt että vesistökuormitus. Metsätalouden päästövähennys seuraavan 50 vuoden aikana olisi n. 81.5 tCO₂ha⁻¹. Vastaavasti vesistökuormitus pienenesi noin 32 NE kg ha⁻¹ seuraavan 50 vuoden aikana.

Kun edellä kuvattua päästövähennystä verrataan jaksollisen ja jatkuvapeitteisen metsänkasvatuksen kannattavuuseroihin (OSIO 1) voidaan todeta, että päästövähennyksen kustannus sijoittuu noin 5-23 € tCO₂⁻¹ välille, riippuen laskentakorkokannasta siten, että korkein kustannus muodostui matalimmalla laskentakorkokannalla, 2% ja pienin kustannus suurimmalla laskentakorkokannalla 4%. Päästövähennyksen kustannus vaihteli hyvin vähän (< 2%-yksikköä) sen mukaan, sisällytettiinkö laskelmiin maaperän kaasupäästöt ja elävä biomassa vai pelkästään elävä biomassa, koska lähes koko

jaksollisen ja jatkuvapeitteisen kasvatuksen ero päästöissä johtui tässä tutkimuksessa eroista puuston hiilinielussa.

Vesistökuormituksen vähentämisen kustannus puolestaan vaihteli noin 14-57 € NE kg⁻¹ välillä, riippuen laskentakorkokannasta (2%-4%). Kun edellä kuvattuja kustannuslukuarvoja verrataan kirjallisuudessa esitettyihin, voidaan todeta, että kasvihuonekaasu-päästövähennyksen kustannus tässä raportissa on varsin maltillinen (vrt. esim. Ahtikoski ym. 2022c). Sen sijaan vesistökuormituksen vähentämisen kustannus oli tässä merkittävästi suurempi kuin kirjallisuudessa kivennäismailta on tähän asti raportoitu (esim. Gren 2001).

Voidaankin sanoa, että siirtyminen turvemaiden mäntyvaltaisissa metsissä jaksollisesta metsänkasvatuksesta jatkuvapeitteiseen metsänkasvatukseen näyttäisi tämän raportin tulosten mukaan olevan varsin kustannustehokas metsätalouden lähivuosisikymmenien kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisen keino, mutta vesistökuormituksen osalta siirtyminen olisi suhteellisen kallista. Näin ollen, tarvitaan uusia ajatusmalleja siitä, miten ojitettujen soiden mäntyvaltaisten metsien vesistökuormitusta voitaisiin kustannustehokkaasti pienentää. Eräs tällainen keino voisi olla soveltaa samanaikaisesti sekä jaksollista että jatkuvapeitteistä metsänkasvatusta maisematasolla (Ks. Eyvindson ym. 2023).

Yhteenvetona voidaan todeta, että turvemaiden metsänhoito on muuttumassa: ulkoisvaikutusten (esim. luontokato, hiilinielut, vesistökuormitus) ottaminen huomioon metsäsuunnittelussa tulee painottumaan entistä enemmän, sitä jopa vaaditaan eri toimenpiteiden toteuttamisessa. Tämä edellyttää tässä esitettyjä, lähtökohtaisesti metsikkötason taloustarkasteluita laajempialaisia tarkasteluita, joissa otetaan huomioon myös metsätalouden aikaansaamat vaikutukset kansantaloudelle/yhteiskunnalle. Tämä raportti edustaa ensimmäistä kokonaisvaltaista tarkastelua turvemaiden metsänhoidossa -kun tarkasteluun sisältyy jaksollinen ja jatkuvapeitteinen metsänkasvatus ja kun laskelmissa otetaan huomioon myös metsätalouden ulkoisvaikutuksia. Tästä on hyvä jatkaa ja syventää tarkasteluita!

