

Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 90/2024

Hiilipolun skenaariot

Mallipohjainen tarkastelu metsänkäsittelyn vaikutuksista
vesistökuormitukseen, hiilitaseeseen ja monimuotoisuuteen
Puruveden alueella

**Aura Salmivaara, Soili Haikarainen, Leena Stenberg, Janne Artell,
Petteri Vanninen, Jari Hynynen, Hannu Salminen, Heikki Tuomenvirta
ja Liisa Ukonmaanaho**



Hiilipolun skenaariot

Mallipohjainen tarkastelu metsänkäsittelyn vaikutuksista vesistökuormitukseen, hiilitaseeseen ja monimuotoisuuteen Puruveden alueella

**Aura Salmivaara, Soili Haikarainen, Leena Stenberg, Janne Artell,
Petteri Vanninen, Jari Hynynen, Hannu Salminen, Heikki Tuomenvirta
ja Liisa Ukonmaanaho**



Viittausohje:

Salmivaara, A., Haikarainen, S., Stenberg, L., Artell, J., Vanninen, P., Hynynen, J., Salminen, H., Tuomenvirta, H. & Ukonmaanaho, L. 2024. Hiilipolun skenaariot : Mallipohjainen tarkastelu metsänkäsittelyn vaikutuksista vesistökuormitukseen, hiilitaseeseen ja monimuotoisuuteen Puruveden alueella. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 90/2024. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 53 s.

Aura Salmivaara ORCID ID, <https://orcid.org/0000-0002-8588-8488>



ISBN 978-952-380-981-9 (Verkkójulkaisu)

ISSN 2342-7639 (Verkkójulkaisu)

URN <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-981-9>

Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)

Kirjoittajat: Aura Salmivaara, Soili Haikarainen, Leena Stenberg, Janne Artell, Petteri Vanninen, Jari Hynynen, Hannu Salminen, Heikki Tuomenvirta, Liisa Ukonmaanaho

Julkaisija ja kustantaja: Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki 2024

Julkaisu vuosi: 2024

Kannen kuva: ©Reijo Jantunen 2019

Tiivistelmä

Aura Salmivaara¹, Soili Haikarainen¹, Leena Stenberg¹, Janne Artell¹, Petteri Vanninen², Jari Hynynen², Hannu Salminen³, Heikki Tuomenvirta⁴ ja Liisa Ukonmaanaho¹

¹ Luonnonvarakeskus, Helsinki

² Luonnonvarakeskus, Savonlinna

³ Luonnonvarakeskus, Rovaniemi

⁴ Ilmatieteenlaitos, Helsinki

Tässä raportissa esitellään HIILIPOLKU-hankkeen mallipohjaisen skenaarioanalyysin toteutus ja tulokset. Analyysissä tutkittiin erilaisia tavoitteita painottavien metsänkäsittelyvaihtoehtojen vaikutuksia vesistökuormitukseen, hiilitaseeseen ja monimuotoisuuteen talousmetsissä.

Kohdealueiksi valittiin Etelä-Savossa kolme Puruveden osavaluma-aluetta: Kuonanjoki, Sorvasranta ja Hälvänjoki. Metsien käytön tavoitteista muodostettiin kuusi erilaista skenaariota: nykyistä metsänhoitotapaa vastaava PERUS-skenaario, monimuotoisuuden lisäämiseen tähtäävä BIO-skenaario sekä hiilivaraston kasvattamiseen tähtäävä HIILI-skenaario, sekä kullekin vesistövaikutuksia minimoiva vaihtoehto. Analyysin päätyökaluina käytettiin Motti-simulaattoria metsien kehityksen ennustamiseen ja SUSI-simulaattoria ojitettujen turvemaiden vesistövaikutusten ja maaperän hiilitaseen laskemiseen. Kivennäismailla vesistökuormitukset laskettiin toimenpiteiden mukaan ominaiskuormitusluvuilla ja maaperän hiilitase Yasso07-mallilla. Skenaarioiden lähtötilanne perustui ajantasaiseen metsävaratietoon sekä hakkuut ja metsänhoito maakunnassa keskimäärin toteutuneeseen tasoon. Erot skenaarioiden välille syntyivät metsänkasvatuksen toimenpiteiden erilaisista toteutustavoista, ajoituksista ja kohdentumisista 50 vuoden aikana.

Tulokset osoittivat, että skenaarioilla onnistuttiin suuntaamaan metsien käyttöä ennalta asetettujen tavoitteiden mukaisesti. Suurin hiilivarasto syntyi hiilen sidontaa painottavassa skenaariossa. Vesistövaikutusten huomioon ottaminen hiilensidontaan lisäksi muutti hiilivaraston jakautumista kivennäis- ja turvemaiden kesken. Monimuotoisuutta painottavassa skenaariossa saatiin kasvatettua lehtipuuston ja kuolleen puun määrää metsissä. Useamman tavoitteen yhtäaikainen hyöty havaittiin erityisesti monimuotoisuuden ja vesiensuojelun skenaariossa, jossa myös hiilivarasto kasvoi ja jossa saavutettiin pienimmät typen ja fosforin huuhtoutumat välttämällä ojien kunnostusta ja kivennäismaan lannoituksia. Puuntuotanto- ja taloustuloksissa erot olivat pieniä, koska hakkuutavoitteet pyrittiin pitämään skenaarioiden kesken samantasoisina.

Tulokset osoittavat, että suhteellisen pienilläkin metsien käsittelyn muutoksilla on mahdollista tukea erilaisia metsien käytön tavoitteita: puuntuotantoa, hiilensidontaa, monimuotoisuutta sekä vesiensuojelua aluetasolla.

Asiasanat: Hiilivarasto, hiilensidonta, monimuotoisuus, Motti, skenaarioanalyysi, Suosimulaattori SUSI, Puruvesi, vesistökuormitus.

Abstract

Aura Salmivaara¹, Soili Haikarainen¹, Leena Stenberg¹, Janne Artell¹, Petteri Vanninen², Jari Hynynen², Hannu Salminen³, Heikki Tuomenvirta⁴ ja Liisa Ukonmaanaho¹

¹ Natural Resources Institute Finland, Helsinki

² Natural Resources Institute Finland, Savonlinna

³ Natural Resources Institute Finland, Rovaniemi

⁴ Finnish Meteorological Institute, Helsinki

This report presents the results of the model-based scenario analysis of the HIILIPOLKU project. The analysis examined the impacts of forest management alternatives with different goals on reducing nutrient export load, increasing carbon storage, and expanding biodiversity in commercial forests. Three sub-catchment areas of the Lake Puruvesi located in South Savo (Kuonanjoki, Sorvasranta, and Hälvänjoki) were selected as target areas. Three main lines of scenarios were formed: following business-as-usual, increasing biodiversity and increasing carbon storage. These were accompanied by a scenario with an additional goal for reducing nutrient export load. Consequently, six scenarios for each target area were analyzed. The main tools used in the analysis were the Motti simulator for predicting forest development and the SUSI simulator for calculating nutrient export load and soil carbon balance in drained peatlands. In mineral soils, nutrient export loads were calculated using specific loads and soil carbon balance using the Yasso07 model. The starting point for the scenarios was based on up-to-date forest resource information, and the level of cuttings and silvicultural activities followed region-level averages. The differences between the scenarios arose from different implementation, timing, and allocation of the forest management measures over a period of 50 years.

The results showed that the scenarios succeeded in orienting forest management in accordance with pre-set goals. The largest carbon storage was created in the scenario focusing on carbon sequestration. Considering water protection goals in addition to carbon sequestration changed the distribution of carbon storage between mineral soils and peatlands. In the biodiversity-oriented scenario, proportion of broadleaved tree species and dead-wood volume in the forests were increased. The simultaneous benefits of several goals were found especially in the scenario with biodiversity and water conservation goals, also increasing carbon storage and producing the lowest leaching rates for both nitrogen and phosphorus by avoiding ditch network maintenance and mineral soil fertilization. The differences in wood production and profitability between scenarios were small because the harvesting targets were at the same level in all the scenarios. The results show that even with relatively small changes in forest management it is possible to support different goals of forest use and ensure wood production at regional level.

Keywords: Biodiversity, carbon storage, carbon sequestration, Lake Puruvesi, Motti, nutrient export load, scenario analysis, SUSI Peatland Simulator

Sisällys

1. Tausta	6
2. Menetelmät	8
2.1. Kohdealueet ja aineistot	8
2.2. Skenaariot ja käsittelyvaihtoehdot.....	9
2.3. Analyysin työkalut ja laskentaperiaatteet.....	10
2.3.1. Metsien kehitysennusteet (Motti).....	11
2.3.2. Skenaarioiden tuloksen muodostaminen (J-ohjelmisto).....	11
2.3.3. Ojitettujen turvemaakuvioiden analyysi (SUSI)	11
2.3.4. Puuntuotanto ja talous	12
2.3.5. Hiilivarastot.....	12
2.3.6. Monimuotoisuus	13
2.3.7. Vesistökuormitus.....	13
2.3.8. Taustaoletukset.....	14
3. Metsänkäsittelyvaihtoehtojen vaikutuksia kohdealueittain.....	15
3.1. Kuonanjoki	15
3.1.1. Puuntuotanto ja talous	15
3.1.2. Hiilivarastot.....	16
3.1.3. Monimuotoisuus	20
3.1.4. Vesistökuormitus.....	22
3.2. Sorvasranta.....	25
3.2.1. Puuntuotanto ja talous	25
3.2.2. Hiilivarastot.....	26
3.2.3. Monimuotoisuus	31
3.2.4. Vesistökuormitus.....	31
3.3. Hälvänjoki	34
3.3.1. Puuntuotanto ja talous	34
3.3.2. Hiilivarastot.....	35
3.3.3. Monimuotoisuus	40
3.3.4. Vesistökuormitus.....	41
3.4. Herkkyysanalyysi: ilmastonmuutoksen vaikutus ojitetuilla turvemaidilla	44
4. Yhteenveto.....	46
5. Lopuksi	50
Viitteet.....	51

1. Tausta

HIILIPOLKU-hanke ja Puruvesi

HIILIPOLKU-hanke toteutettiin vuosina 2022–2024 Luonnonvarakeskuksen (Luke) ja Ilmatieteen laitoksen (IL) yhteistyönä (Ukonmaanaho ym. 2024). Yhteistyökumppaneina toimivat Etelä-Savon metsänhoitoyhdistys, Etelä-Savon metsäkeskus, Etelä-Savon ELY-keskus, Pro Puruvesi ja Metsämuseo Lusto. HIILIPOLKU-hankkeen tavoitteena oli ohjata metsänhoitoa tukemaan hiilensidonnan, vesiensuojelun ja monimuotoisuuden tavoitteita alueellisella ja yhteisötasolla. Hanke rahoitettiin maa- ja metsätalousministeriön Hiilestä kiinni -rahoitusohjelmasta.

HIILIPOLKU-hankkeen päämääränä oli tuottaa joustava paikallislähtöinen HIILIPOLKU-konsepti, jonka avulla parannetaan hiilensidonnan, vesistövaikutusten ja monimuotoisuuden huomioimista metsien käytön suunnittelussa. Konseptin tavoitteena on kannustaa metsänomistajia sekä paikallisia metsätalouden toimijoita vapaaehtoisesti metsien hiilensidontaan, vesiensuojeluun ja luonnon monimuotoisuuden lisäämiseen.

HIILIPOLKU-hanke toteutettiin Puruveden valuma-alueella (1 017 km²), joka sijaitsee Vuoksen vesistöalueella pääosin Savonlinnan ja Kiteen kuntien alueella. Vesistöjen osuus valuma-alueella on 43 %. Valuma-alueella tärkein maankäyttömuoto on metsätalous (86 % valuma-alueesta), minkä lisäksi alueita on maatalouskäytössä sekä taajamissa (SYKE 2018). Valtaosa metsistä on yksityisomistuksessa. Metsistä noin 47 % on havumetsiä, 45 % sekametsiä ja 7 % lehtimetsiä (Juvonen ym. 2023). Soiden osuus on 18 % metsämaan kokonaisalasta. Niistä ojitettuja on 80 %, eli 15 % metsämaan kokonaisalasta.

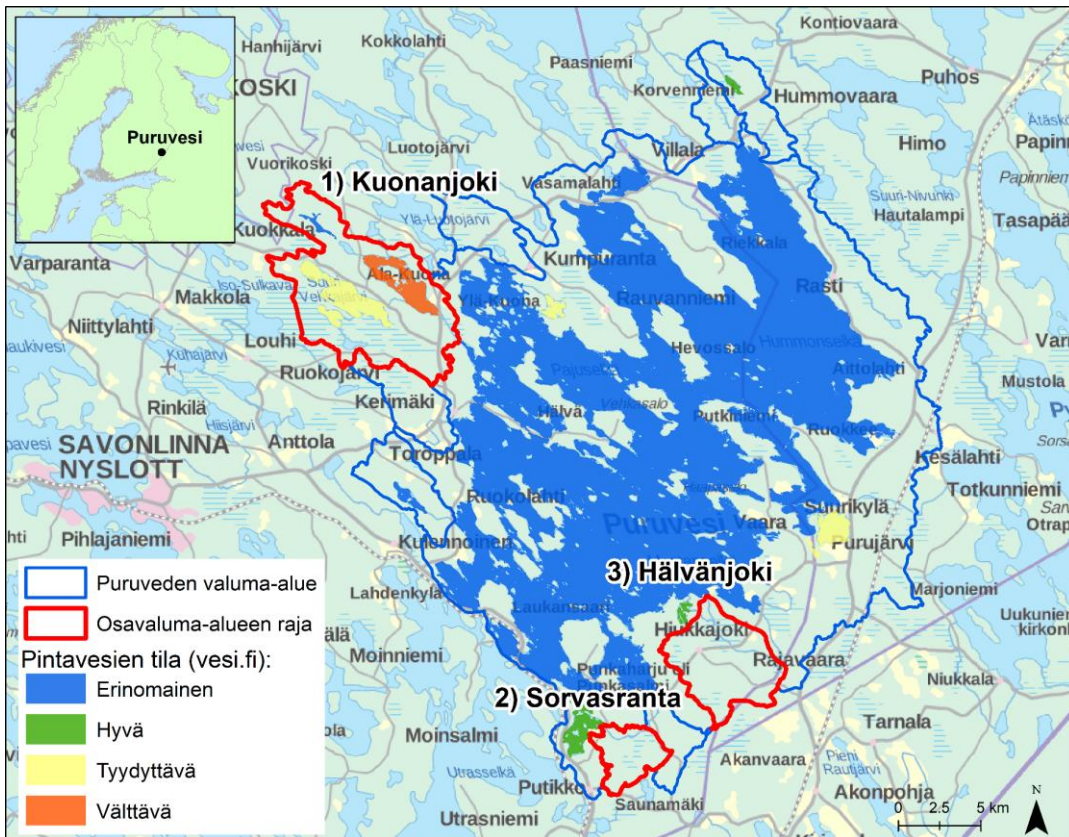
Itse Puruveden pinta-ala on noin 416 km² ja siinä sijaitsee yli 700 saarta. Puruvesi eroaa tyypillisestä suomalaisesta järvestä kirkasvetisyydellään: vedenalainen näkösyvyys on jopa 12 metriä. Se on niukkaravinteinen (oligotrofinen) ja puhdasvetinen järvi, mikä johtuu siitä, että suuri osa järven vedestä tulee sen pohjassa olevista lähteistä hiekkakerroksen läpi. Vedenlaatu on pääosin erinomainen. Järvialueesta 77 % kuuluu Natura 2000 -verkostoon.

Metsien käytöllä on merkittävä vaikutus Puruveden tilaan. Merkittävimmät metsätalouden kuormituksen aiheuttajat ovat avohakkuut ja maanmuokkaukset sekä turvemaiden ojien kunnostukset. Soiden ojitukset on tehty pääosin 1960–80-luvuilla ja kunnostukset käynnistyivät 1990-luvulla. Ilmastomuutoksen myötä on odotettavissa, että metsistä tuleva hajakuormitus lisääntyy (Juvonen ym. 2023, Salmivaara ym. 2023), mikä näkyy rehevöitymisen ja vesikasvillisuuden leviämisen kasvuna alueen vesistöissä. Tämä ilmiö on jo havaittavissa. Varoittava esimerkki on Puruveden laskevan Kuonanjärven ekologisen tilan heikentyminen erinomaisesta välttäväksi (Hakala ym. 2021) vuosikymmenten kuluessa.

Hiilipolun skenaariot

Tässä raportissa esitetään HIILIPOLKU-hankkeen mallipohjaisen skenaarioanalyysin toteutus ja tulokset. Analyysissä selvitettiin keinoja sellaisten talousmetsäkohteiden löytämiseksi, jotka ovat parhaimpia metsien hiilivaraston ylläpitämisessä ja kasvattamisessa, ja joiden käsittelyssä voidaan vaikuttaa vesiensuojeluun ja luonnon monimuotoisuuteen. Analyysissä on tarkasteltu kolmea Puruveden valuma-alueen osa-aluetta: Kuonanjoki, Sorvasranta ja Hälvänjoki (Kuva 1).

Metsänhoidon ja hakkuiden vaikutuksia ravinnekuormitukseen, hiilivarastoon ja monimuotoisuuteen tarkasteltiin skenaarioanalyysillä, jossa kohdealueiden metsille laadittiin kuusi vaihtoehtoista skenaarioita. Skenaarioissa painotettiin eri tavoin hiilivarastoon, vesistöihin ja monimuotoisuuteen liittyviä tavoitteita nykytasoa vastaavan puuntuotannon ohella. Puuston kehitysnusteet laskettiin Motti-ohjelmistolla. Kutakin skenaarioita parhaiten edustava kokonaisuus valittiin lineaarisen ohjelmoinnin avulla. Skenaarioiden ravinnekuormitus laskettiin SUSI-simulaattorilla sekä ominaiskuormitusluvuilla ja maaperän hiilivaraston muutos laskettiin SUSI:lla ja Yasso07-mallilla. Tulokset tuotettiin kullekin tarkasteltavalle alueelle 50 vuoden ajanjaksolle. Tuloksia havainnollistettiin lisäksi kartoilla.



Kuva 1. Puruvesen kolme osavaluma-aluetta HIILIPOLKU-hankkeessa: Kuonanjoki (1), Sorvasranta (2) ja Hälvänjoki (3).

2. Menetelmät

2.1. Kohdealueet ja aineistot

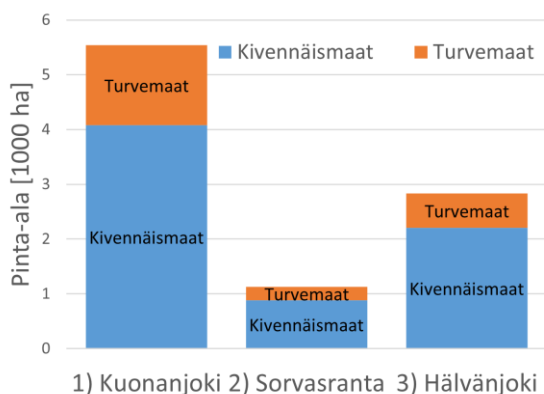
Kohdealueiksi valittiin Puruveden alueelta kolme osavaluma-alueita: Kuonanjoki, Sorvasranta ja Hälvänjoki. Osavaluma-alueiden kokonaispinta-ala kattaa yhteensä noin 11 700 ha, ja niiden metsät (metsä-, kitu- ja joutomaata) noin 9 500 ha (Taulukko 1). Metsät ovat pääosin yksityisomistuksessa.

Aineisto (simulointien lähtötiedot) saatiin Metsäkeskuksen kuvioittaisesta metsävaratiedosta ja se edusti vuoden 2022 tilannetta. Kolmen kohdealueen aineistossa oli yhteensä noin 7 800 metsikkökuviota. Metsistä 97 % on metsämaata, 2 % kitumaata ja 1 % joutomaata. Turvemaametsien osuus on noin neljäsosa (Taulukko 1, Kuva 2). Ojittamattomia soita on 2 % metsämaan pinta-alasta. Kivennäismaiden kasvupaikat ovat varsin reheviä, metsämaan metsistä yli 80 % on tuoreilla tai lehtomaisilla kankailla. Turvemaiden tyypillisimmät kasvupaikat ovat mustikka- ja puolukkaturvekankaita (yhteensä noin 80 %). Noin 2 %:lle kuvioista oli aineistoon merkitty toimenpiderajoite.

Metsien käytön nykytilaa kuvaavan perustason muodostamisessa käytettiin tilastoituja toteutuneita hakkuumääriä ja metsänhoidon pinta-aloja (Etelä-Savo, keskimäärin vuosilta 2018–2020; Suomen virallinen tilasto (SVT), a, b) kohdealueiden pinta-aloille suhteutettuna. Puutavaran kantohinnat ja metsänhoidon kustannukset saatiin tilastoiduista keskimääräisistä, elinkustannusindeksillä korjatuista arvoista (Kymi-Savon hinta-alue, vuodet 2016–2020; Suomen virallinen tilasto (SVT), b, c, d).

Taulukko 1. Kohdealueiden metsäpinta-alat ja metsikkökuvioiden määrät.

Kohdealue	1) Kuonanjoki	2) Sorvasranta	3) Hälvänjoki	Yhteensä
Pinta-ala, ha	5 542	1 125	2 833	9 500
Kivennäismaat, ha	4 078 (74 %)	882 (78 %)	2 206 (78 %)	7 166 (75 %)
Turvemaat, ha	1 464 (26 %)	243 (22 %)	627 (22 %)	2 334 (25 %)
Kuvioiden lukumäärä	4 496	971	2 377	7 844



Kuva 2. Kivennäis- ja turvemaiden sijaitsevien metsikkökuvioiden pinta-alat kohdealueilla.