Kirjallisuus

Ahtikoski, A. and Hökkä, H. 2019. Intensive forest management – does it financially pay off on drained peatlands? Can. J. Forest Res. **49**:1101-111. doi: 10.1139/cjfr-2019-0007

Ahtikoski, A., Hökkä, H. and Siipilehto, J. 2022a. Strip cutting management in Scots pine stands on peatlands – a financial comparison to rotation forestry. Scandinavian journal of forest research **37**(2): 119-129. DOI:10.1080/02827581.2022.2055135

Ahtikoski, A., Repola, J. ja Viitala, E.-J. 2022b. Talous. Julkaisussa: Routa, J. ja Huuskonen, S. (toim.). 2022. Jatkuvapeitteinen metsänkasvatus: Synteesiraportti. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus **40**/2022. Luonnonvarakeskus. Helsinki. s. 97-106.

Ahtikoski, A, Rämö, J., Juutinen, A., Shanin, V. and Mäkipää, R. 2022c. Continuous cover forestry (CCF) and cost of carbon abatement on mineral soils and peatlands. *Frontiers in Environmental Science, Environmental Economics and Management*. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.837878>

Äijälä O, Koistinen A, Sved J, Vanhatalo K, Väisänen P (2014) Metsänhoidon suositukset [Silvicultural recommendations]. The Forestry Development Centre Tapio. Helsinki, Finland. (In Finnish).

Bianchi, S., Huuskonen, S., Siipilehto, J. and Hynynen, J. 2020. Differences in tree growth of Norway spruce under rotation forestry and continuous cover forestry. *Forest Ecology and Management* 458 (2020) 117689. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117689>

Bose A K, Harvesy BD, Brais S, Beaudet M, Leduc A. 2014. Constraints to partial cutting in the boreal forest of Canada in the context of natural disturbance-based management: a review. *Forestry: Int J Forest Res.* 87(1):11–28. <http://doi.org/10.1093/forestry/cpt047>

Eyvindson, K., Launiainen, S., Leppä, K., Salmivaara, A. and Lehtonen, A. 2023. Trade-offs between greenhouse gas mitigation and economic objectives with drained peatlands in Finnish landscapes. *Can. J. For. Res.* 00: 1–11 (2023) | [dx.doi.org/10.1139/cjfr-2022-0101](https://doi.org/10.1139/cjfr-2022-0101)

Finér, L., Mattsson, T., Joensuu, S., Koivusalo, H., Laurén, A., Makkonen, T., Nieminen, M., Tattari, S., Ahti, E., Kortelainen, P., Koskiahho, J., Leinonen, A., Nevalainen, R., Piirainen, S., Saarelainen, J., Sarkkola S. & Vuollekoski, M. 2010. Metsäisten valuma-alueiden vesistökuormituksen laskenta. *Suomen ympäristö 10/2010*. 33 s.

Gren, I.M. (2001) International versus national actions against nitrogen pollution of the Baltic Sea. *Environmental Resources Economics*, 20(1), 41–59.

Hurskainen, L. 2019. Alikasvoskuusien vaurioituminen ylemmän mäntyjakson hakkuissa. Tampereen ammattikorkeakoulu. Metsätalous. Opinnäytetyö. 60 sivua.

Hynynen J, Salminen H, Ahtikoski A, Huuskonen S, Ojansuu R, Siipilehto J, Lehtonen, M, Eerikäinen K. 2015. Long-term impacts of forest management on biomass supply and forest resource development: a scenario analysis for Finland. *Eur. J. For. Res.* 134: 415-431. [doi 10.1007/s10342-014-0860-0](https://doi.org/10.1007/s10342-014-0860-0)

Hynynen, J., Eerikäinen, K., Mäkinen, H. and Valkonen, S. 2019. Growth response to cuttings in Norway spruce stands under even-aged and uneven-aged management. *Forest Ecology and Management* 437, 314–323.

Hytönen, J. ja Hökkä, H. 2020. Comparison of granulated and loose ash in fertilisation of Scots pine on peatland. *Silva Fennica* vol. 54 no. 2 article id 10259. <https://doi.org/10.14214/sf.10259>

Hökkä, H. Repola, J. Moilanen, M. 2012. Modelling volume growth response of young Scots pine (*Pinus sylvestris*) stands to N, P, and K fertilization in drained peatland sites in Finland. *Can. J. For. Res.* 42: 1359–1370

Hökkä H., Laurén A., Stenberg L., Launiainen S., Leppä K., Nieminen M. (2021). Defining guidelines for ditch depth in drained Scots pine dominated peatland forests. *Silva Fennica* vol. 55 no. 3 article id 10494. 20 p. <https://doi.org/10.14214/sf.10494>

Juutinen, A., Ahtikoski, A., Lehtonen, M., Mäkipää, R., and Ollikainen, M. 2018. The impact of a short-term carbon payment scheme on forest management. *Forest Policy Econ.* **90** (2018): 115-127. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2018.02.005>

Juutinen, A.; Tolvanen, A.; Saarimaa, M.; Ojanen, P.; Sarkkola, S.; Ahtikoski, A.; Haikarainen, S.; Karhu, J.; Haara, A.; Nieminen, M.; et al. 2020a. Cost-effective land-use options of drained peatlands— integrated biophysical-economic modeling approach. *Ecol. Econ.* 2020, *175*, 106704.

Juutinen, A., Ahtikoski, A. ja Rämö, J. 2020b. Puuntuotannon kannattavuuteen vaikuttavat tekijät jatkuvapeitteisessä metsänkasvatuksessa. *Metsätieteen Aikakauskirja* 2020-10313. Katsaus. <https://doi.org/10.14214/ma.10313>.

Juutinen, A., Shanin, V., Ahtikoski, A., Rämö, J., Mäkipää, R., Laiho, R., Sarkkola, S., Lauren, A., Penttilä, T., Hökkä, H. & Saarinen, M. 2021. Profitability of continuous cover forestry in Norway spruce-dominated peatland forest and the role of water table. *Canadian Journal of Forest Research* 51(6): 859–870.

Laurén, A.; Palviainen, M.; Launiainen, S.; Leppä, K.; Stenberg, L.; Urzainki, I.; Nieminen, M.; Laiho, R.; Hökkä, H. Drainage and Stand Growth Response in Peatland Forests—Description, Testing, and Application of Mechanistic Peatland Simulator SUSI. *Forests* 2021, *12*, 293. <https://doi.org/10.3390/f12030293>

Luken Tilastotietokanta, Metsänhoito- ja metsänparannustyöt 2022. URL-osoite: http://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE__04%20Metsa__02%20Rakenne%20ja%20tuotanto__12%20Metsanhoito-%20ja%20metsanparannustyot/05_Metsanhoito-ja-metsanparannustyot.px/?rxid=dc711a9e-de6d-454b-82c2-74ff79a3a5e0

Luken Tilastotietokanta, Teollisuuspuun kauppa 2022. https://statdb.luke.fi/PxWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE__04%20Metsa__04%20Talous__02%20Teollisuuspuun%20kauppa__04%20Vuositilastot/01b_Kantohinnat_v.px/?rxid=dc711a9e-de6d-454b-82c2-74ff79a3a5e0

Lukkala, O. J. 1946. Korpimetsien luontainen uudistaminen. *Metsätieteellisen tutkimuslaitoksen julkaisuja* 34.

Miettinen, J., Ollikainen, M., Aroviita, J., Haikarainen, S., Nieminen, M., Turunen, J. and Valsta, L. 2020. Boreal peatland forests: ditch network maintenance effort and water protection in a forest rotation framework. *Can. J. For. Res.* 50: 1025–1038 (2020) [dx.doi.org/10.1139/cjfr-2019-0339](https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0339)

Minkkinen, K., Ojanen, P., Koskinen, M. and Penttilä, T. 2020. Nitrous oxide emissions of undrained, forestry-drained, and rewetted boreal peatlands. *Forest Ecology and Management* 478 (2020) 118494. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.119494>

Moilanen, M., Hökkä, H. 2009. PK-lannoituksella aikaansaadun kasvureaktion suuruus riippuu ojitusaluemännikön ravinnetilasta. The growth response of Scots pine to PK fertilization depends on the nutrient status of the stand on drained peatlands. *Suo* 60(3–4): 111–119 — Research notes.