2.2. Skenaariot ja käsittelyvaihtoehdot

HIILIPOLKU-hankkeessa määritellyt metsienkäytön tavoitteet (puuntuotanto, hiilivarasto, monimuotoisuus ja vesistövaikutukset) muotoiltiin kuudeksi erilaiseksi, kutakin tavoitetta painotavaksi skenaarioksi. Kunkin kohdealueen metsien kehitys ennustettiin näiden skenaarioiden mukaisesti.

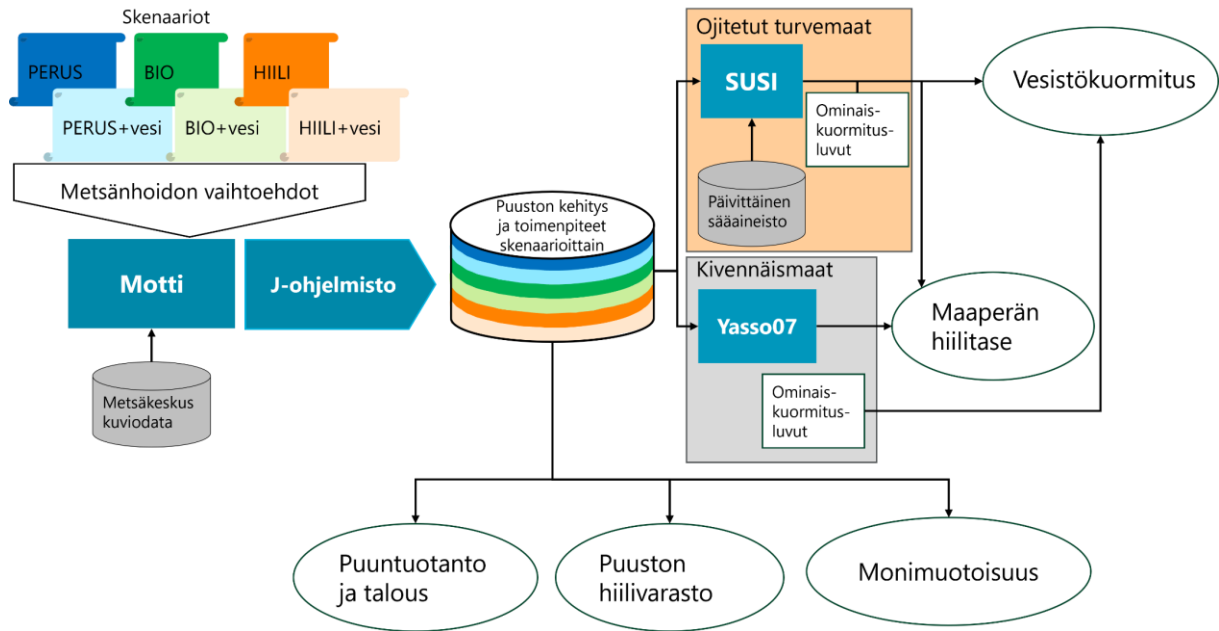
PERUS-skenaario edusti puuntuotantotavoitetta alueen nykyisellä toiminnan intensiteetillä ja sisälsi tavanomaisia metsänhoitosuosituksen mukaisia käsittelyjä. HIILI-skenaario painotti hiilivarastojen kasvattamista ja BIO-skenaario monimuotoisuutta edistäviä toimia (Taulukko 2). Näille kolmelle skenaariolle muodostettiin ”+vesi”-vaihtoehto, joka otti erityisesti huomioon vesiensuojelunäkökohdat ja tavoitteli vesistökuormituksen vähentämistä alkuperäisen tavoitteen lisäksi.

Taulukko 2. Skenaariot.

Skenaario	Tavoite	Kuvaus
PERUS	Kestävän ja taloudellisesti kannattavan metsänhoidon skenaario	Noudattaa yleisesti käytettyjä Hyvän metsänhoidon suosituksia, ml. suositusten ohjeet luonnonhoitotoimista, kuten lehtipuuston määrästä ja säästöpuista. Soveltuvilla kohteilla kunnostetaan ojituksia ja tehdään lannoituksia. Hakkuiden ja metsänhoitotoimien määrät ovat alueella keskimäärin toteutuneella tasolla.
PERUS+vesi	Kestävän ja taloudellisesti kannattavan metsänhoidon skenaario vesistökuormitus minimoiden	Kuten PERUS-skenaario, mutta vältetään ojien kunnostusta ja kivennäismaiden lannoituksia.
BIO	Kestävän, luonnon monimuotoisuutta lisäävän metsänhoidon skenaario	Metsiä kasvatetaan PERUS-skenaariota pidempään ennen uudistushakkuuta, harvennukset tehdään kevyempinä ja lehtipuuston osuutta lisätään taimikonhoidossa ja harvennuksissa tavoitteena puulajikirjon ja kuolleen puun lisääminen.
BIO+vesi	Kestävän, luonnon monimuotoisuutta lisäävän metsänhoidon skenaario vesistökuormitus minimoiden	Kuten BIO-skenaario, mutta vältetään ojien kunnostusta ja kivennäismaiden lannoituksia.
HIILI	Kestävän, hiilen sidontaa lisäävän metsänhoidon skenaario	Metsiä kasvatetaan PERUS-skenaariota pidempään ennen uudistushakkuuta, harvennukset tehdään kevyempinä ja lannoituksilla tehostetaan puuston kasvua.
HIILI+vesi	Kestävän, hiilen sidontaa lisäävän metsänhoidon skenaario vesistökuormitus minimoiden	Kuten HIILI-skenaario, mutta vältetään ojien kunnostusta ja kivennäismaiden lannoituksia.

2.3. Analyysin työkalut ja laskentaperiaatteet

Mallipohjainen skenaarioanalyysi tuotettiin laskentakehikossa (Kuva 3) esitettyjä työkaluja (Motti, SUSI, J-ohjelmisto, Yasso07) ja tässä luvussa kuvailtuja laskentaperiaatteita käyttäen.



Kuva 3. Laskentakehikko.

Motti

Motti simulaattori on Luonnonvarakeskuksessa kehitetty mallikonaisuus, jolla voidaan tuottaa metsikkötason kehitysennusteita erilaisista lähtötilanteista alkaen kaikille suomalaisille puulajeille ja kasvupaikoille koko maassa (Hynynen ym. 2005, Luke 2024). Puuston kehitysdynamiikassa huomioidaan hakkuiden ja metsänhoidon vaikutukset. Kehitysennusteiden lisäksi saadaan tulokset myös kunkin simuloinnin tuottamista hakkuukertymistä, hakkuutuloista ja metsänhoidon kustannuksista sekä puuston hiilivarastosta ja monimuotoisuustunnuksista.

SUSI

Suosimulaattori (SUSI) on Itä-Suomen yliopistossa, Luonnonvarakeskuksessa ja Helsingin yliopistossa kehitetty prosessimalli ojitettujen suometsien simulointiin (Laurén ym. 2021). SUSI laskee suometsän hydrologiaa, biogeokemiallisia prosesseja ja puuston kasvua kahden ojan välisellä saralla. Laskennassa voidaan huomioida puuston erilaiset lähtötiedot, kasvupaikan ravinteisuustaso, kohteen sijainti, säätila ja ilmasto, ojasyvydet ja ojien välinen etäisyys. Hydrologiaa lasketaan SUSI:ssa päivän aika-askeleella, mutta puuston kasvun ja ravinnetaseen laskennassa käytetään vuoden aika-askelta. SUSI tuottaa ennusteet pohjaveden pinnalle, puuston kasvulle, hiilitaseelle ja ravinnekuormitukselle (N, P). SUSI:n prosessikuvauksia on päivitetty vastikään etenkin CO₂-päästöjen osalta (Palviainen ym. 2024).

2.3.1. Metsien kehityssuunnitteet (Motti)

Ensimmäisessä vaiheessa tuotettiin Motti-simulaattorilla lukuisa joukko kehityssuunnitteita jokaiselle aineiston metsikkökuviolle (Kuva 3). Kehityssuunnitteet perustuivat yksityiskohtaisiin, tyypillisimmille kasvupaikka- ja pääpuulajiyhdistelmille erikseen laadittuihin, simulointiohjeisiin. Ohjeet sisälsivät tarkasteltavien skenaarioiden tavoitteita tukevia metsänkäsittelytoimenpiteitä ja niiden yhdistelmiä, esimerkiksi erilaisia tasaikäisen metsänkasvatuksen menetelmiä, ml. taimikonhoito, lannoitukset, oijen kunnostukset sekä harvennukset ja päätehakkuut. Lisäksi simuloitiin jatkuvaan kasvatukseen tähtääviä siirtymävaiheen hakkuuta sekä "ei tehdä mitään" -vaihtoehto. Esimerkkejä ohjeista ja simuloinneista mm. julkaisuissa Hynynen ym. (2015), Huuskonen ym. (2020), Haikarainen ym. (2021).

2.3.2. Skenaarioiden tuloksen muodostaminen (J-ohjelmisto)

Toisessa vaiheessa Motilla simuloidusta aineistosta valittiin lineaarisen ohjelmoinnin avulla (J-ohjelmisto; Lappi & Lempinen 2014) kuvioitaisten käsittelyjen yhdistelmä, optimiratkaisu, joka vastaa parhaiten kunkin skenaarion tavoitteita aluetasolla. Hakkuukertymät vastasivat maakunnan keskimääräistä tasoa ja ne pyrittiin pitämään samansuuruisina kaikissa skenaarioissa. Tämän vaiheen jälkeen jokaiselle metsikkökuviolle oli olemassa vain yksi simuloitu vaihtoehto kussakin skenaariossa, ja niiden perusteella voitiin laskea osa skenaarioiden aluekohtaisista tuloksista, kuten hakkuukertymät, toimenpidepinta-alat, tulot ja kustannukset sekä elävän puuston hiilivarasto ja monimuotoisuuden kannalta tärkeitä rakennepiirteitä. Seuraavaksi ratkaisuja käytettiin SUSI- ja Yasso07-laskelmien lähtötietoina.

2.3.3. Ojitettujen turvemaakuvioiden analyysi (SUSI)

Motista saadut simulointitulokset (puuston kasvuennusteet) toimivat lähtötietona SUSI:lle ojitettujen turvemaametsien vesistövaikutusten ja maaperän hiilivaraston muutosten laske-
miseksi. Kuviokohtaisten tietojen lisäksi lähtötietona oli sääaineisto, jona käytettiin Ilmatieteen laitoksen 1 km×1 km hila-aineistosta (Aalto ym. 2016) kohdealueiden keskipisteiden mukaan valittua aineistoa 1991–2020 ajanjaksolta. Koko 50 vuoden simulointiajanjakson kattamiseksi jaksolle 2021–2040 käytettiin jakson 2001–2020 säätietoja. SUSI aloittaa simuloinnin kuvion puustotiedoista, mutta prosessipohjaisena mallina ottaa huomioon myös ravinteiden saatavuuden ja sääolosuhteet, jolloin puuston kehitys voi jonkin verran poiketa Motti-ennusteesta. Tällöin metsiköille simuloitujen toimenpiteiden ajankohta saattoi muuttua. Mikäli niiden ajoittumisessa oli yli 10 vuoden ero, tehtiin SUSI-simulaatio uudestaan kuviolle siten, että puuston kehitys pakotettiin seuraamaan Motin kehitystä.

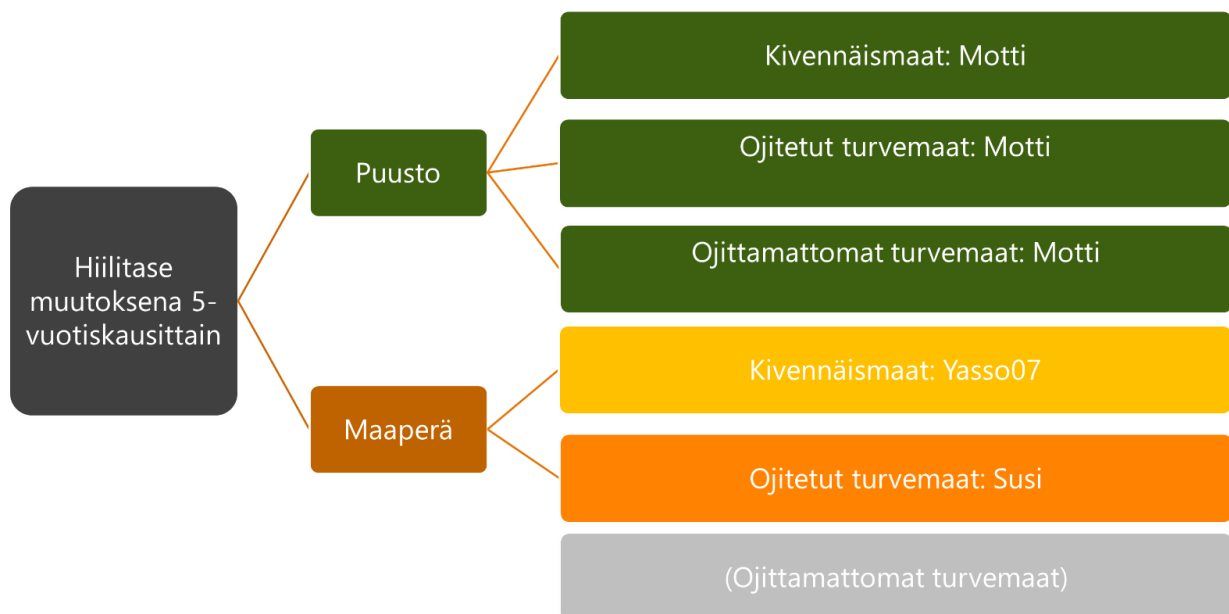
Kunkin kuvion kehityssuunnite pilkottiin jaksoihin, joiden pituus määräytyi simuloinnissa to-
teutuneiden toimenpiteiden (ensiharvennus, harvennus, päätehakkuu, oijen kunnostus) mu-
kaan. SUSI-simulointi tehtiin kullekin jaksolle erikseen siten, että jakson alussa lähtötilanne
päivittyi tehdyn toimenpiteen jälkeiseen tilaan. SUSI:ssa kasvupaikan turvekerros ohenee ajan
myötä, jos vedenpinta on riittävän alhaalla. Tämä päivitetty turvekerroksen paksuus huomioi-
tiin aina uuden SUSI-simulaation alussa. Oijen kunnostus huomioitiin mallissa oijen syvyytie-
toa päivittämällä.

2.3.4. Puuntuotanto ja talous

Skenaarioiden puuntuotanto (elävän puuston runkotilavuuden kehitys) saatiin suoraan Motin tuottamista simulointituloksista kullekin kuviolle valikoituneen käsittelyketjun mukaisena. Skenaarioiden puuntuotannon taloustulokset perustuvat simuloituissa hakkuissa saatuihin kertymiin, jotka arvotettiin tilastoiduilla puutavaralajeittaisilla kantohinnoilla. Simuloinneissa toteutettujen metsänhoitotoimien kustannukset perustuivat niin ikään tilastoituihin kustannuksiin (ks. Luku 2.1.). Kustannusten ja tulojen ajoittuminen huomioitiin laskemalla nettotulojen nykyarvot eri korkokannoilla 50 vuoden ajanjaksolta.

2.3.5. Hiilivarastot

Elävän puuston hiilivarasto laskettiin Motti-simulointien tuottamasta elävän puuston biomassasta. Kivennäismaiden maahiili laskettiin Yasso07-ohjelmalla (Tuomi ym. 2008) ja turvemaiden maahiili SUSI:lla. Kaikki biomassa muutettiin hiileksi ja edelleen hiilidioksidiekvivalenteiksi kertomalla CO₂ moolimassan ja hiilen moolimassan suhteella. Tasetta tarkasteltiin 5-vuotiskausittain laskemalla muutos hiilivarastoissa.



Kuva 4. Hiilitaseen laskenta perustuu elävän puuston hiilivaraston muutoksen ja maahiilen muutoksen laskentaan kivennäismailla ja ojitetuilla turvemaille. Ojittamattomille turvemaille (2 % kuvioden pinta-alasta) maahiilen muutosta ei laskettu.

2.3.6. Monimuotoisuus

Kuviotietoon perustuvissa laskelmissa monimuotoisuutta oli mahdollista tarkastella vain suppeasti, aineistosta johdettujen metsien rakennepiirteiden avulla. Monimuotoisuuden kannalta tärkeitä rakennepiirteitä laskelmissa edustivat lehtipuuston ja kuolleen puun määrää, jotka saatiin suoraan simulointituloksista. Näiden piirteiden kehittyminen skenaarioissa riippuu paljon kohdealueiden metsien kasvupaikka- ja puulajijakaumasta. Esimerkiksi vanhoja järeitä lehtipuita voidaan säästää vain kohteilla, joilla niitä ennestään on, ja niiden määrään lisääminen nuoremmista ikäluokista tapahtuu ajan myötä hyvin hitaasti.

Monimuotoisuutta painottavan BIO-skenaarion simuloituissa taimikonhoidoissa ja harvennushakkuissa lehtipuita jätettiin sekapuustoksi enemmän kuin muissa skenaarioissa ja myös muita kuin taloudellisesti merkittäviä lehtipuulajeja säästettiin. Metsissä alkutilanteessa olevan kuolleen puun määrä ei ollut tiedossa, mutta simuloinninaikainen puuston kuoleminen ennustettiin Mottiin sisältyvillä puuston kuolemismalleilla (Hynynen ym. 2002). Päätehakkuuajankohdan viivästäminen (kiertoajan pidentäminen) vaikuttaa kuolleen puun määrään. Eri puulajien erilainen kasvudynamiikka puolestaan vaikuttaa mm. kuolemisen ajoittumiseen.

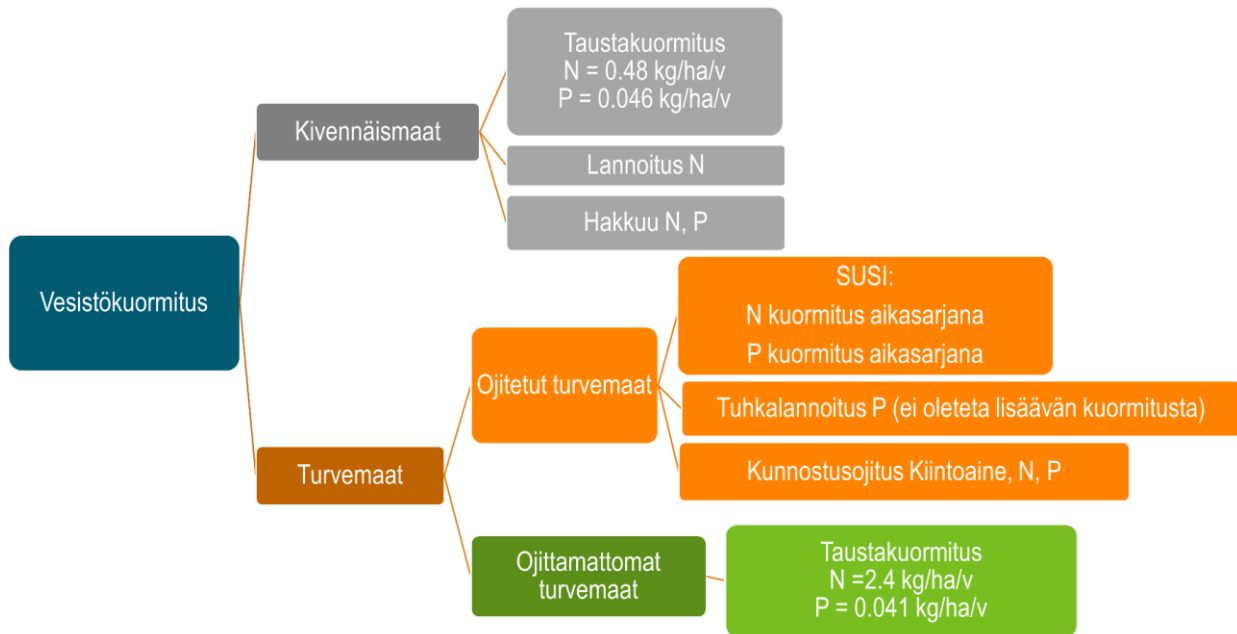
2.3.7. Vesistökuormitus

Kivennäismailla oletettiin taustakuormat typelle (0,48 kg/ha/v) ja fosforille (0,046 kg/ha/v) Kortelainen ym. (1999 ja 2006) julkaisujen sekä Suoseuran vuonna 2020 tekemän yhteenvedon perusteella (Suoseura 2020). Tämän lisäksi, mikäli kivennäismaakuviolla tapahtui lannoitus tai hakkuu, laskettiin typelle lannoituslisä (Finér ym. 2010) sekä typelle ja fosforille hakkuulisä poistetun puuston tilavuuden mukaan soveltamalla Niemisen ym. (2023) esittämää menettelyä. Typen kuormituksen arvioitiin olevan korkeampaa 2 vuotta lannoituksen jälkeen, ensimmäisenä vuonna 12 kg/ha/v ja toisena 3 kg/ha/v (Finér ym. 2010). Hakkuulisän arvioitiin vaikuttavan 5 vuotta hakkuun jälkeen.

Ojitetuilla turvemaidella vesistökuormitusten laskennassa (Kuva 5) huomioitiin SUSI:n tuottamat ennusteet typpi- ja fosforikuormitukselle (N, P). Mikäli kuviolla tehtiin tuhkalannoitus, huomioitiin SUSI:ssa lannoitusta edeltävien vuosien P kuormitus, sillä SUSI ei pysty huomioimaan tuhkalannoituksen hidasta liukoisuutta vaan ylimääräinen saatavilla oleva fosfori lasketaan mallissa kuormitukseksi. Mikäli kuviolla kunnostettiin ojia, laskettiin siitä aiheutuva kiintoainelisä Finér ym. (2010) mukaan ja lisäksi typelle ja fosforille kuormituslisä kiintoainemäärän ja keskimääräisten pitoisuuksien (kiintoainesta, Nieminen ym. 2017) tulona.

Ojittamattomille turvemaidella laskettiin taustakuormitus Kortelainen ym. (2006) mukaan kasvusta $N=48,4+1,92 \times \text{turvemaa-\%}$ olettamalla 100 % turvemaille ($N=2,4$ kg/ha/v) ja fosforille niin ikään Kortelainen ym. 2006 mukaan ($P=0,041$ kg/ha/v).

Koska prosessipohjaista mallinnusta sekä ominaiskuormituslukuja yhdisteltiin, asetettiin kuormitustuloksille rajoitin, etteivät vuosikohtaiset kuormitukset voineet nousta typellä yli 20 kg/ha/v ja fosforilla yli 2,5 kg/ha/v.



Kuva 5. Vesistöihin kohdistuvan ravinnekuormituksen laskenta.

2.3.8. Taustaoletukset

Metsien kehitysennusteissa ja ravinnekuormituslaskelmissa oletettiin, että ilmasto säilyy nykyisen kaltaisena koko tarkastelujakson ajan (pl. erillinen herkkyysoanalyysi Luvussa 3.4). Lisäksi laskelmissa oletettiin, että alueiden metsiin ei kohdistu merkittäviä tuuli-, hyönteis- tai muita tuhoja tarkasteluajanjaksona.

Hiilivaraston ja -taseen laskelmissa tarkasteltiin vain metsässä olevaa hiilivarastoa, ts. metsästä poistuvaan puutavaraan sitoutunut hiili ei sisälly laskelmiin. Ojittamattomilla soilla turpeen hiilivaraston oletettiin pysyvän vakiona kaikissa skenaarioissa.

Simuloidut kehitysennusteet ja skenaarioittaiset optimiratkaisut perustuvat numeeriseen tietoon kuvion koosta sekä puuston määrästä ja rakenteesta. Tämä tarkoittaa, ettei metsikkökuvioiden muotoa tai sijaintia toisiinsa tai vesistöihin nähden ole huomioitu toimenpidevalinnoissa.

SUSI:n laskelmissa turpeen paksuudeksi oletettiin 2 m ja ojituksen sarkaväliksi 40 m. Kuvioiden etäisyyttä vesistöistä ei huomioitu. SUSI:ssa ei huomioitu erikseen puulajisuhteita vaan kuvion kokonaistilavuuden oletettiin olevan pääpuulajia. Näin ollen esimerkiksi lehtipuuosuuksien muutokset skenaarioissa vaikuttivat SUSI-tuloksiin vain kokonaistilavuuden ja biomassositteiden kautta.

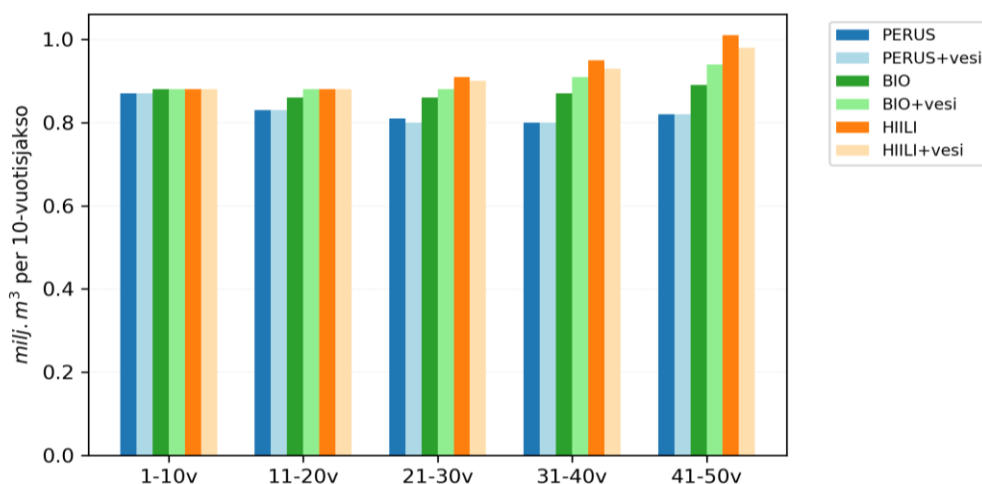
3. Metsänkäsittelyvaihtoehtojen vaikutuksia kohdealueittain

3.1. Kuonanjoki

3.1.1. Puuntuotanto ja talous

Kullakin kohdealueella metsien kehitykseen vaikuttivat mm. kasvupaikkojen puuntuotospotentiali, metsien rakenne sekä eri skenaarioissa toteutetut hakkuut ja metsänhoidon toimenpiteet.

Kuonanjoella metsien keskitilavuus oli tarkastelujakson alussa noin 160 m³/ha. PERUS-skenaariossa elävän puuston määrä (runkotilavuus) laski aluksi, mutta alkoi sitten palautua hitaasti kohti alkutilanteen tilavuutta (Kuva 6). BIO- ja HIILI-skenaariossa puuston määrä kasvoi tasaisesti, ollen suurimmillaan HIILI-skenaarion viimeisellä 10-vuotisjaksolla, jolloin elävän puuston tilavuus oli noin 23 % suurempi kuin PERUS-skenaariossa vastaavana ajankohtana.

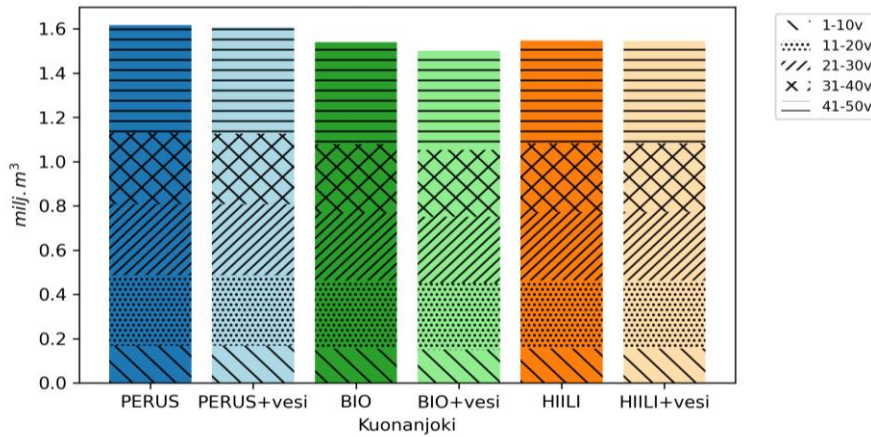


Kuva 6. Elävän puuston tilavuus Kuonanjoen skenaarioissa.

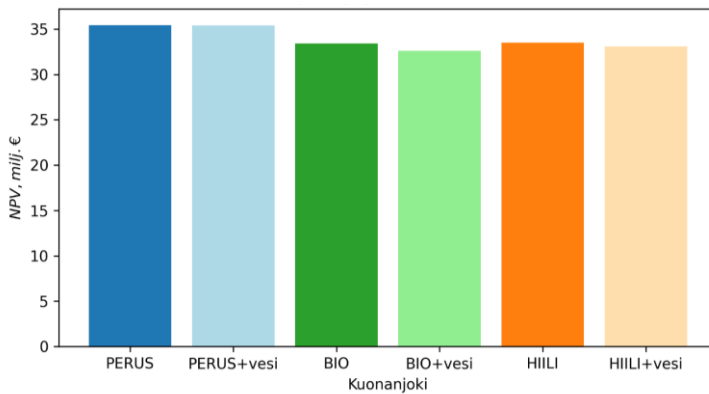
Kaikkien skenaarioiden tavoitteena oli säilyttää kunkin kohdealueen kokonaishakkuukertymä samalla tasolla kuin PERUS-skenaariossa ja pitää se suhteellisen tasaisena koko 50 vuoden jakson ajan. Samansuuruinen kertymätavoite tarkoitti sitä, että hakkuun estyessä jollain kuviolla vastaava määrä hakattiin toisaalta, eivätkä erot kokonaiskertymissä tai taloustuloksissa muodostuneet kovin suuriksi. Esimerkiksi turvemaan hakkuuta saattoi siirtyä "+vesi"-skenaarioissa kivennäismaille tai päätehakkuiden sijaan tehtiin harvennuksia. Eroja hakkuukertymän arvoon skenaarioiden välille aiheutui kuitenkin kertymän rakenteesta (puutavaralajien määrasuhteista) ja lisäksi diskonttatut nettotulot vaihtelivat hakkuiden erilaisen ajoittumisen takia. Lisäksi metsien rakenne vaikuttaa hakkuumahdollisuuksiin, jolloin ratkaisussa toteutunut kertymätaso voi poiketa tavoitteesta sille annetun liikkumavaran puitteissa.

Samansuuruudesta kertymätavoitteesta (32 700 m³/v) huolimatta Kuonanjoen BIO- ja HIILI-skenaarioiden hakkuukertymät jäivät hieman (noin 5 %) alemmaksi kuin PERUS-skenaariossa (Kuva 7). Tämän sekä toimenpiteiden ajoituksen ja kohdentumisen muutosten seurauksena nettotulojen nykyarvot (50 v., 3 % korkokannalla) jäivät BIO- ja HIILI-skenaarioissa noin 6 %

pienemmiksi kuin PERUS-skenaariossa (Kuva 8). Vesistövaikutusten huomioiminen alensi nettotulojen nykyarvoja vielä lisää, ollen BIO+vesi -skenaariossa noin 8 % ja HIILI+vesi -skenaariossa noin 7 % alemmat kuin PERUS-skenaariossa (Kuva 8).



Kuva 7. Hakkuukertymät Kuonanjoen skenaarioissa.



Kuva 8. Nettotulojen nykyarvo (50 v., 3 % korkokannalla) Kuonanjoen skenaarioissa.

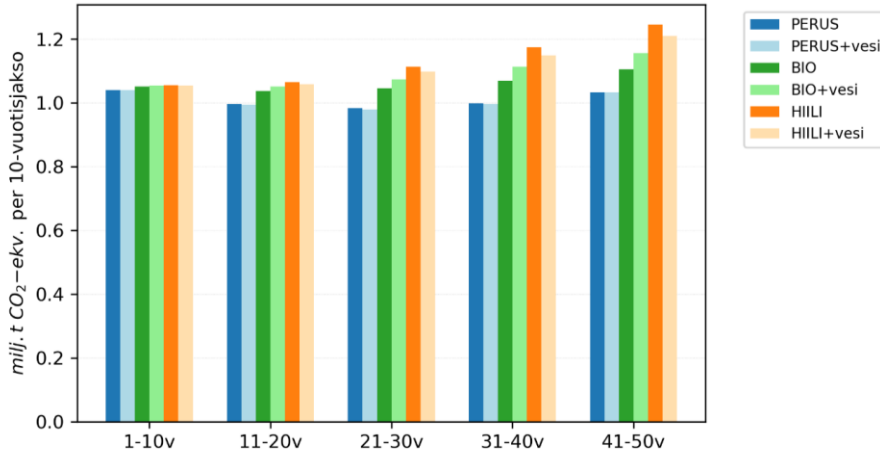
3.1.2. Hiilivarastot

Elävän puuston hiilivarasto eri skenaarioissa kehittyä pääpiirteissään samalla tavoin kuin elävän puuston kokonaistilavuus. Erot puulajisuhteissa ja puuston kehitysvaiheissa voivat kuitenkin johtaa runkopuutilavuuden ja biomassan (hiilivaraston) toisistaan poikkeaviin kehityksiin eri skenaarioissa.

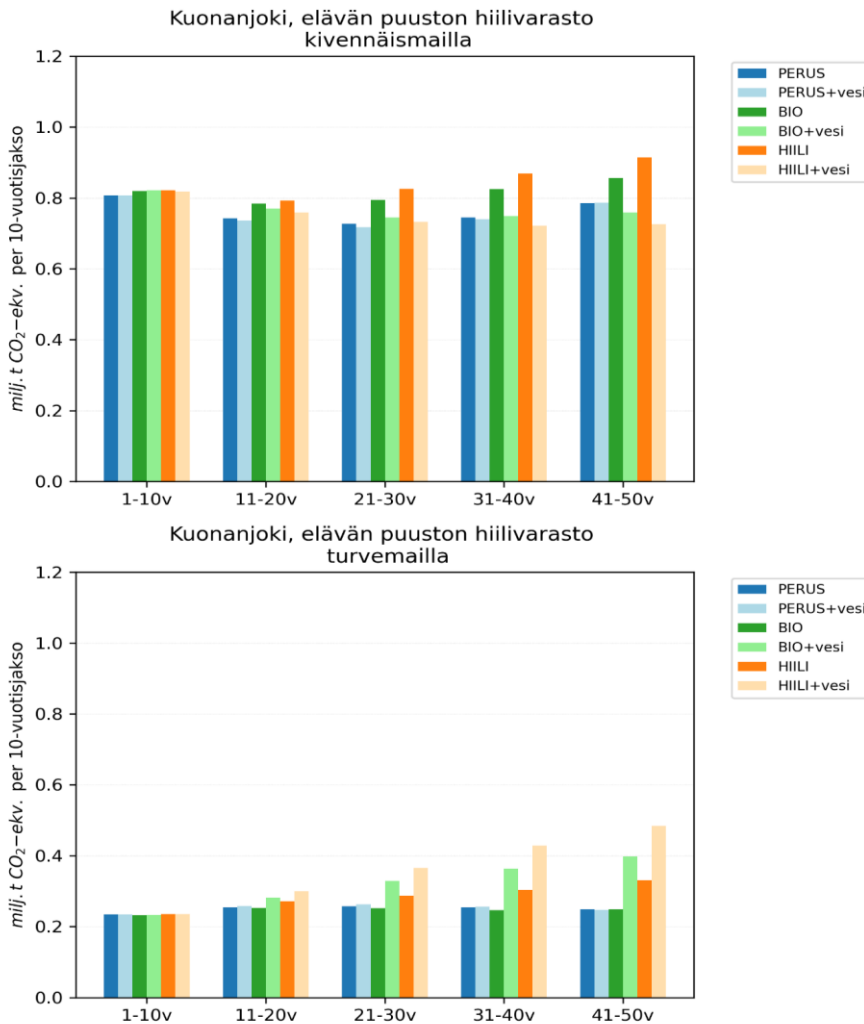
Alussa Kuonanjoen metsien puuston hiilivarasto oli keskimäärin 190 tn/ha (CO₂-ekv). Skenaarioiden alkuperäisten tavoitteiden mukaisesti Kuonanjoella suurin hiilivarasto syntyi HIILI-skenaariossa (Kuva 9), jossa varasto oli viimeisellä 10-vuotisjaksolla noin 21 % suurempi kuin PERUS-skenaariossa vastaavana ajankohtana (saavuttaen noin 230 tn/ha). Myös BIO-skenaariossa hiilivarasto kasvoi (7 % suurempi). PERUS-skenaariossa varasto pieneni hieman, mutta oli viimeisellä 10-vuotisjaksolla palautumassa ensimmäisen tasolle. HIILI+vesi -skenaariossa elävän puuston hiilivarasto jäi hieman pienemmäksi kuin HIILI-skenaariossa (Kuva 9).

Hiilivaraston muutokset kivennäismailla ja turvemaiden olivat vastakkaiset (Kuva 10). Vesien suojeleminen vähensi turvemaiden päätehakkuita ja lisäsi kivennäismaiden

päättehakkuita, minkä seurauksena elävän puuston hiilivarasto pieneni kivennäismailla, mutta kasvoi turvemilla. Lisäksi kivennäismaiden lannoituksista luopuminen vaikutti kivennäismaiden hiilivaraston kasvuun.



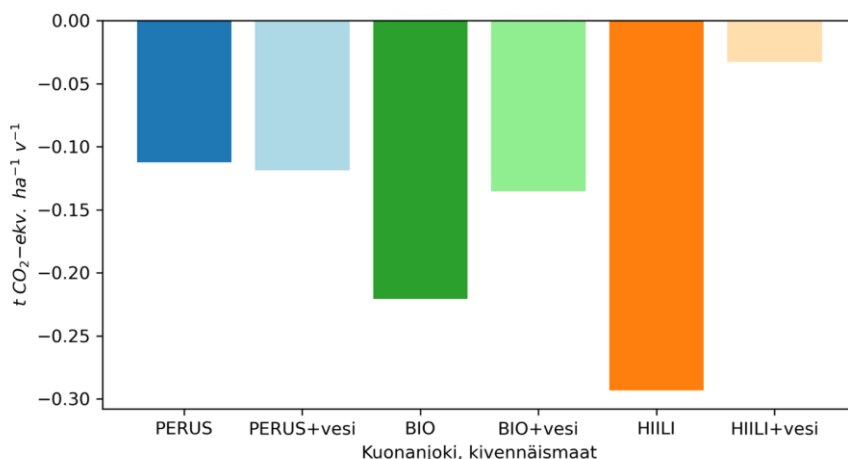
Kuva 9. Elävän puuston hiilivarasto Kuonanjoen skenaarioissa.



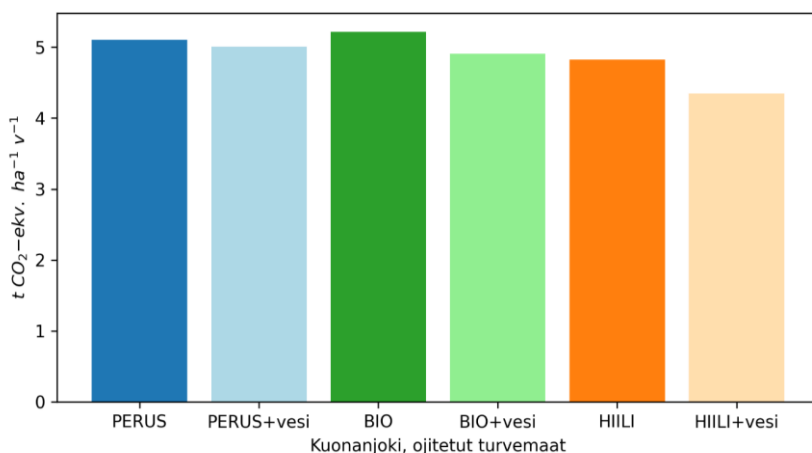
Kuva 10. Elävän puuston hiilivaraston kehitys kivennäismailla ja turvemilla Kuonanjoen skenaarioissa.

Maaperän hiilivarastojen skenaarioiden väliset erot aiheutuvat pääasiassa hakkuista (hakkuu-
tähteet, muutokset karikesadannassa ja kuolleisuudessa). Turvemaiden ojen kunnostus kuivat-
taa turvetta ja lisää turpeen hajotusta ja CO₂-päästöjä. Samalla kuitenkin puuston lisääntynyt
kasvu voi lisätä karikesyötettä maaperään. Useimmissa tapauksissa ojen kunnostuksen koko-
naisvaikutus maaperään on kuitenkin päästöjä lisäävä.

Kuonanjoella kivennäismaat olivat hiilen nieluja. Koko 50 vuoden tarkastelujaksolla hiiltä ker-
tyi kivennäismaahan eniten BIO- ja HIILI-skenaarioissa (97 % ja 161 % PERUS-skenaarioon
verrattuna (Kuva 11). BIO+vesi ja HIILI+vesi -skenaarioissa hakkuista kohdentui enemmän ki-
vennäismaalle pienentäen niiden nieluja. Ojitettujen turvemaiden maaperästä hiiltä puolestaan
vapautui melko paljon, koska iso osa turvemaiden oli kohtalaisen reheviä (mustikkaturvekan-
gas), mutta skenaarioiden väliset erot olivat pieniä. Vähiten hiiltä vapautui turvemaiden
HIILI+vesi -skenaariossa (Kuva 12).