Nieminen M., Piirainen S., Moilanen M. (2005). Release of mineral nutrients and heavy metals from wood and peat ash fertilizers: field studies in Finnish forest soils. *Scandinavian Journal of Forest Research* 20(2): 146–153. <https://doi.org/10.1080/02827580510008293>.

Nieminen, M., Hasselquist, E.M., Mosquera, V., Ukonmaanaho, L., Sallantausta, T. and Sarkkola, S. 2022. Post-drainage stand growth and peat mineralization impair water quality from forested peatlands. *Journal of Environmental Quality*. doi:10.1002/jeq2.20412

Nieminen, M., Sarkkola, S., Haahti, K., Sallantausta, T., Koskinen, M. and Ojanen, P. 2020. Metsäojitettujen soiden tyyppi- ja fosforikuormitus Suomessa. *Suo – Mires and Peat* 71 1:1-13.

Nieminen, M., Pukkala, T., Sarkkola, S., Stenberg, L., Valkama, P., valkeapää, A., Valta, O., Vihonen, A. 2022 Silvan metsälaskurin laskennan kuvaus. Ladattavissa: [6331497b15929afc43a75b76_Silvan_metsälaskurin_LASKENNAN_KUVAUS_210922_VALMIS.pdf](https://doi.org/10.1002/jeq2.20412) (webflow.com)

Niemistö, P. 2013. Effect of growing density on biomass and stem volume growth of downy birch stands on peatland in Western and Northern Finland. *Silva Fennica* 47 4: 24 p.

Niemistö, P. & Poutiainen, E. 2004. Hieskoivikon käsittelyn vaikutus kuusialikasvoksen kehitykseen Keski- ja Pohjois-Pohjanmaan viljavilla ojitusalueilla. *Metsätieteen aikakauskirja* 4: 441–459.

Niemistö, P., Korpunen, H., Laurén, A., Salomäki, M. & Uusitalo, J. 2012. Impact and productivity of harvesting while retaining young understorey spruces in final cutting of downy birch. *Silva Fennica* 46 1: 81–97.

Niemistö, P., & Muhonen, T. 2021. Julkaisematon männiköiden harvennusta koskeva aikaututkimus.

Ojanen, P., Minkkinen, K., Alm, J. and Penttilä, T. 2010. Soil-atmosphere CO₂, CH₄ and N₂O fluxes in boreal forestry-drained peatlands. *Forest Ecology and Management* 260 (2010) 411–421. doi:10.1016/j.foreco.2010.04.036.

Ojanen, P. and Minkkinen, K. 2019. The dependence of net soil CO₂ emission on water table depth in boreal peatlands drained for forestry. *Mires and Peat Vol* (24 (2019), 1-8.

Parkatti, V.-P., Assmuth, A., Rämö, J. & Tahvonen, O. 2019. Economics of boreal conifer species in continuous cover and rotation forestry. *Forest Policy and Economics* 100, 55–67.

Parkatti, V.-P. & Tahvonen, O. 2021. Economics of multifunctional forestry in the Sa' mi people homeland region. *Journal of Environmental Economics and Management* 110, 102542.

Penman, J., Gytarsky, M., Hiraishi, T., Krug, T., Kruger, D., Pipatti, R., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K., and Wagner, F. (*Editors*). 2003. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme. Kanagawa Japan: Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC. Available from http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf_contents.htm [accessed 18 January 2023].

Rautio, P. Hökkä, H. 2019. Teollisuuden ja yhteiskunnan sivuvirrat metsä[1]lannoitteina – mahdollisuudet ja haasteet. Julkaisussa: Rautio, P., Uusitalo, M., Sarala, P. (toim.). Kiertotalouden mahdollisuudet Lapissa. *Acta Lapponica Fenniae* 27. 17-27.

Rissanen, A.J., Ojanen, P., Stenberg, L., Larmola, T., Anttila, J., Tuominen, S., Minkkinen, K., Koskinen, M. ja Mäkipää, R. Vegetation impacts ditch methane emissions from boreal forestry-drained peatlands – Moss-free ditches have an order-of-magnitude higher emissions than moss-covered ditches. *Frontiers, Environ. Sci. Sec. Biogeochemical Dynamics*. Vol 11 (2023). <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1121969>.

Rämö, J. and Tahvonen, O. 2017. Optimizing the harvest timing in continuous cover forestry. *Environ Resource Econ* **67**:853-868. DOI 10.1107/s10640-016-0008-4.

Salminen H, Lehtonen M, Hynynen J. 2005. Reusing legacy FORTRAN in the MOTTI growth and yield simulator. *Comput. Electron. Agric.* 49:103–113. doi: 10.1016/j.compag.2005.02.005

Siipilehto J. 2006. Height distributions of Scots pine sapling stands affected by retained tree and edge stand competition. *Silva Fennica* 40(3): 473–486. <https://doi.org/10.14214/sf.331>

Tahvonen, O. 2016. Economics of rotation and thinning revised: the optimality of clearcuts versus continuous cover forestry. *Forest Policy and Economics* 62, 88–94.

Tilastokeskus 2023. Elinkustannusindeksi, aikasarjan 2012–2021 vertailuindeksin lukuarvo 2017, joka vastaa kalenterivuotta 2021.

https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_khi/statfin_khi_pxt_11xm.px/table/tableViewLayout1/

Wetzel, R.G. 2001. Limnology: Lake and River Ecosystems. Academic Press Elsevier, San Diego.

Liite 1.

Simuloinneissa ja paljaan maan arvon laskennoissa käytetyt kantohinnat ja metsänhoidon kustannukset. Sekä kantohinnat että metsähoidon kustannukset laskettuina koko maata koskevista hintatilastoista vuosien 2011-2020 reaalihintaisina keskiarvoina (elinkustannusindeksillä korjattuina)

Kantohinnat

	MäT	KuT	KoT	MäK	KuK	KoK
Uudistushakkuu	59,18	60,30	45,80	18,98	20,42	18,44
Harvennushakkuu	50,21	50,92	38,80	16,05	16,59	15,40
Ensiharvennus	41,48	42,96	34,39	12,75	12,59	12,42

Lähde:

http://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE_04%20Metsa_04%20Talous_02%20Teollisuuspuun%20kauppa_04%20Vuositilasto/01b_Kantohinnat_v.px/?rxid=dc711a9e-de6d-454b-82c2-74ff79a3a5e0

Metsänhoidon kustannukset

Uudistusalan raivaus			188,57
Laikutus			347,14
Äestys			219,67
Mätästys			397,56
Säätöaura			276,87
Pellon muokkaus			357,60
Kulotus			509,85
Kylvö			256,96
Istutus			700,32
Taimikon varhaishoito			377,97
Taimikonhoito			450,71
Nuoren metsän kunnostus			443,51
Kasvatushakkuiden ennakko-raivaus			284,40
Pystykarsinta			440,94
Metsänlannoitus			381,80
Kunnostusojitus			205,02