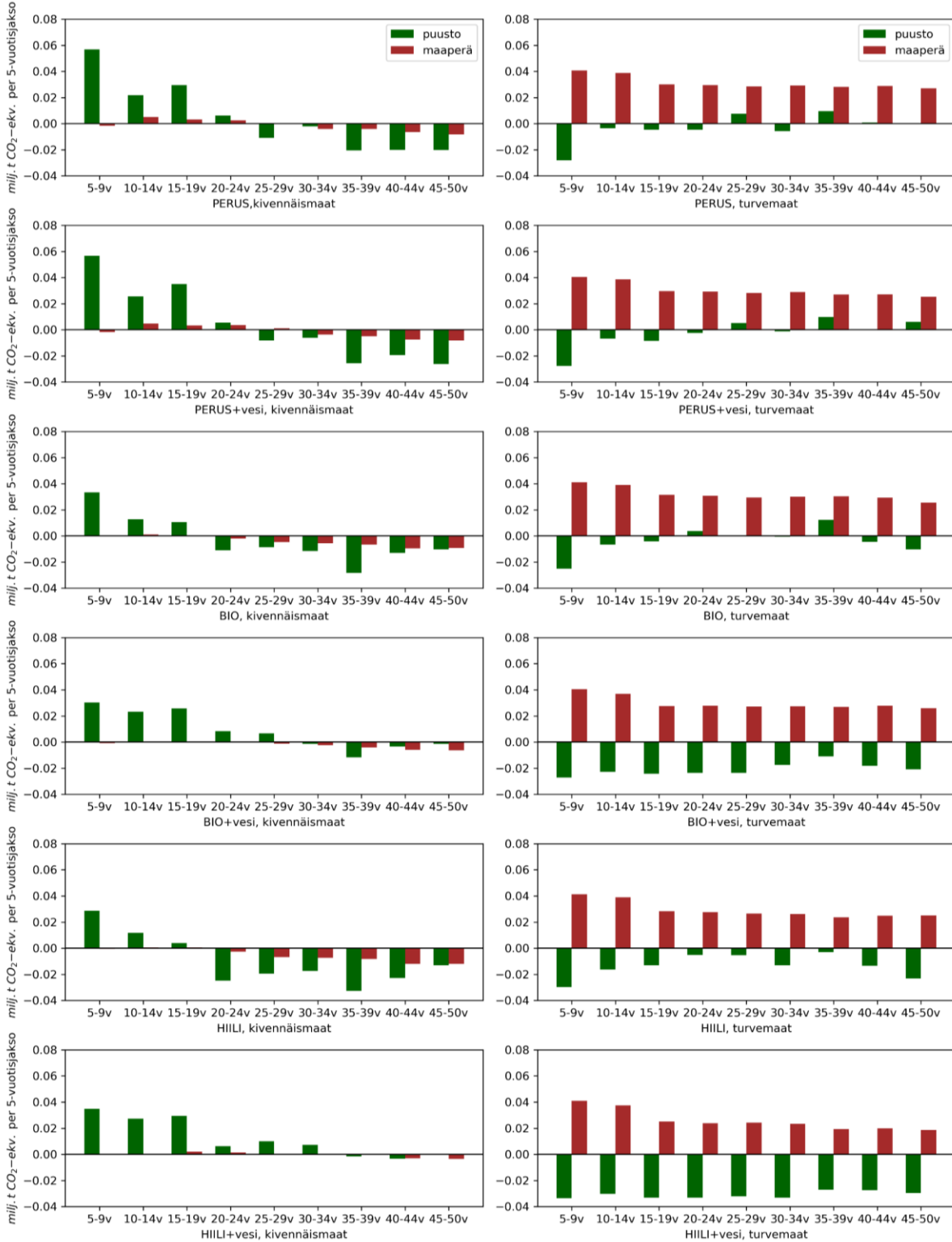


Kuva 11. Kivennäismaiden maaperän hiilitase 50 vuoden tarkastelujaksolla Kuonanjoen skenaarioissa.



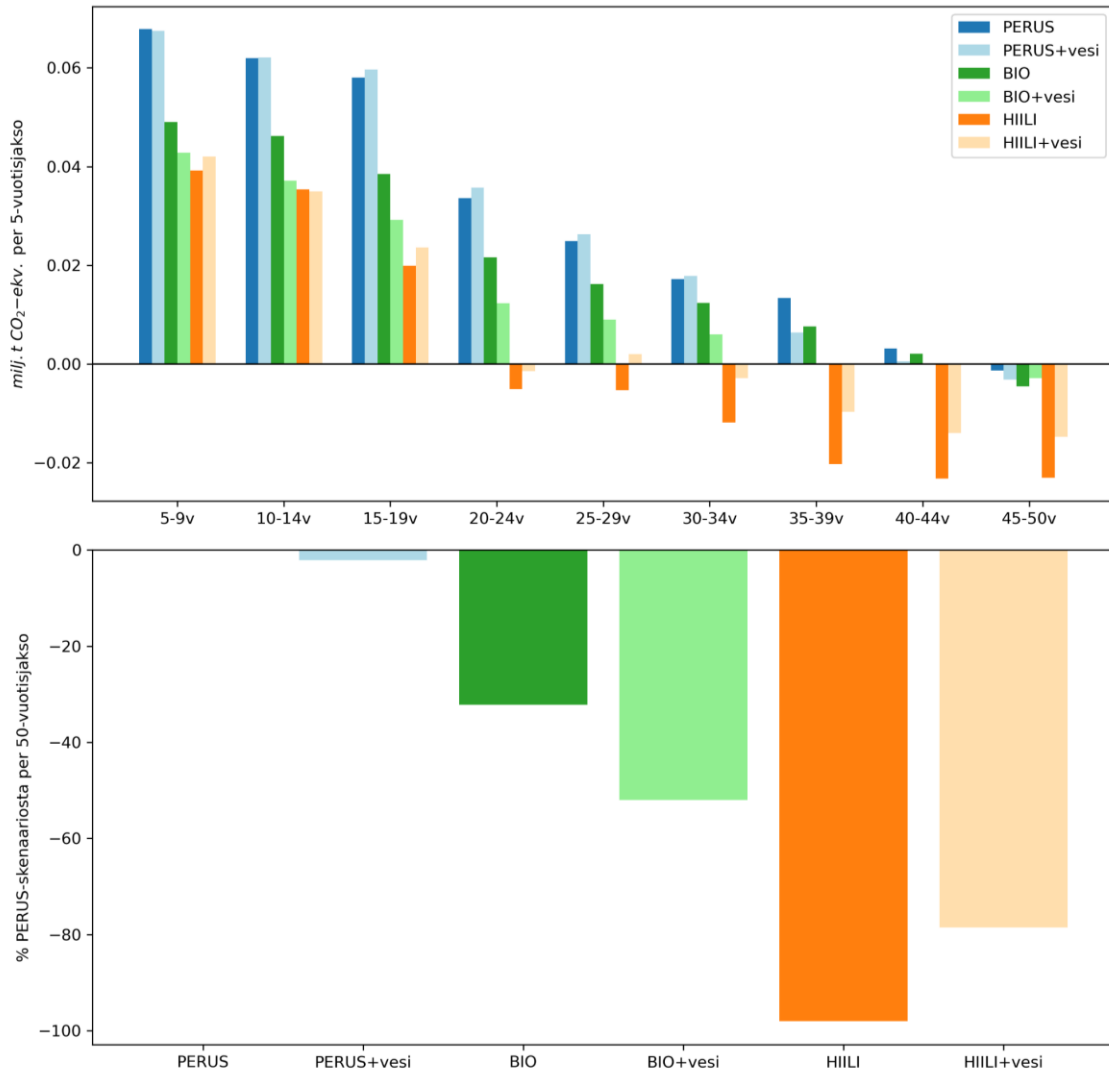
Kuva 12. Ojitettujen turvemaiden maaperän hiilitase 50 vuoden tarkastelujaksolla Kuonanjoen skenaarioissa.

Kuva 13 havainnollistaa hiilivarastojen muutoksia 50 vuoden tarkastelujakson aikana erikseen elävässä puustossa ja maaperässä sekä erikseen kivennäis- ja turvemaille. Siitä nähdään erityisesti turvemaiden maaperän päästölähde sekä puuston hiilinielun kohdentuminen HIIII-skenaariossa kivennäismaille sekä HIIII+vesi skenaariossa turvemaille.



Kuva 13. Puuston ja maaperän hiilitaseen muutos 5-vuotisjaksoittain Kuonanjoen skenaarioissa.

Kuonanjoen metsien hiilitase (elävä puusto + maaperä, kivennäis- ja turvemaat) oli alussa positiivinen (päästö), mutta kääntyi 50 vuoden tarkastelujakson aikana nieluksi kaikissa skenaarioissa. Keskimäärin paras tulos saavutettiin HIILI-skenaariossa (98 % PERUS-skenaarioon verrattuna) (Kuva 14).

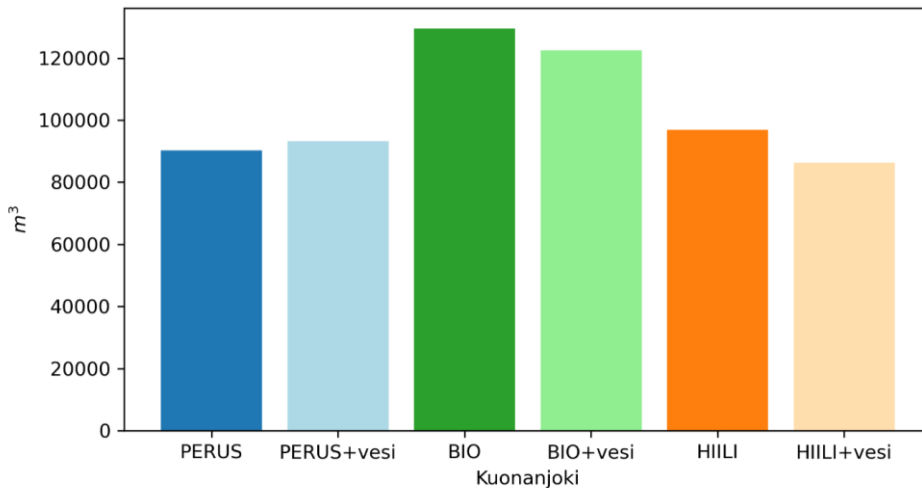


Kuva 14. Hiilitase 5-vuotisiajaksoittain ja muutosten yhteenveto 50 vuoden tarkastelujaksolta verrattuna PERUS-skenaarioon Kuonanjoen skenaarioissa.

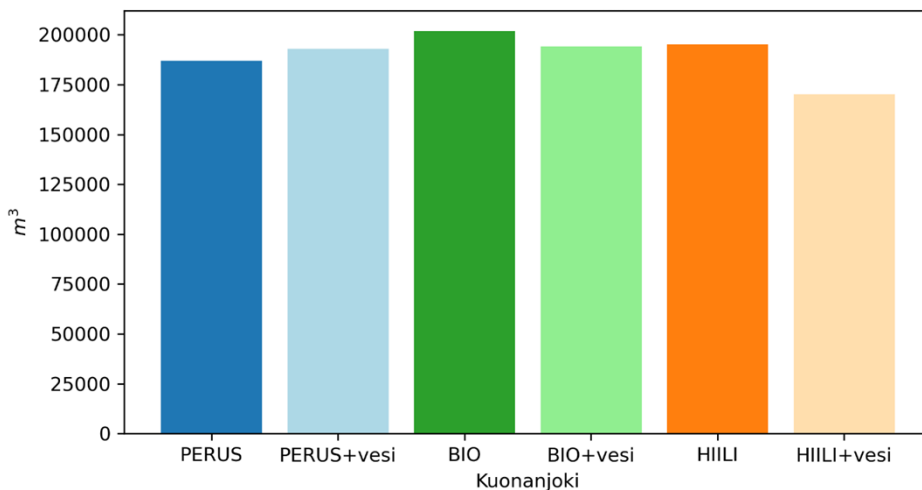
3.1.3. Monimuotoisuus

Monimuotoisuuden kannalta tärkeistä rakennepiirteistä tarkasteltiin sekä lehtipuuston että kuolleeseen puun määrän kehitystä. Lehtipuuston määrään pyrittiin vaikuttamaan BIO-skenaarioiden taimikonhoidon ja harvennusten puulajivalintojen kautta. Määrä sisältää kaiken kokoisen lehtipuun. Metsissä lähtötilanteessa olevaa lehtipuuta säästämällä myös järeämmän lehtipuun määrä kasvaa vähitellen. Kuolleeseen puun määrä yleensä lisääntyy kiertoaikojen pidentyessä, puuston tiheyden kasvaessa ja puulajivalikoiman monipuolistuessa (ts. lyhytikäisempien lehtipuiden osuuden kasvaessa). Molemmat muutokset (lehtipuun ja kuolleeseen puun määrän liäs) tapahtuvat kuitenkin hitaasti ja näkyvät vasta osittain 50 vuoden tarkastelujaksolla.

Kuonanjoen metsissä oli tarkastelujakson alussa lehtipuuta keskimäärin noin 19 m³/ha. BIO-skenaarioissa saatiin 50 vuoden aikana lisättyä lehtipuustoa metsiin 44 % (BIO) ja 36 % (BIO+vesi) enemmän verrattuna PERUS-skenaarioon (Kuva 15). Kuolleen puun alkutilavuus ei ollut tiedossa. Malleilla ennustettu puiden kuoleminen johti BIO-skenaariossa hieman muita skenaarioita suurempaan kuolleen puun määrään 50 vuoden tarkastelujakson aikana (8 % PERUS-skenaarioon verrattuna) (Kuva 16). Pidemmistä kiertoajoista huolimatta kuolleisuus ei välttämättä lisäänty HIILI-skenaariossa, koska kasvua pyritään ohjaamaan järeään runkopuuhun pitkäaikaiseksi hiilen varastoksi mm. taimikonhoitoa lisäämällä.



Kuva 15. Lehtipuuston tilavuus 50 vuoden tarkastelujakson lopussa Kuonanjoen skenaarioissa.

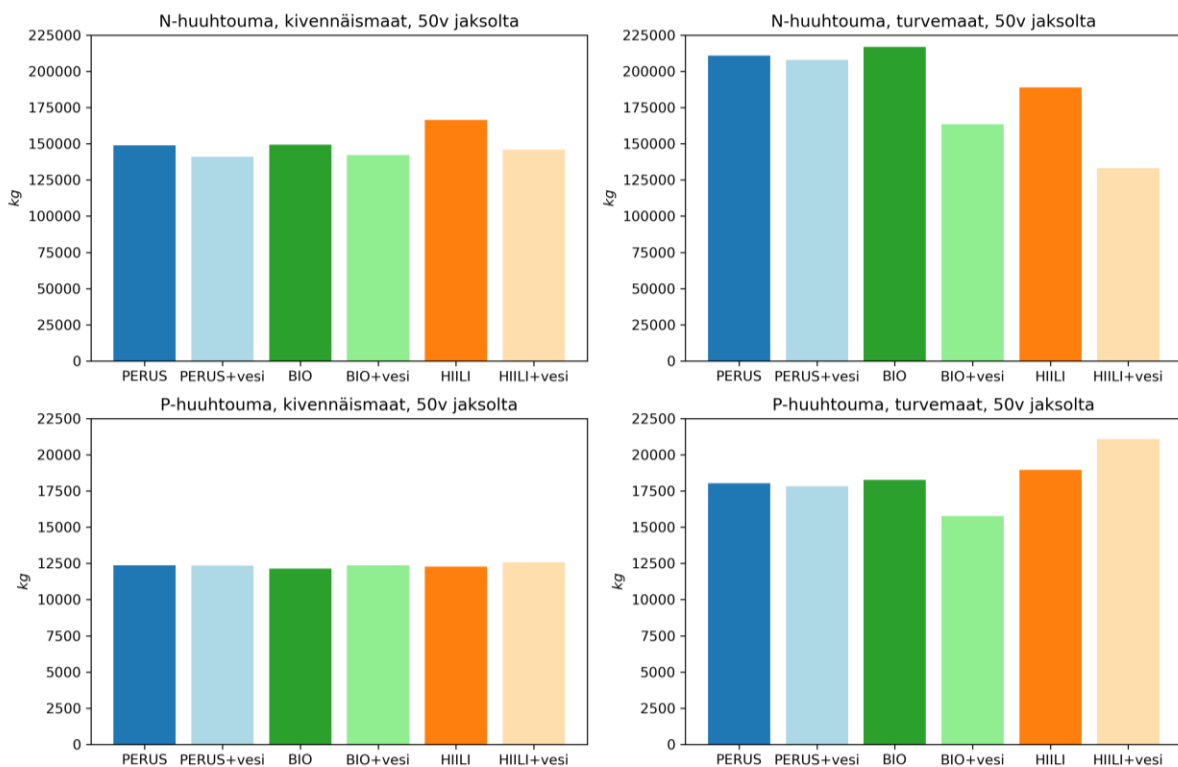


Kuva 16. Kuolleen puun kertymä 50 vuoden tarkastelujakson lopussa Kuonanjoen skenaarioissa.

3.1.4. Vesistökuormitus

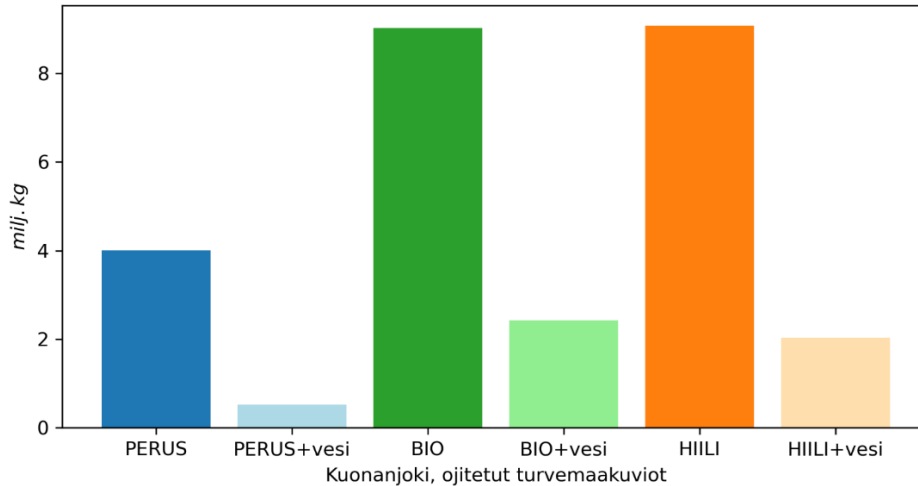
Vesistökuormitus on monen tekijän summa ja siihen vaikuttavat ojien kunnostusten, hakkuiden ja kivennäismaiden lannoitusten lisäksi mm. kasvupaikkojen jakauma ja metsien rakenne alueella sekä se, millaisissa metsiköissä ja milloin toimenpiteitä tehdään.

Kuonanjoen alueella vesistökuormitus oli yleisesti pienempi ”+vesi” -skenaarioissa. Sekä typpi- että fosforikuormitus pienenivät eniten BIO+vesi -skenaariossa (Kuva 17). Vuositasolla vähennys PERUS-skenaarioon verrattuna on noin 45 kg/v, joka on 15–23 % alueelle määritetystä vähennystarpeesta (Tossavainen 2019). PERUS-skenaarioiden fosforikuormitus (keskimäärin 608 kg/v kivennäismailla ja ojitetuilta turvemailta yhteensä) on samaa tasoa kuin Puruveteen Kuonanjoen valuma-alueelta tuleva mitattu kuormitus (615 kg/v, Tossavainen 2019). Kivennäismailla lähinnä lannoitukset näkyivät skenaarioiden välisinä eroina typpikuormituksessa. Turvemaiden aiheuttama kuormitus oli Kuonanjoella useimmissa skenaarioissa suurempaa kuin kivennäismaiden, vaikka turvemaita on valuma-alueen metsiköistä vain 26 %.



Kuva 17. Ravinnekuormituksen kokonaismäärät (kg) 50 vuoden tarkastelujaksolta Kuonanjoen skenaarioissa.

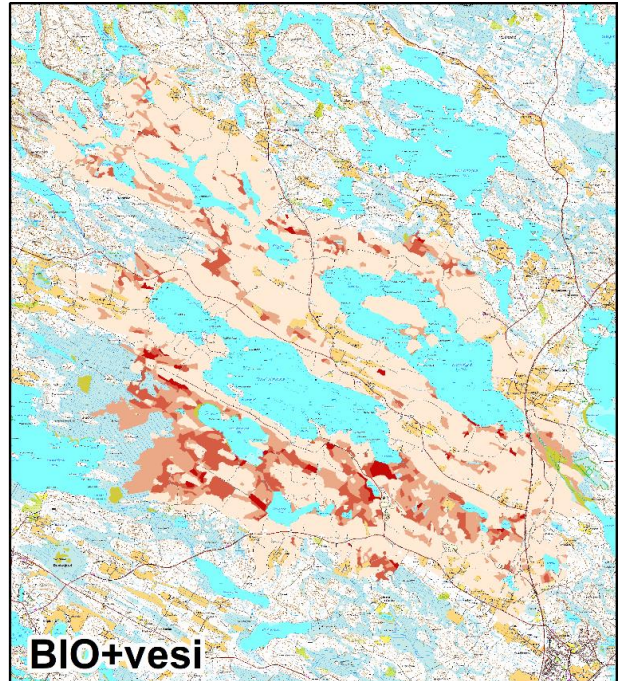
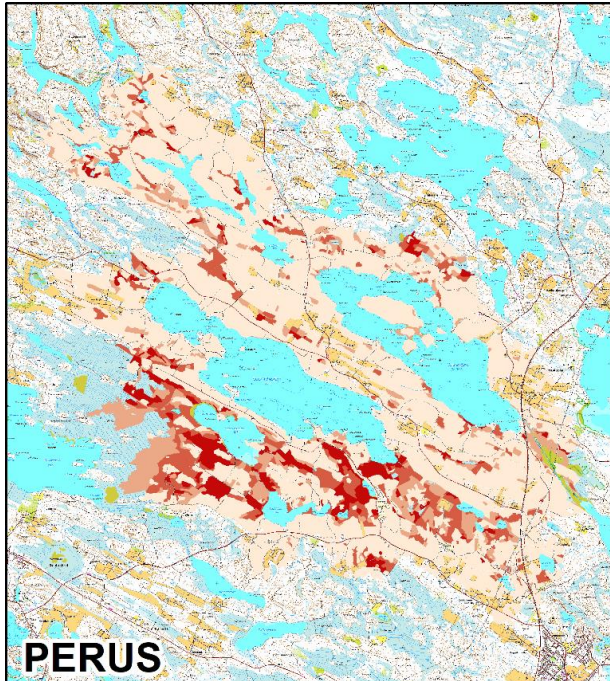
Ojien kunnostus nosti etenkin kiintoainekuormitusta BIO- JA HIILI-skenaarioissa verrattuna PERUS-skenaarioon (Kuva 18), mutta vaikutti myös fosfori- ja typpikuormitukseen (Kuva 17). Toisaalta pidemmät kiertoajat HIILI ja HIILI+vesi -skenaarioissa näyttivät vähentävän typpikuormitusta, mutta lisäävän fosforikuormitusta verrattuna PERUS-skenaarioon. Vastaava vaikutus näkyi myös BIO+vesi -skenaariossa siten, että fosforikuormitus ei vähentynyt suhteellisesti yhtä paljon kuin typpikuormitus.



Kuva 18. Kiintoainekuorma 50 vuoden tarkastelujaksolla Kuonanjoen skenaarioissa.

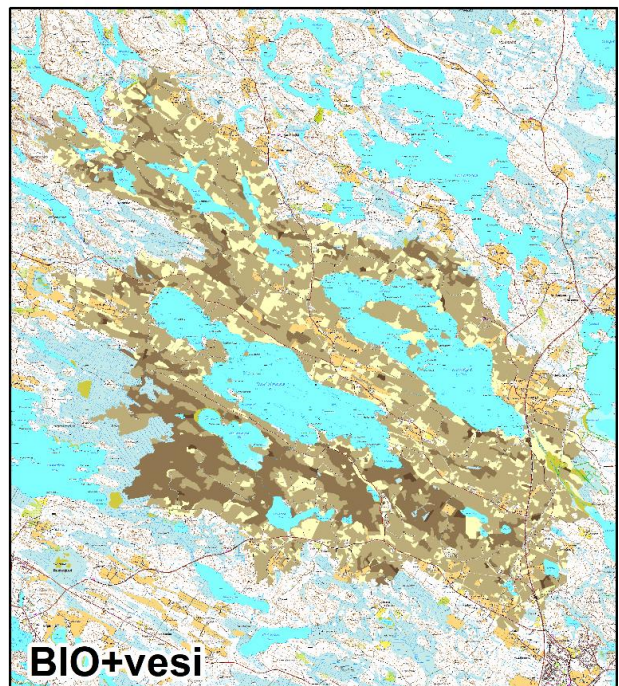
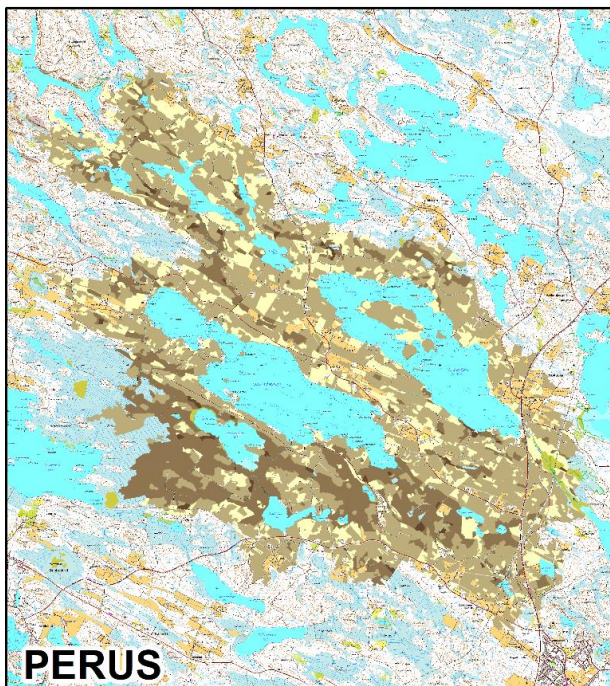
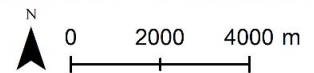
Kiintoainekuormitus ojitetuilta turvemailta PERUS-skenaariossa oli keskimäärin 80 140 kg/v joka on hieman yli puolet alueelta mitatusta kiintoainekuormasta (Tossavainen 2019). Suurin vähennys Kuonanjoella saatiin PERUS+vesi -skenaariossa, mikä tarkoittaa vuositasolla lähes 70 000 kg pienempää kiintoainekuormaa.

Kuva 19 havainnollistaa kartalla PERUS- ja BIO+vesi -skenaarioiden typpi- ja fosforikuormituksen. Eniten kuormittavat alueet erottuvat erityisesti typpikuormitusta tarkasteltaessa. BIO+vesi -skenaariossa kuormitusta eniten aiheuttavat alueet erottuivat edelleen vastaavasti kuin PERUS-skenaariossa, mutta niiltä tuleva kuormitus oli pienempää (Kuva 19). Fosforin kokonaiskuormitus laski BIO+vesi -skenaariossa, mutta kartan perusteella BIO+vesi -skenaariossa sellaisia kuvioita, joilla fosforin kuormitus on alle keskimääräisen taustakuorman, on hieman vähemmän kuin PERUS-skenaariossa.



Typnikuormitus kg/ha/vuosi

- alle keskimääräisen taustakuorman (<1.2)
- yli keskimääräisen taustakuorman (1.2-2.8)
- korkea kuormitus (2.8-4.4)
- erittäin korkea kuormitus (>4.4)



Fosforikuormitus kg/ha/vuosi

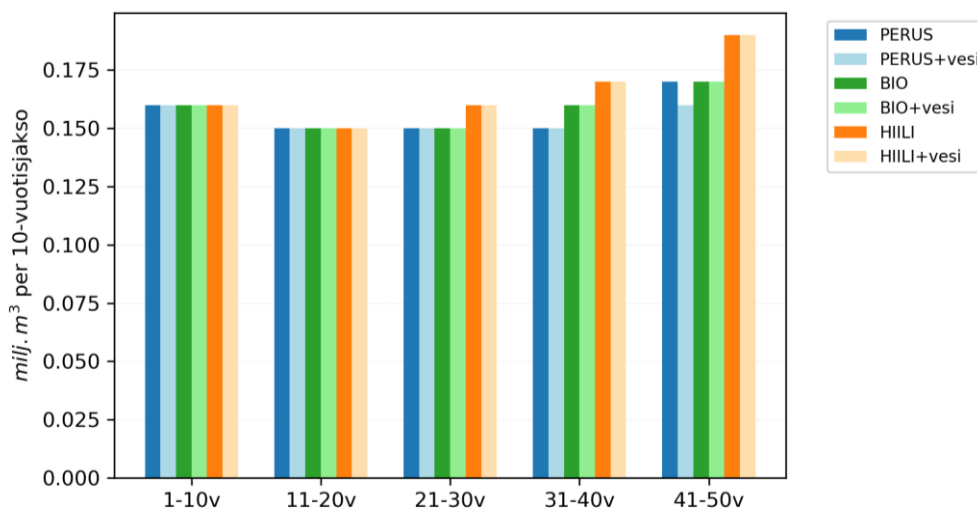
- alle keskimääräisen taustakuorman (<0.053)
- yli keskimääräisen taustakuorman (0.053-0.11)
- korkea kuormitus (0.11-0.54)
- erittäin korkea kuormitus >0.54

Kuva 19. Typen ja fosforin kuormitus PERUS ja BIO+vesi -skenaarioissa Kuonanjoella.

3.2. Sorvasranta

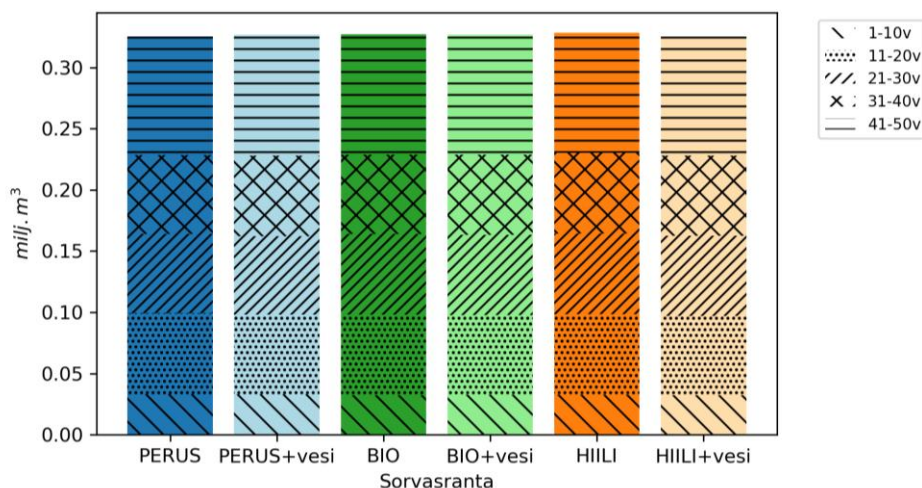
3.2.1. Puuntuotanto ja talous

Sorvasrannan metsien keskitilavuus oli tarkastelujakson alussa noin 141 m³/ha. Kaikissa skenaarioissa elävän puuston määrä (runkotilavuus) aluksi laski, mutta alkoi sitten nousta, nopeimmin HIILI-skenaariossa. Kaikissa skenaarioissa puustoa oli viimeisellä 10-vuotijaksolla enemmän kuin alussa, PERUS- ja BIO-skenaarioissa noin 6 % ja HIILI-skenaariossa noin 19 % enemmän (Kuva 20). HIILI-skenaariossa puuston tilavuus kasvoi eniten, ollen viimeisellä 10-vuotijaksolla noin 12 % suurempi kuin PERUS-skenaariossa vastaavana ajankohtana. "+vesi"-vaihtoehdoissa puuston kehitys ei juurikaan poikennut alkuperäisistä.

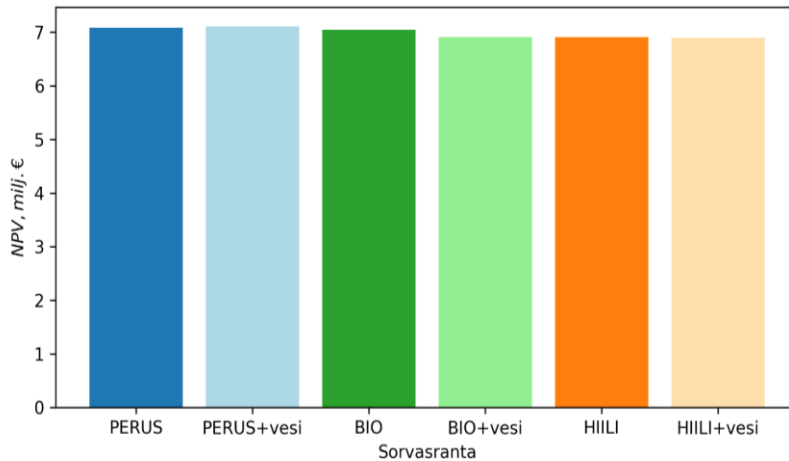


Kuva 20. Elävän puuston tilavuus Sorvasrannan skenaarioissa.

Sorvasrannalla tasaisten hakkuiden tavoite (6 600 m³/v) skenaarioiden kesken toteutui hyvin (erot alle 1 %) (Kuva 21). Erot nettotulojen nykyarvossa johtuivat muutoksista toimenpiteiden ajoituksissa ja kohdentumisissa sekä kertymän puutavaralajirakenteesta ja jäivät pieniksi (enimmillään nettotulot jäivät noin 3 % alemmaksi HIILI+vesi -skenaariossa verrattuna PERUS-skenaarioon) (Kuva 22).



Kuva 21. Hakuukertymät Sorvasrannan skenaarioissa.



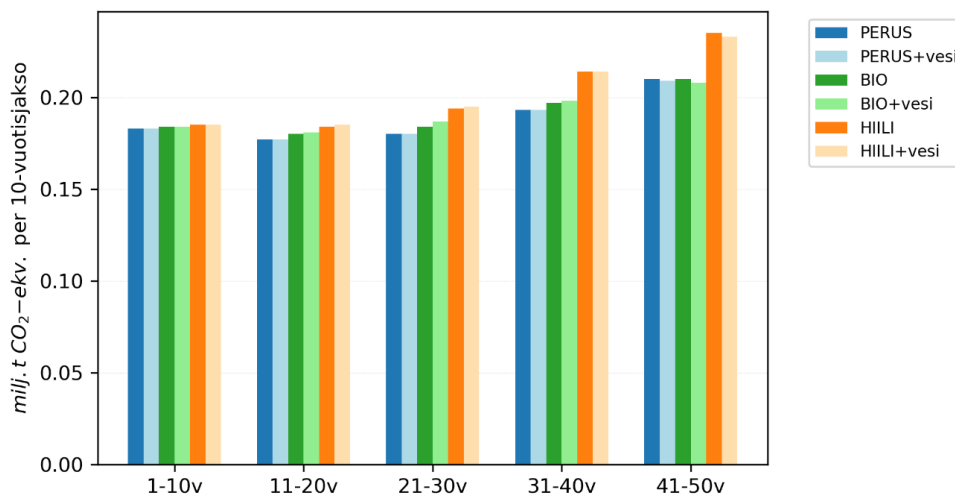
Kuva 22. Nettotulojen nykyarvo (50 v., 3 %) Sorvasrannan skenaarioissa.

3.2.2. Hiilivarastot

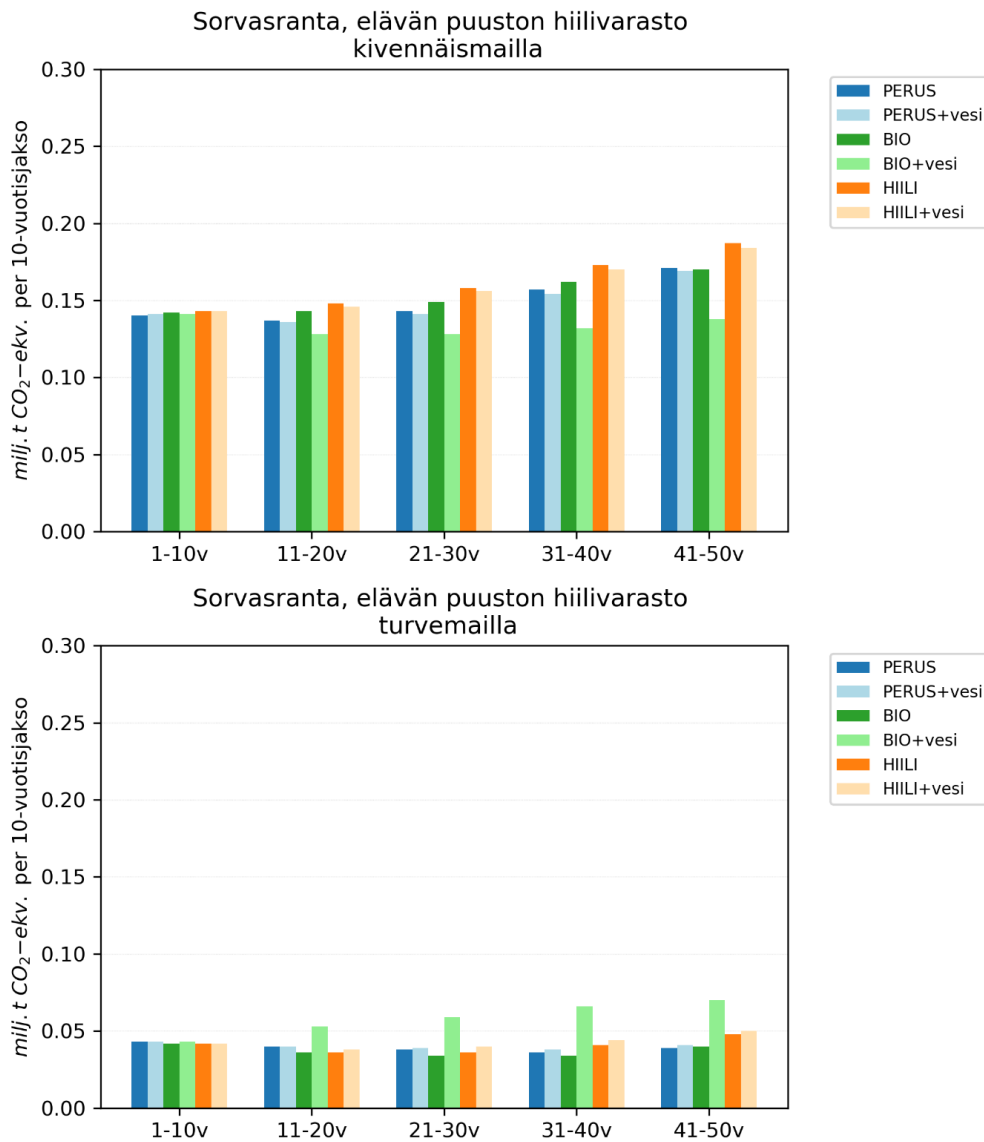
Alussa Sorvasrannan metsien puuston hiilivarasto oli keskimäärin 165 tn/ha (CO₂-ekv). Suurin elävän puuston hiilivarasto syntyi HIILI- ja HIILI+vesi -skenaarioissa, joissa varastot olivat viimeisellä 10-vuotiskaudella 11–12 % suuremmat kuin PERUS-skenaariossa vastaavana ajankohtana (Kuva 23). BIO-skenaario tuotti samansuuruisen hiilivaraston kuin PERUS-skenaario.

Sorvasrannan ”+vesi” -skenaarioiden elävän puuston tilavuus ja hiilivarasto eivät juurikaan eronneet verrokkiskenaarioistaan (Kuva 23). BIO+vesi -skenaariossa elävän puuston hiilivaraston kasvu painottui turvemaille johtuen muutoksista hakkuutavoissa ja hakkuiden kohdentumisessa, mutta HIILI+vesi -skenaariossa ero ei ollut niin selvä (Kuva 24).

Sorvasrannan alueella kaikki skenaariot olivat puuston hiilivarastoa kasvattavia nieluja (pl. PERUS- ja BIO-skenaarioiden pieni notkahdus alussa). Kun tarkastellaan koko 50 vuoden jaksoa kokonaisuutena, elävään puustoon sitoutuvan hiilen määrä kasvoi 14–27 % (Kuva 23).

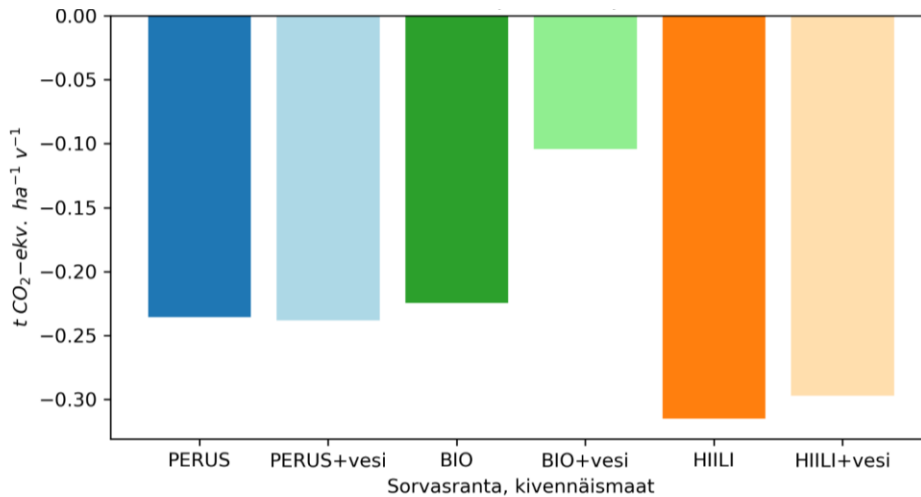


Kuva 23. Elävän puuston hiilivarasto Sorvasrannan skenaarioissa.

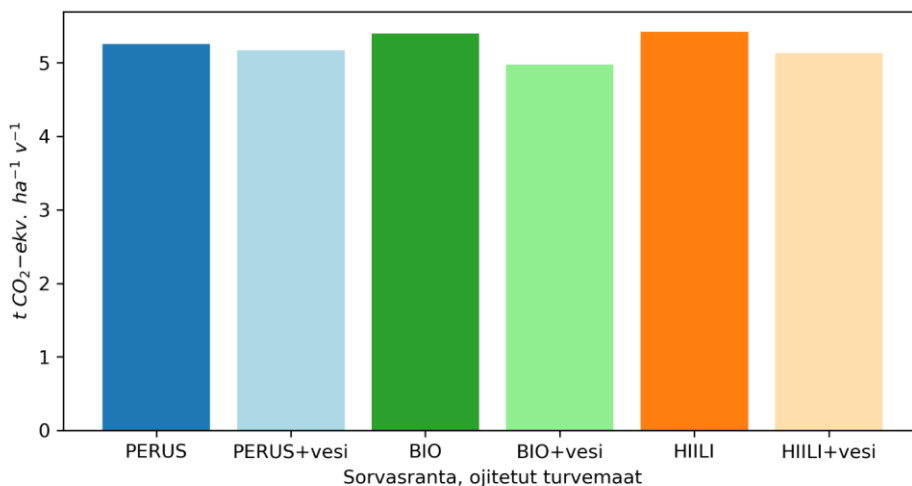


Kuva 24. Elävän puuston hiilivaraston kehitys kivennäismailla ja turvemaidella Sorvasrannan skenaarioissa.

Sorvasrannalla kivennäismaat olivat hiilen nieluja (Kuva 25). Koko 50 vuoden tarkastelujaksolla hiiltä kertyi kivennäismaahan vähiten BIO+vesi -skenaariossa (-56 % PERUS-skenaarioon verrattuna) ja eniten HIILI-skenaariossa (34 % PERUS-skenaarioon verrattuna). BIO+vesi ja HIILI+vesi -skenaarioiden nielujen pieneneminen oli seurausta hakkuiden kohdentumisesta enemmän kivennäismaalle. Turvemaiden maaperästä hiiltä vapautui melko paljon, mutta skenaarioiden väliset erot olivat pieniä (Kuva 26.). Vähiten hiiltä vapautui turvemaidella BIO+vesi -skenaariossa.