Lähde

https://www.stat.fi/til/khi/2021/12/khi_2021_12_2022-01-14_tau_003_fi.html

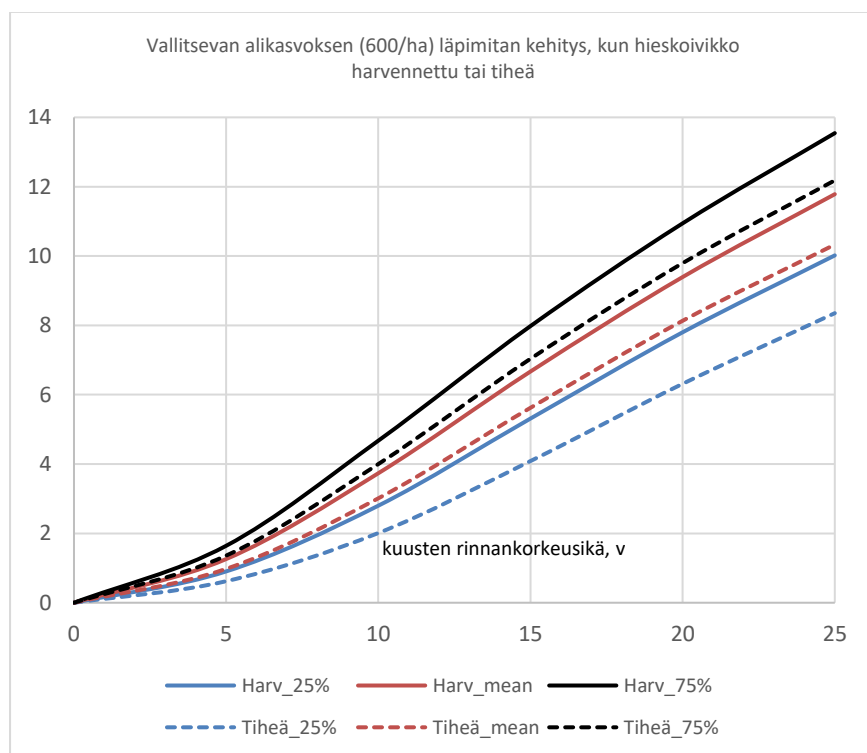
LIITE 2.

Alikasvoskuusten valtapuiden (600 pisintä per ha) keskiläpimitan ja keskipituuden kasvumallit hieskoivikon alla alikasvoksena kasvaville ja koivikon päätehakkuussa vapautetuille kuusille yleistettyinä lineaarisina sekamalleina, joissa satunnaismuuttuja oli koemetsikkö (Mixed Linear in IBM SPSS Statistics Version 25, IBM Corp 2018). Lineaarisen sekamallin muoto oli:

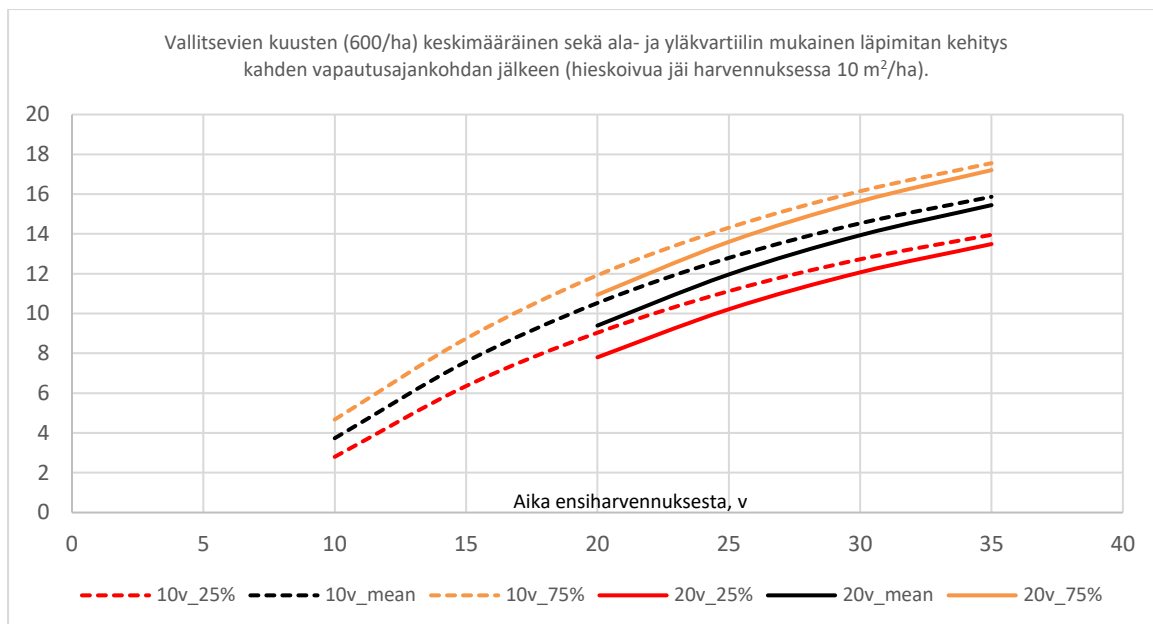
$$Y_{ijk} = [\beta]_0 + [\beta]_1 \text{ kuusiko_ijk} + [\beta]_2 \text{ koivikko_ijk} + [\beta]_3 [\text{ksvujakso_ijk} + \mu]_i + \varepsilon_{ij}$$