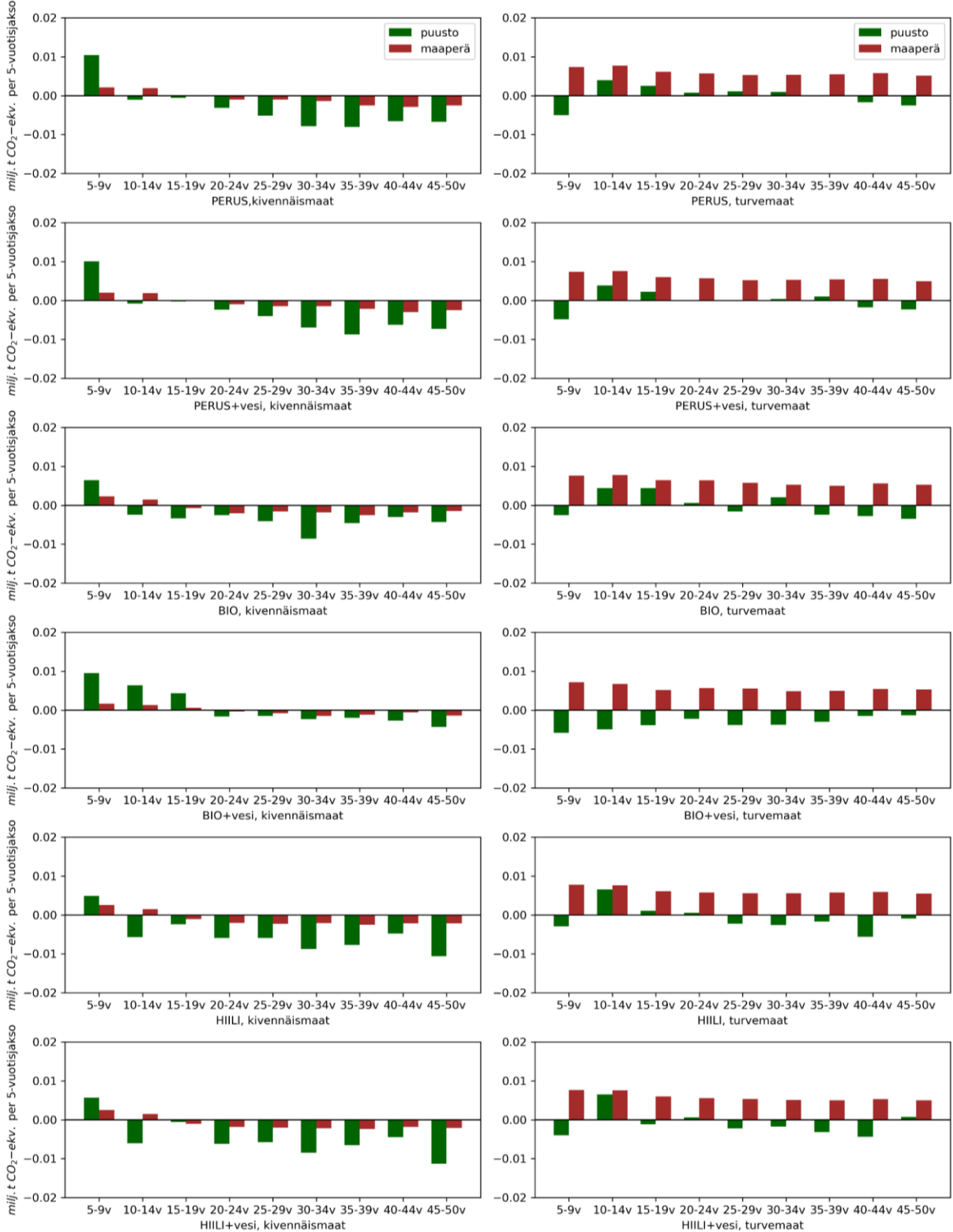


Kuva 25. Kivennäismaiden maaperän hiilitase 50 vuoden tarkastelujaksolla Sorvasrannan skenaarioissa.



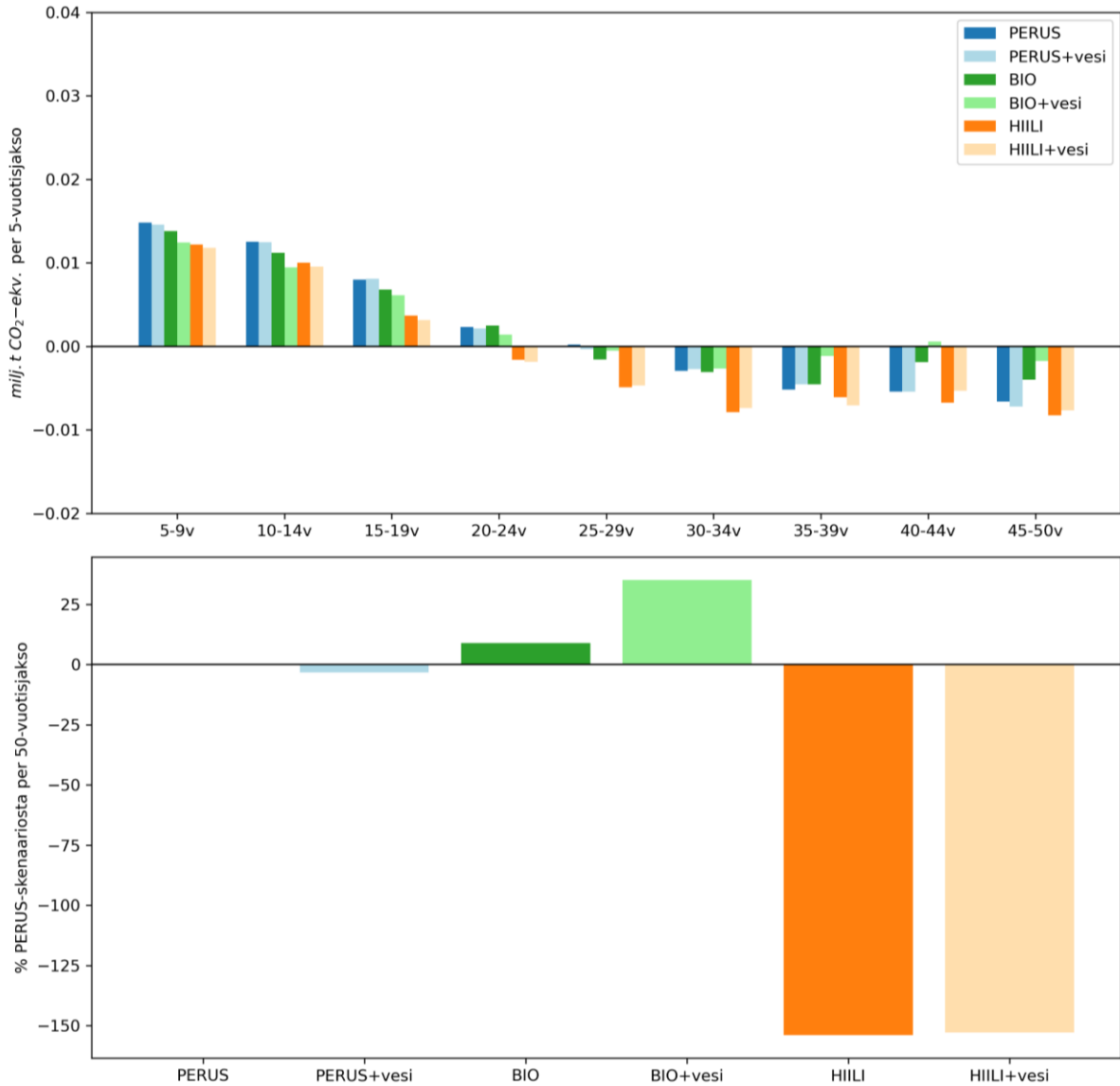
Kuva 26. Ojitettujen turvemaiden maaperän hiilitase 50 vuoden tarkastelujaksolla Sorvasrannan skenaarioissa.

Kuva 27 havainnollistaa hiilivarastojen muutoksia 50 vuoden tarkastelujakson aikana erikseen elävissä puustossa ja maaperässä sekä erikseen kivennäis- ja turvemaille. Siitä nähdään erityisesti turvemaiden maaperän päästölähde sekä puuston hiilinielun kohdentuminen HIIILI-skenaariossa kivennäismaille sekä jonkin verran BIO+vesi skenaariossa turvemaille.



Kuva 27. Puuston ja maaperän hiilitaseen muutos 5-vuotiskauskoittain Sorvasrannan skenaarioissa.

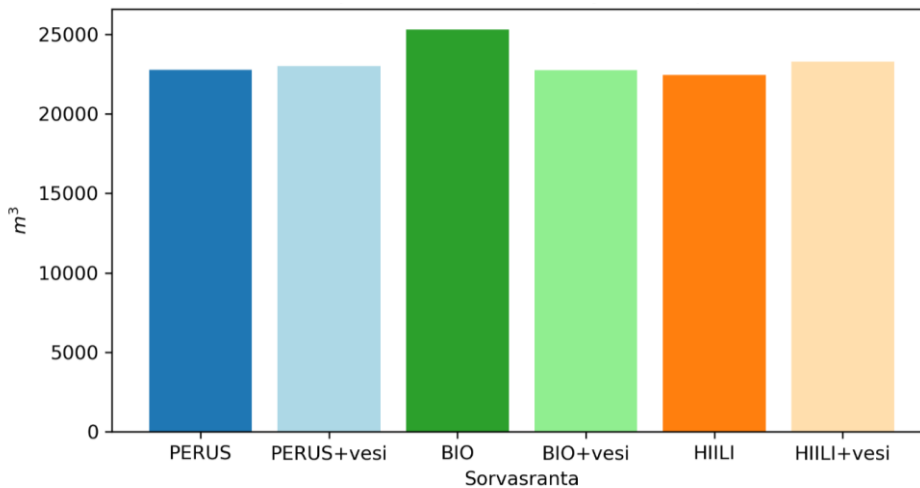
Sorvasrannan metsien hiilitase (elävä puusto + maaperä, kivennäis- ja turvemaat) oli alussa positiivinen (päästö), mutta kääntyi tarkastelujakson puoliväliin mennessä nieluksi kaikissa skenaarioissa. Keskimäärin BIO- ja BIO+vesi tuottivat hieman PERUS-skenaariota heikommän tuloksen, mutta HIILI-skenaariot tuottivat selvästi paremman tuloksen (yli 150 % PERUS-skenaarioon verrattuna; Kuva 28.).



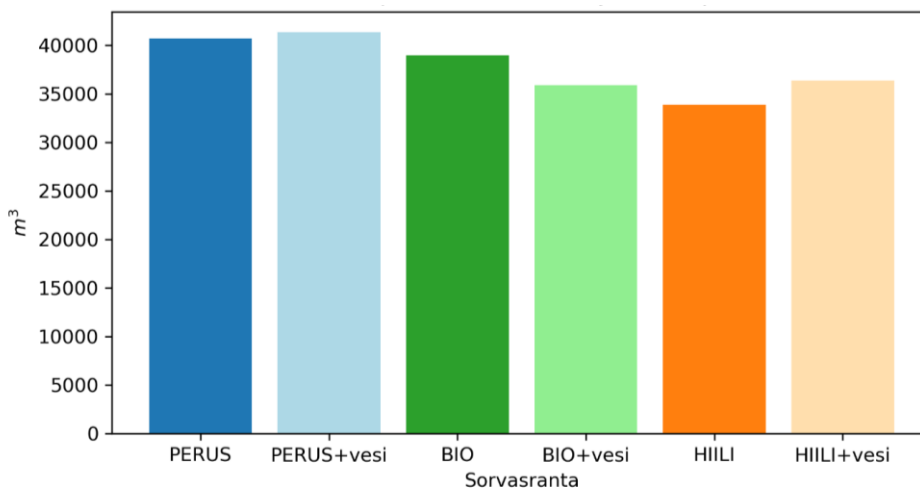
Kuva 28. Hiilitase 5-vuotiskauskoittain ja muutosten yhteenveto 50 vuoden tarkastelujaksolta verrattuna PERUS-skenaarioon Sorvasrannan skenaarioissa.

3.2.3. Monimuotoisuus

Sorvasrannan metsissä oli tarkastelujakson alussa lehtipuuta keskimäärin noin 13 m³/ha. BIO-skenaariossa saatiin 50 vuoden aikana lisättyä lehtipuustoa metsiin noin 11 % enemmän verrattuna PERUS-skenaarioon, mutta BIO+vesi -skenaariossa lehtipuumäärä jäi samalle tasolle muiden skenaarioiden kanssa (Kuva 29). Sorvasrannan skenaarioissa 50 vuoden aikana kertynyt kuolleen puun määrä oli suurin PERUS- ja PERUS+vesi skenaarioissa ja jäi muissa 4–18 % pienemmäksi (Kuva 30). Tämä johtuu siitä, että BIO- ja HIILI-skenaarioissa tehtiin enemmän harvennuksia PERUS-skenaarioon verrattuna, mikä vähensi kuolleisuutta.



Kuva 29. Lehtipuuston tilavuus 50 vuoden tarkastelujakson lopussa Sorvasrannan skenaarioissa.

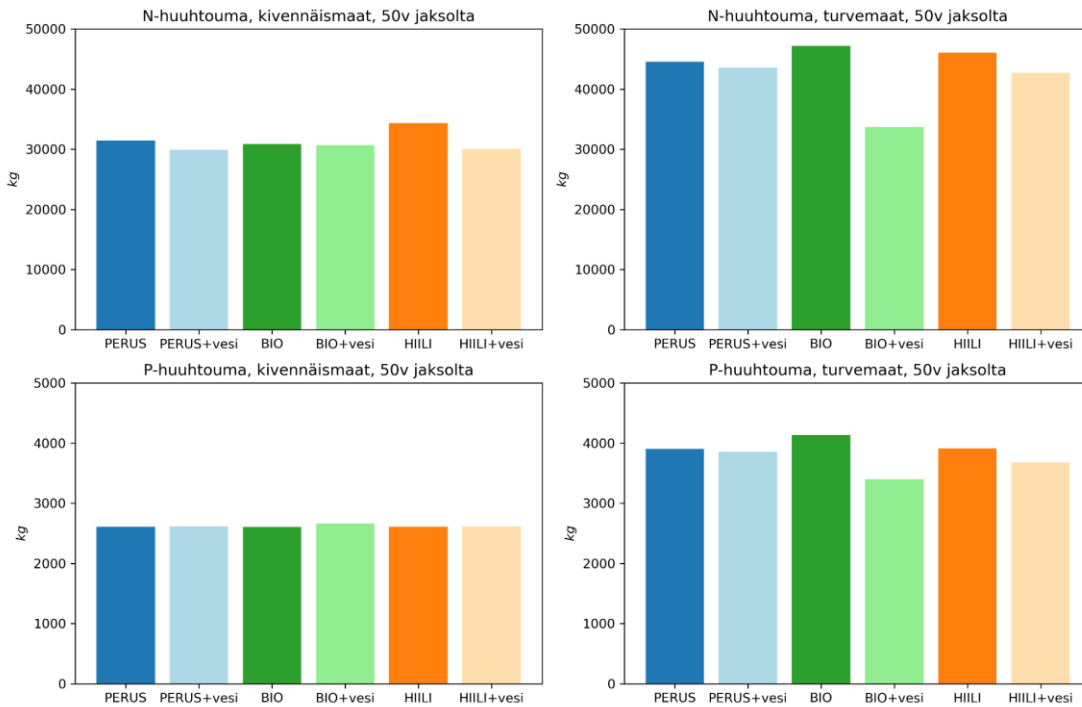


Kuva 30. Kuolleen puun kertymä 50 vuoden tarkastelujakson lopussa Sorvasrannan skenaarioissa.

3.2.4. Vesistökuormitus

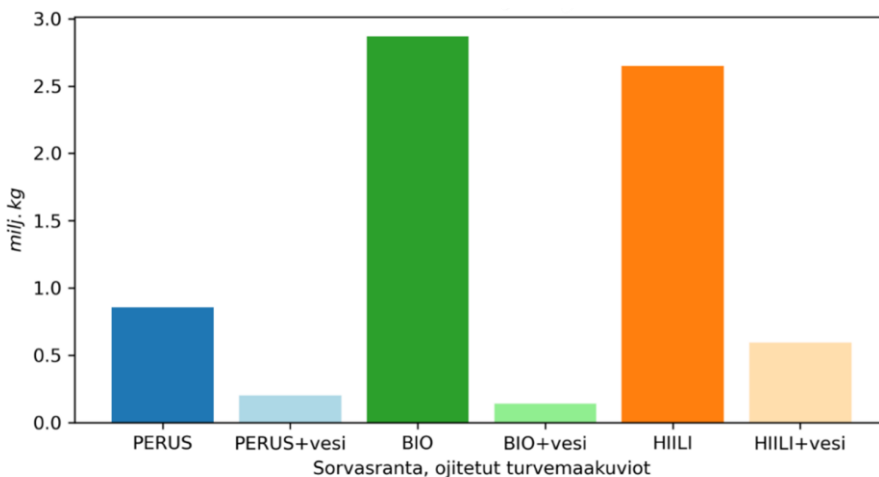
Sorvasrannan alueella vesistökuormitus oli yleisesti pienempi "+vesi" -skenaarioissa ja eniten sekä typpi- että fosforikuormitus pieneni BIO+vesi -skenaariossa (Kuva 31). Kivennäismailla lähinnä lannoitukset aiheuttivat eroja typpikuormituksessa skenaarioiden välillä. Turvemaiden kuormitus oli Sorvasrannalla kaikissa skenaarioissa suurempaa kuin kivennäismaiden, vaikka turvemaita on valuma-alueen metsiköistä vain 22 %.

Ojien kunnostukset nostivat typpi- ja fosforikuormitusta BIO- ja HIILI-skenaarioissa verrattuna PERUS-skenaarioon (Kuva 31). Kunnostusten välttäminen BIO+vesi ja HIILI+vesi -skenaarioissa puolestaan laskee kuormitusta. Samalla kuitenkin pidemmät kiertoajat BIO+vesi -skenaariossa lisäsivät fosforikuormitusta, jolloin fosforikuormituksen prosentuaalinen vähennys jäi selvästi pienemmäksi kuin typpikuormituksella.



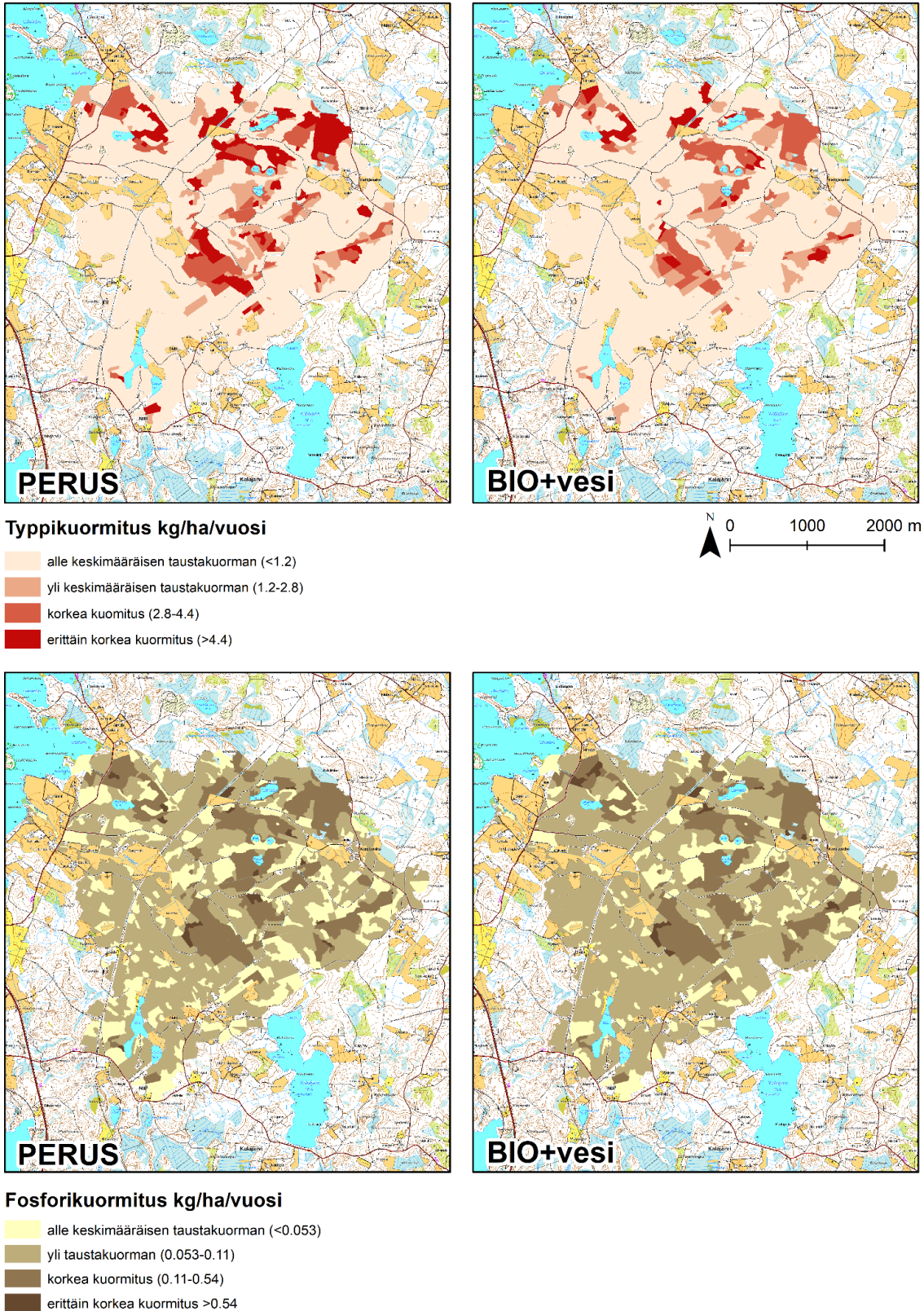
Kuva 31. Ravinnekuormituksen kokonaismäärät (kg) 50 vuoden tarkastelujaksolta Sorvasrannan skenaarioissa.

Ojien kunnostuksen välttäminen "+vesi" -skenaarioissa pienensi merkittävästi kiintoainekuormaa ja eniten vähennystä ilmeni BIO+vesi -skenaariossa (Kuva 32.). PERUS-skenaarioiden keskimääräisestä vuosittaisesta kiintoainekuormasta (17 100 kg/v) tämä tarkoittaa erittäin merkittävää 14 300 kg suuruista vähennystä kiintoainekuormaan.



Kuva 32. Kiintoainekuorma 50 vuoden tarkastelujaksolla Sorvasrannan skenaarioissa.

Kuva 33 havainnollistaa kartalla PERUS- ja BIO+vesi -skenaarioiden vesistökuormitusten erot. Eniten kuormittavat alueet erottuvat erityisesti typen osalta. Typen kuormitus selkeästi laskee alueilla, joissa se PERUS-skenaariossa on korkea. Fosforin kokonaiskuormitus laskee, mutta yleinen kuormitustaso on taustakuormaa suurempi useammalla kuviolla kuin PERUS-skenaariossa.

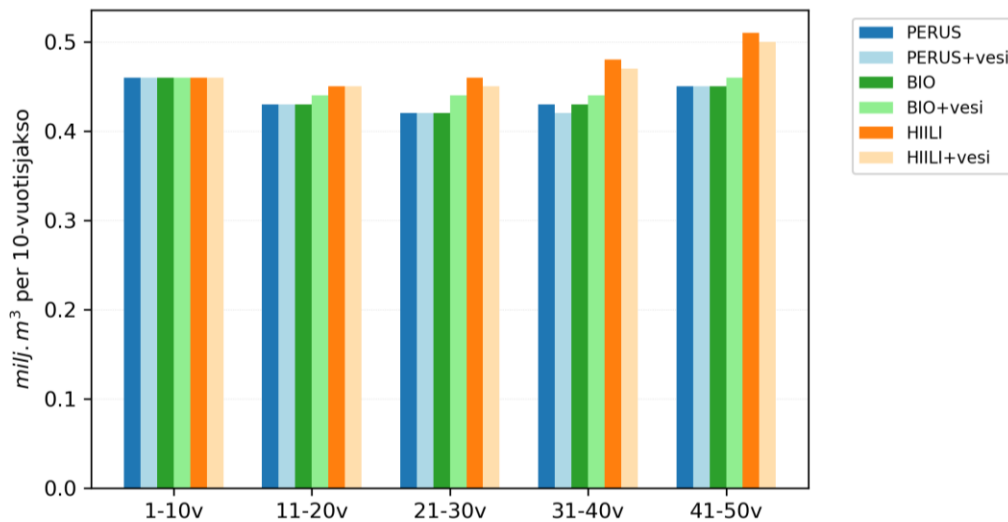


Kuva 33. Typen ja fosforin kuormitus PERUS ja BIO+vesi skenaarioissa Sorvasrannalla.

3.3. Hälvänjoki

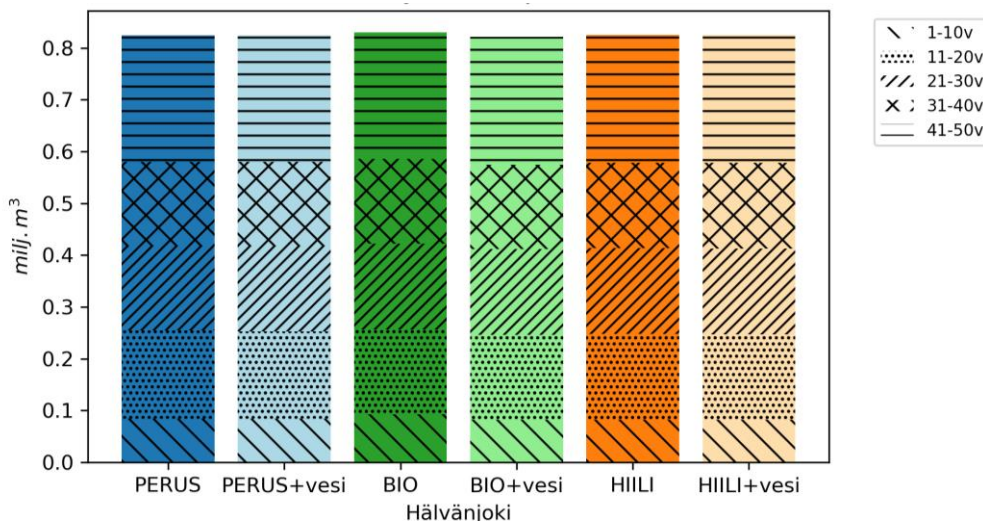
3.3.1. Puuntuotanto ja talous

Hälvänjoen metsien keskitilavuus oli tarkastelujakson alussa noin 165 m³/ha. Kaikissa skenaarioissa elävän puuston määrät (runkotilavuudet) laskivat toisella kymmenvuotiskaudella, mutta alkoivat sitten nousta, ollen viimeisellä 10-vuotisjaksolla samalla tasolla tai suurempia kuin ensimmäisellä (Kuva 34). HIILI-skenaariossa puuston tilavuus kasvoi eniten, ollen viimeisellä 10-vuotisjaksolla noin 13 % suurempi kuin PERUS-skenaariossa vastaavana ajankohtana.

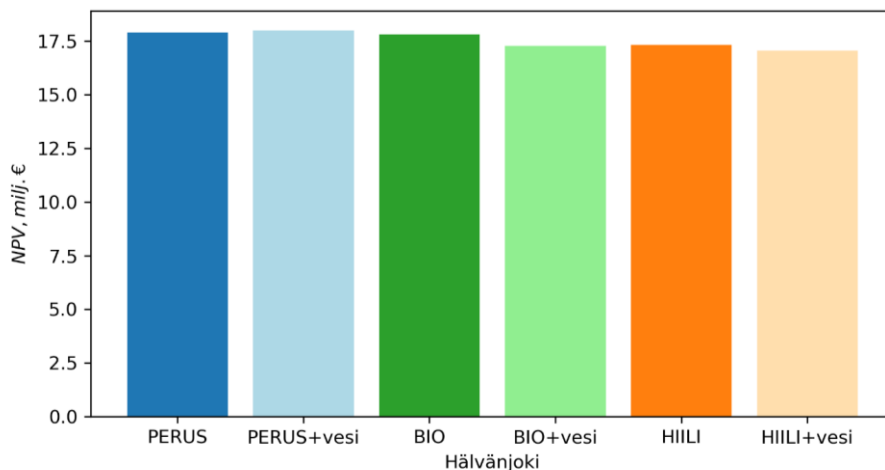


Kuva 34. Elävän puuston tilavuus Hälvänjoen skenaarioissa.

Hälvänjoella tasaisten hakkuiden tavoite (16 700 m³/v) skenaarioiden kesken toteutui hyvin (erot alle 1 %) (Kuva 35). Erot nettotulojen nykyarvossa johtuivat muutoksista toimenpiteiden ajoituksissa ja kohdentumisissa sekä kertymän puutavaralajirakenteesta ja jäivät pieniksi (enimmillään nettotulot jäivät noin 5 % alemmaksi HIILI+vesi -skenaariossa verrattuna PERUS-skenaarioon). BIO+vesi ja HIILI+vesi -skenaarioiden nettotulot olivat 2–3 % alemmat kuin verrokkiskenaarioissa BIO ja HIILI (Kuva 36).



Kuva 35. Hakuukertymät Hälvänjoen skenaarioissa.

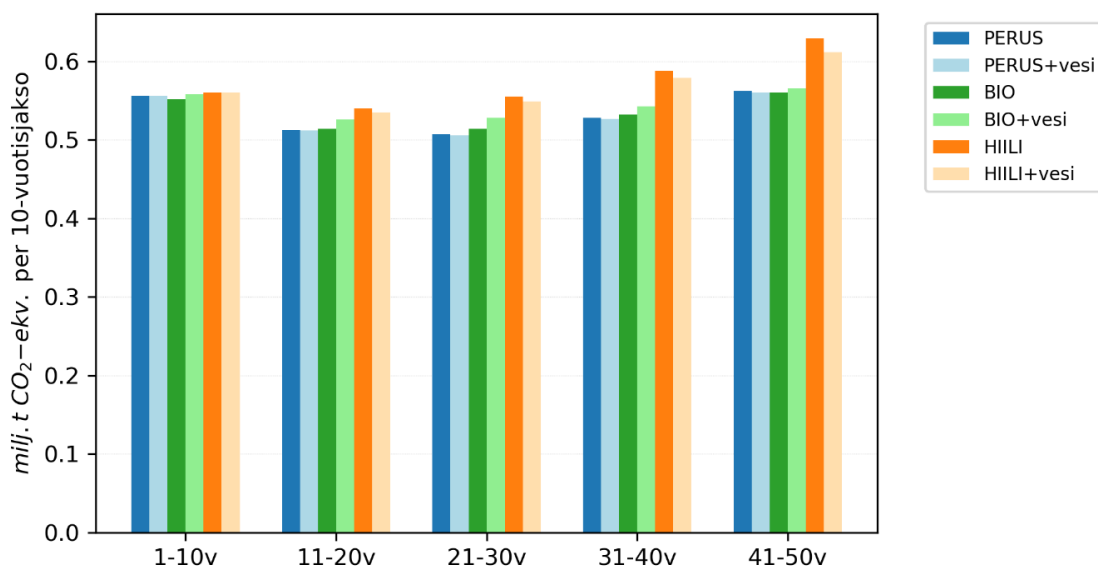


Kuva 36. Nettotulojen nykyarvo (50 v., 3 %) Hälvänjoen skenaarioissa.

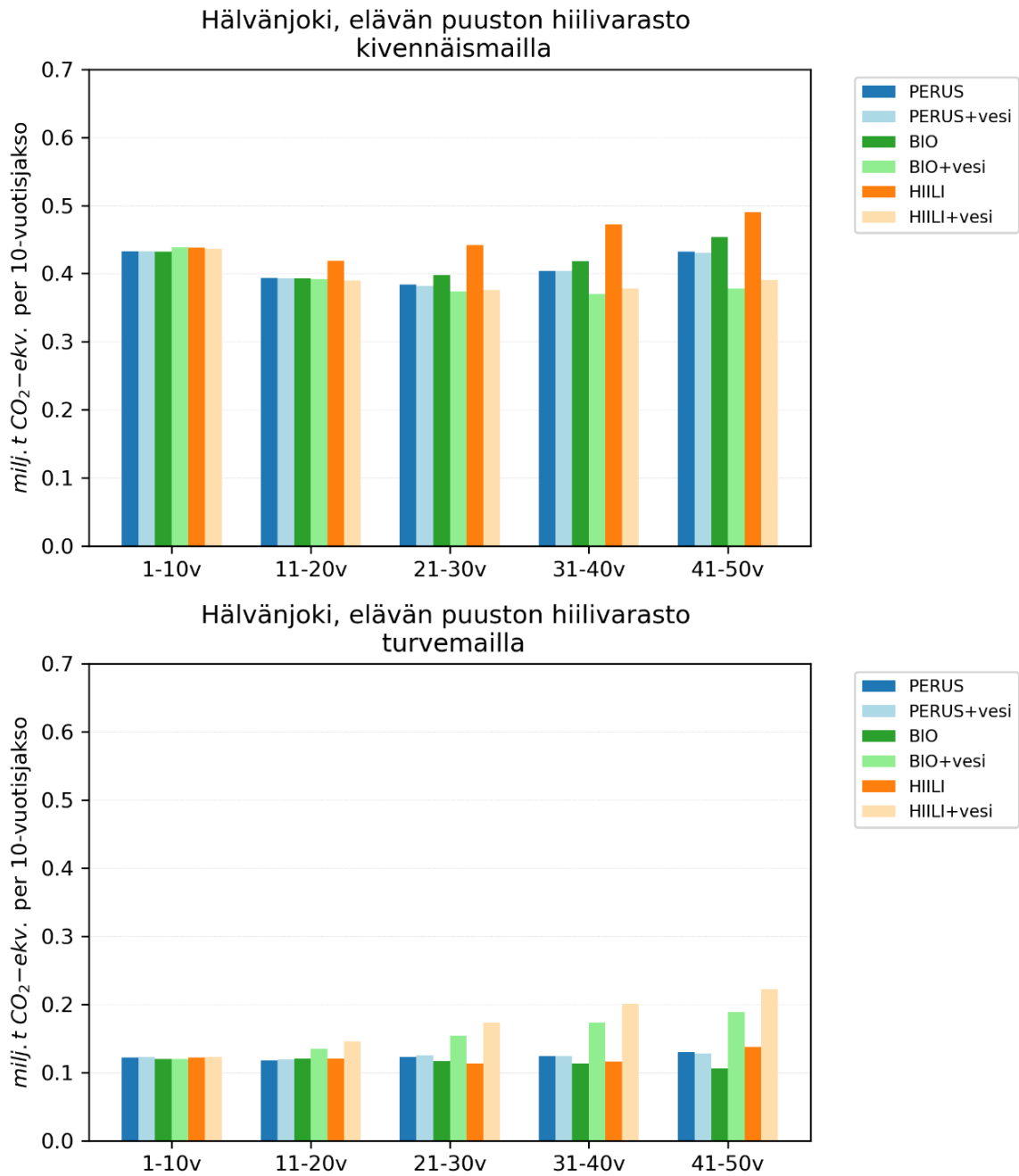
3.3.2. Hiilivarastot

Alussa Hälvänjoen metsien puuston hiilivarasto oli keskimäärin 200 tn/ha (CO₂-ekv). Suurin elävän puuston hiilivarasto syntyi HIILI-skenaarioissa 50 vuoden aikana, vaikka aluksi hiilivarastot pienenevät kaikissa skenaarioissa. Elävän puuston hiilivarasto oli viimeisellä 10-vuotiskaudella 12 % suurempi HIILI-skenaariossa kuin PERUS-skenaariossa vastaavana ajankohtana (Kuva 37.) saavuttaen noin 220 tn/ha (CO₂-ekv). BIO-skenaario tuotti samansuuruisen hiilivaraston kuin PERUS-skenaario. HIILI+vesi -skenaarion elävän puuston hiilivarasto jäi hieman pienemmäksi kuin HIILI-skenaarion (Kuva 37). Hälvänjoen alueella sekä PERUS-skenaario että BIO-skenaario johtivat aluksi elävän puuston hiilivaraston alenemiseen, mutta 50 vuoden tarkastelujaksolla ne kuitenkin päätyvät nieluiksi (noin 1–2 %).

Hiilivaraston muutokset kivennäismailla ja turvemilla olivat vastakkaiset (Kuva 38), ja vesien suojeleminen, ml. hakkuiden kohdentuminen, pienensivät hiilivarastoa kivennäismailla (enemmän hakkuita), mutta kasvattivat sitä turvemilla (vähemmän hakkuita).

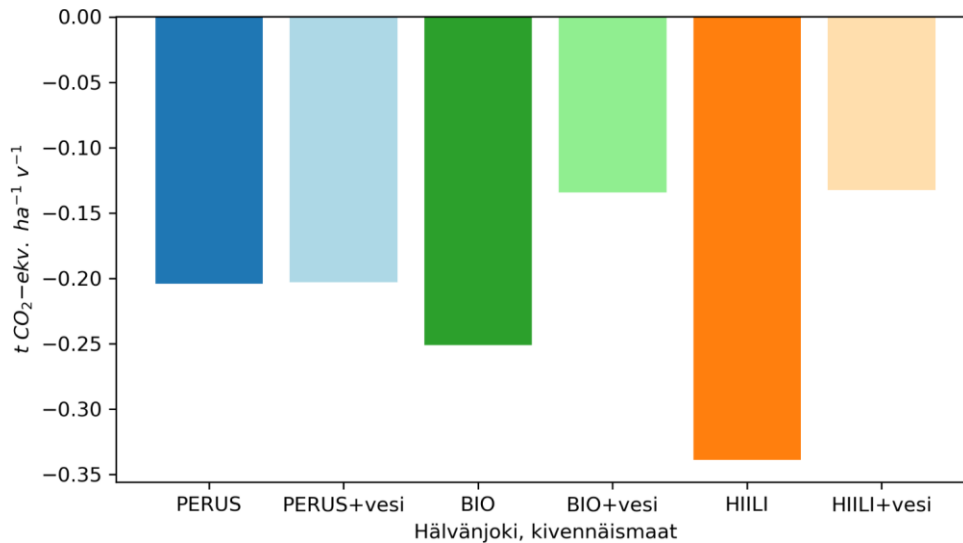


Kuva 37. Elävän puuston hiilivaraston kehitys Hälvänjoen skenaarioissa.

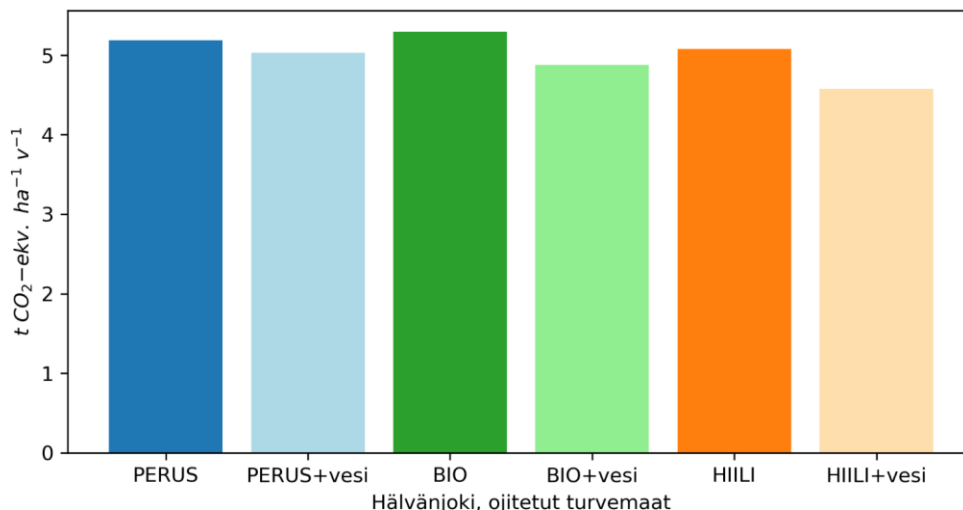


Kuva 38. Elävän puuston hiilivaraston kehitys kivennäismailla ja turvemailla Hälvänjoen skenaarioissa.

Hälvänjoella kivennäismaat olivat hiilen nieluja (Kuva 39). Koko 50 vuoden tarkastelujaksolla hiiltä kertyi kivennäismaahan eniten BIO- ja HIILI-skenaarioissa (23 % ja 66 % PERUS-skenaarioon verrattuna) ja vastaavasti vähiten BIO+vesi ja HIILI+vesi -skenaarioissa (-34 % ja -35 % PERUS-skenaarioon verrattuna). BIO+vesi ja HIILI+vesi -skenaarioissa hakkuita kohdentui enemmän kivennäismaille pienentäen niiden nieluja. Turvemaiden maaperästä hiiltä vapautui melko paljon, skenaarioiden välisten erojen jäädessä pieniksi (Kuva 40). Vähiten hiiltä vapautui turvemailla HIILI+vesi -skenaariossa.



Kuva 39. Kivennäismaiden maaperän hiilitase 50 vuoden tarkastelujaksolla Hälvänjoen skenaarioissa.