jossa

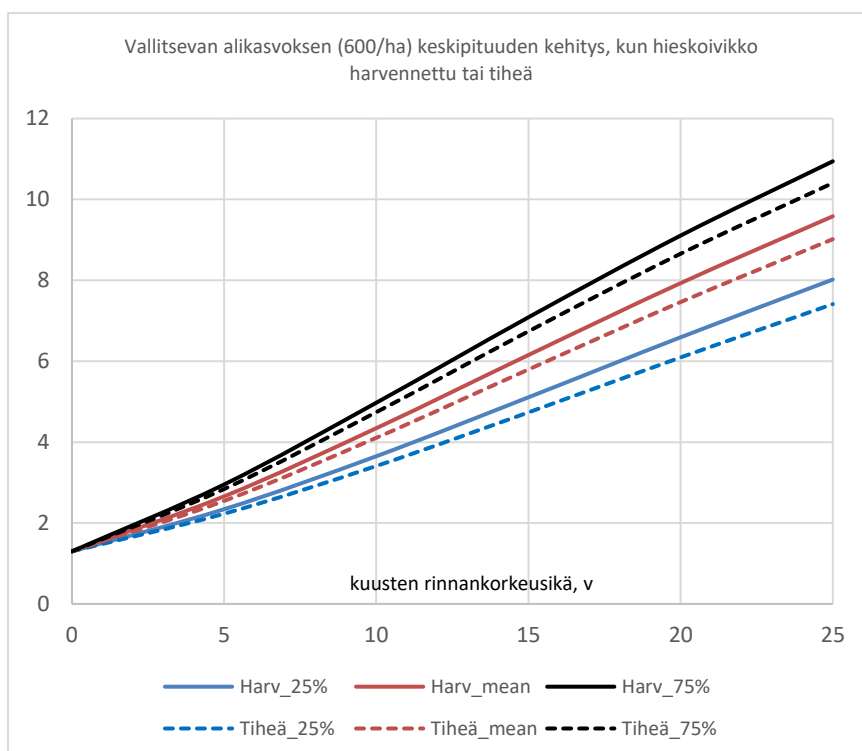
Y_{ijk}	=	Selitettävä muuttuja metsikön i koealalla j jaksolla k
$[\beta]_0$	=	Yleiskeskisarvo
$[\beta]_1$	=	Vektori kuusikon selittävien muuttujien kertoimista
kuusikko ijk	=	Vektori kuusijakson kiinteistä selittävästä muuttujista koealatasolla
$[\beta]_2$	=	Vektori koivikon selittävien muuttujien kertoimista
koivikko ijk	=	Vektori koivujakson kiinteistä selittävästä muuttujista koealatasolla
$[\beta]_3$	=	Vektori luokkamuuttujan "kasvujakso" kertoimista
$[\mu]_i$	=	Koemetsikön i satunnaisvaikutus
ε_{ij}	=	Satunnaisvirhe



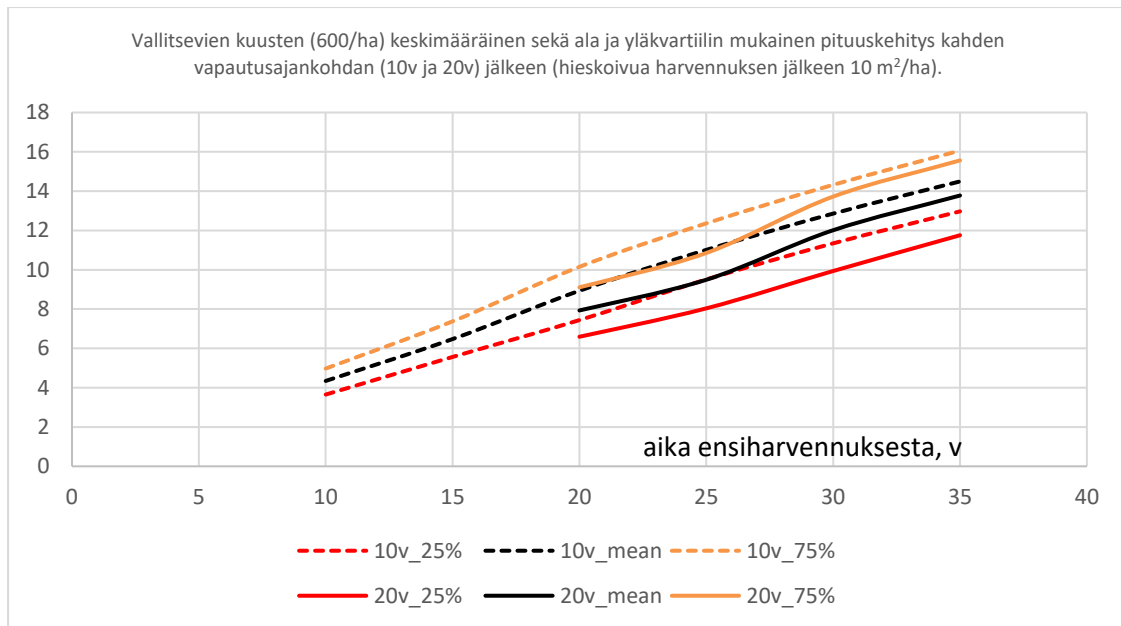
Liitekuva 1. Vallitsevan alikasvoksen keskiläpimitan kehitys harvennetussa (alussa 10 m² ha⁻¹) ja tiheässä (alussa 20 m² ha⁻¹) hieskoivikossa (Mallilla 1 laskettu "mean" ja sen residuaaleista laskettu 25 %:n alakvartiili ja 75 %:n yläkvartiili).



Liitekuva 2. Vallitsevan alikasvoksen keskiläpimitan kehitys havennetusta (alussa 10 m² ha⁻¹) hieskoivikosta kahtena eri ajankohtana vapautettuna: 10 ja 20 vuotta koivikon harvennuksesta, jolloin alikasvoksen vallitseva pituus oli ollut 1,3 m ja läpimita 0. (Mallilla 1 laskettu "mean" ja sen residuaaleista laskettu 25 %:n alakvartiili ja 75 %:n yläkvartiili).



Liitekuva 3. Vallitsevan alikasvoksen keskipituuden kehitys harvennetussa (alussa 10 m² ha⁻¹) ja tiheässä (alussa 20 m² ha⁻¹) hieskoivikossa (Mallilla 2 laskettu "mean" ja sen residuaaleista laskettu 25 %:n alakvartiili ja 75 %:n yläkvartiili).



Liitekuva 4. Vallitsevan alikasvoksen keskipituuden kehitys harvennetusta (alussa 10 m² ha⁻¹) hieskoivikosta kahtena eri ajankohtana vapautettuna: 10 ja 20 vuotta koivikon harvennuksesta, jolloin alikasvoksen vallitseva pituus oli ollut 1,3 m. (Mallilla 1 laskettu "mean" ja sen residuaaleista laskettu 25 %:n alakvartiili ja 75 %:n yläkvartiili).