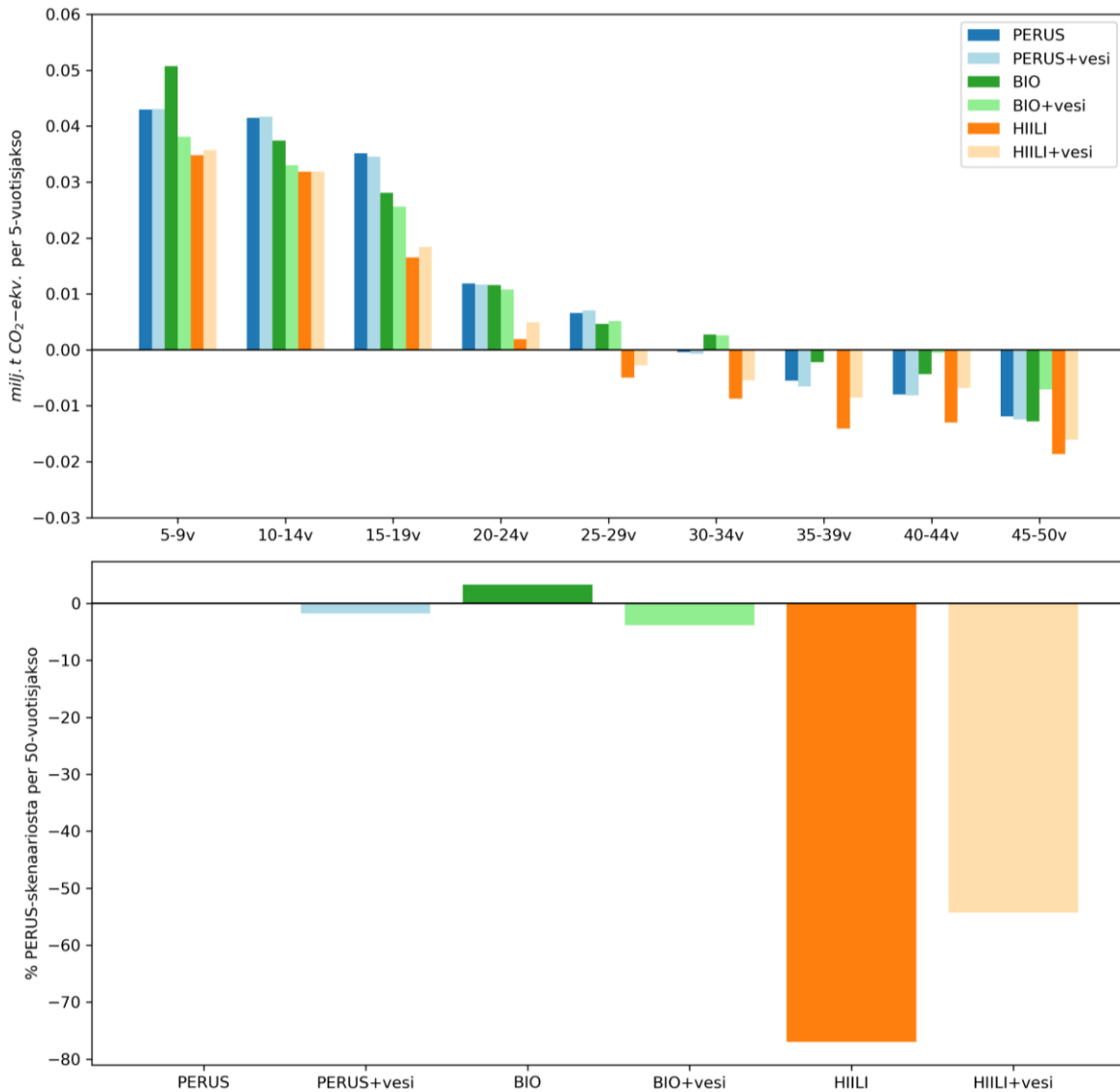
Kuva 40. Ojitettujen turvemaiden maaperän hiilitase 50 vuoden tarkastelujaksolla Hälvänjoen skenaarioissa.

Kuva 41 havainnollistaa hiilivarastojen muutoksia 50 vuoden tarkastelujakson aikana erikseen elävissä puustossa ja maaperässä sekä erikseen kivennäis- ja turvemaille. Siitä nähdään erityisesti turvemaiden maaperän päästölähde sekä puuston hiilinielun kohdentuminen jonkin verran HIIII-skenaariossa kivennäismaille sekä HIIII+vesi ja BIO+vesi skenaarioissa turvemaille.



Kuva 41. Puuston ja maaperän hiilitaseen muutos 5-voottisjaksoittain Hälvänjoen skenaarioissa.

Hälvänjoen metsien hiilitase (elävä puusto + maaperä, kivennäis- ja turvemaat) oli alussa positiivinen (päästö), mutta kääntyi tarkastelujakson puoliväliin mennessä nieluksi kaikissa skenaarioissa. Keskimäärin BIO- ja BIO+vesi skenaarioiden tase jäi PERUS-skenaariota tasolle, mutta HIILI-skenaariot tuottivat selvästi paremman tuloksen (-77 % PERUS-skenaarioon verrattuna (Kuva 42).

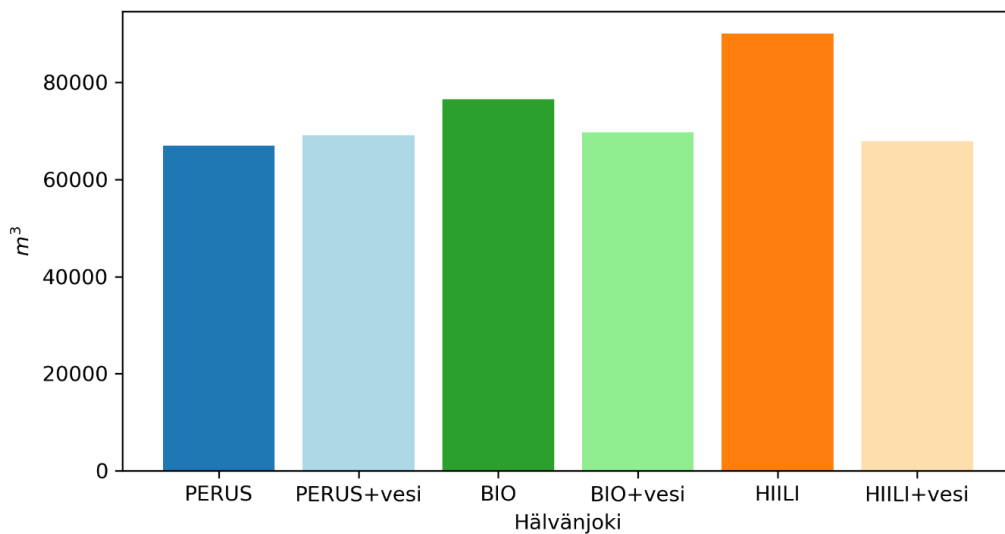


Kuva 42. Hiilitase 5-vuotisjaksoittain ja muutosten yhteenveto 50 vuoden tarkastelujaksoilta verrattuna PERUS-skenaarioon Hälvänjoen skenaarioissa.

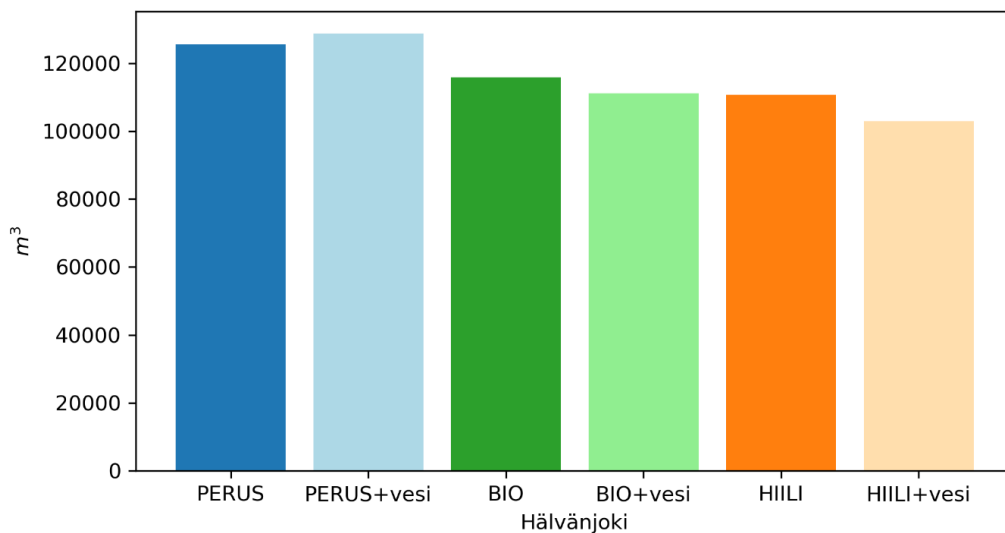
3.3.3. Monimuotoisuus

Hälvänjoen metsissä oli tarkastelujakson alussa lehtipuuta keskimäärin noin 25 m³/ha. BIO-skenaariossa saatiin 50 vuoden aikana lisättyä lehtipuustoa metsiin noin 14 % ja HIILI-skenaariossa noin 35 % enemmän kuin PERUS-skenaariossa (Kuva 43), mutta näiden "+vesi" -vaihtoehtoissa jäätiin samalle tasolle PERUS-skenaarioiden kanssa. HIILI-skenaarioiden BIO-skenaariota suurempi lehtipuumäärä on seurausta hakkuiden kohdentumisesta puustoltaan erilaisiin metsiin.

Hälvänjoen skenaarioissa 50 vuoden aikana kuollutta puuta kertyi eniten PERUS- ja PERUS+vesi skenaarioissa, muissa skenaarioissa 8–20 % vähemmän (Kuva 44). BIO- ja HIILI-skenaarioiden runsaammat harvennushakkuumäärät vähensivät kuolleisuutta PERUS-skenaarioon verrattuna.



Kuva 43. Lehtipuuston tilavuus 50 vuoden tarkastelujakson lopussa Hälvänjoen skenaarioissa.

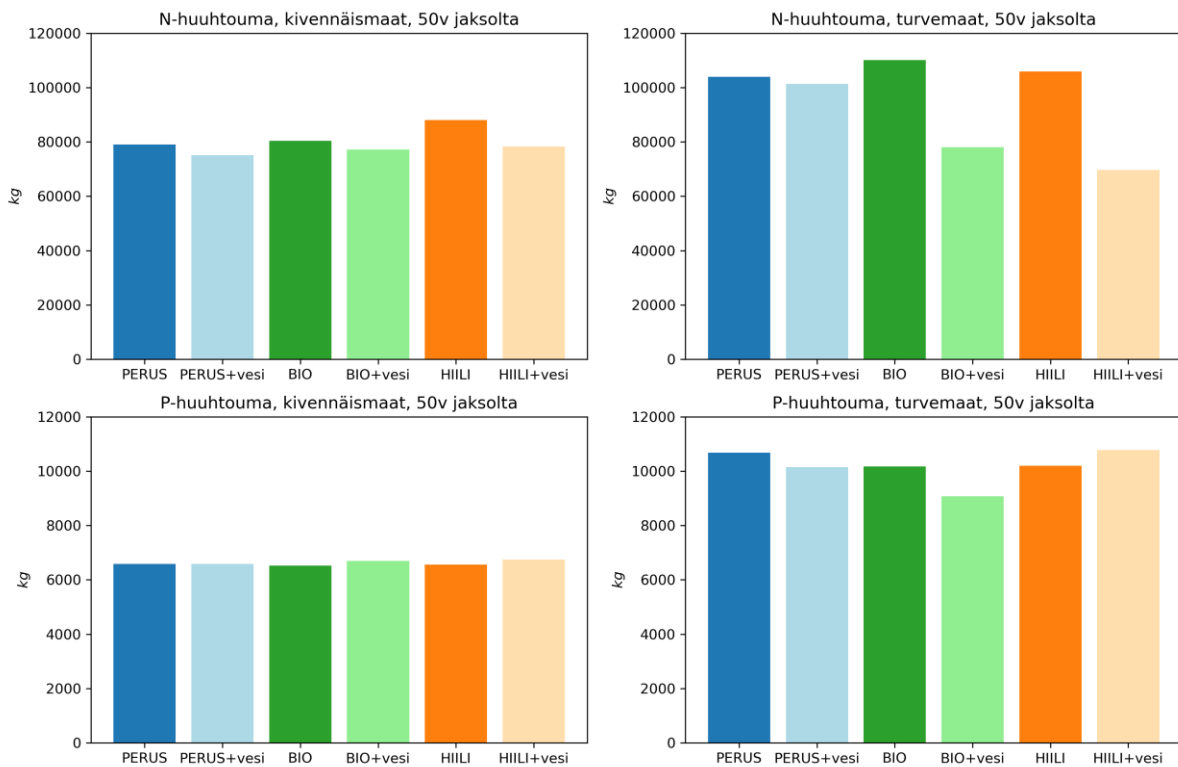


Kuva 44. Kuolleen puun kertymä 50 vuoden tarkastelujakson lopussa Hälvänjoen skenaarioissa.

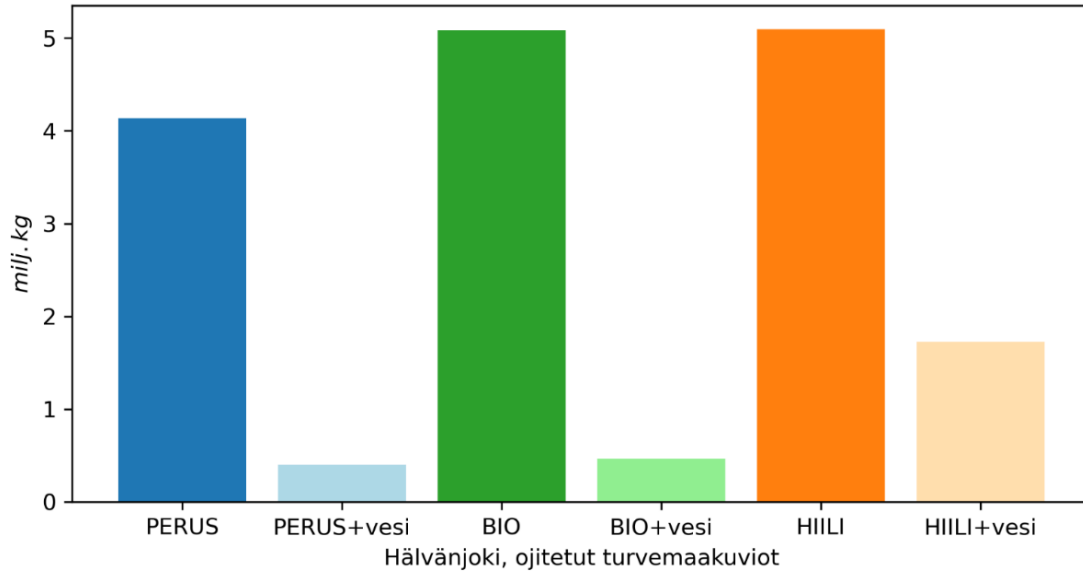
3.3.4. Vesistökuormitus

Hälvänjoen kaikissa "+vesi" -skenaarioissa typpekuormitus oli pienempi kuin verrokkiskenaariossa, mutta fosforikuormitus oli sekä kivennäis- että turvemaidella esimerkiksi HIILI+vesi -skenaariossa korkeampi kuin verrokkiskenaariossa (Kuva 45). Kivennäismailla lähinnä lannoitukset näkyivät skenaarioiden välisinä eroina typpekuormituksessa. Hälvänjoella turvemaiden kuormitus on lähes kaikissa skenaarioissa suurempaa kuin kivennäismaiden, vaikka turvemaita on valuma-alueen metsiköistä vain 22 %.

Ojia kunnostettiin BIO- ja HIILI-skenaarioissa enemmän ja "+vesi" -skenaarioissa vähemmän kuin PERUS-skenaariossa, mikä näkyi selvästi kiintoainekuormissa (Kuva 46) ja vaikutti myös turvemaiden typpi- ja fosforikuormiin (Kuva 45). Pidemmät kiertoajat BIO+vesi ja HIILI+vesi -skenaarioissa vähensivät typpekuormitusta, mutta lisäsivät fosforikuormitusta. HIILI+vesi -skenaariossa fosforikuormitus kasvoi niin voimakkaasti, että pienemmistä ojien kunnostuspinta-aloista huolimatta fosforikuormitus oli samaa suuruusluokkaa kuin PERUS-skenaariossa.



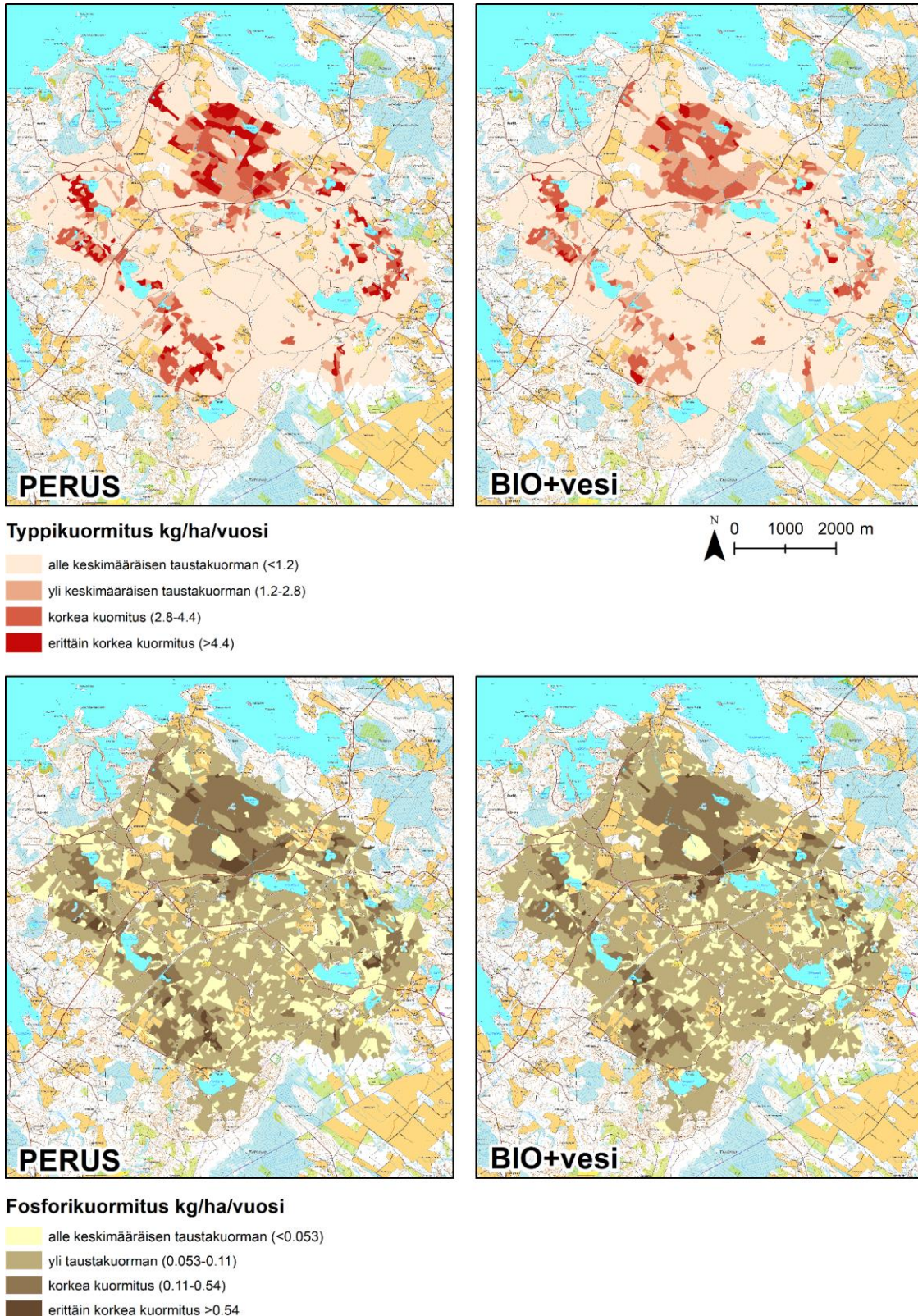
Kuva 45. Ravinnekuormituksen kokonaismäärät (kg) 50 vuoden tarkastelujaksolta Hälvänjoen skenaarioissa.



Kuva 46. Kiintoainekuorma 50 vuoden tarkastelujaksolla Hälvänjoen skenaarioissa.

PERUS-skenaariossa kiintoainekuorma oli vastaavasti kuin Kuonanjoen alueella vuositasona noin 82 700 kg/v, ja tästä ojien kunnostusta välttämällä PERUS+vesi sekä BIO+vesi -skenaariossa voidaan vähentää melkein 90 % (Kuva 46).

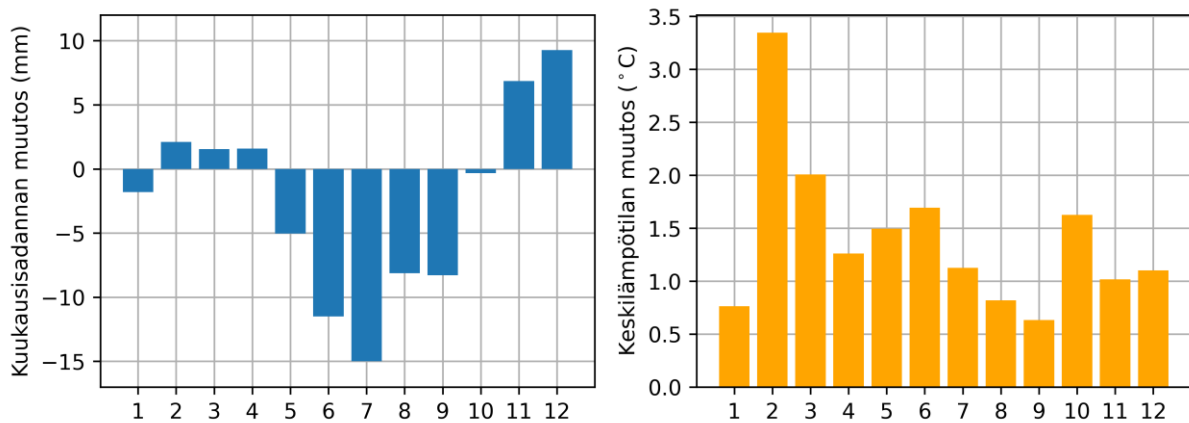
Kuva 47 havainnollistaa kartalla PERUS- ja BIO+vesi -skenaarioiden vesistökuormitusten erot. Typen kuormitus selkeästi laski BIO+vesi -skenaariossa alueilla, joissa se PERUS-skenaariossa oli korkea. Fosforin kokonaiskuormitus laski, mutta yleinen kuormitustaso kuvioilla oli yli taustakuorman useammalla kuviolla kuin PERUS-skenaariossa.



Kuva 47. Typen ja fosforin kuormitus PERUS ja BIO+vesi -skenaarioissa Hälvänjoella.

3.4. Herkkyysanalyysi: ilmastonmuutoksen vaikutus ojitetuilla turvemaidella

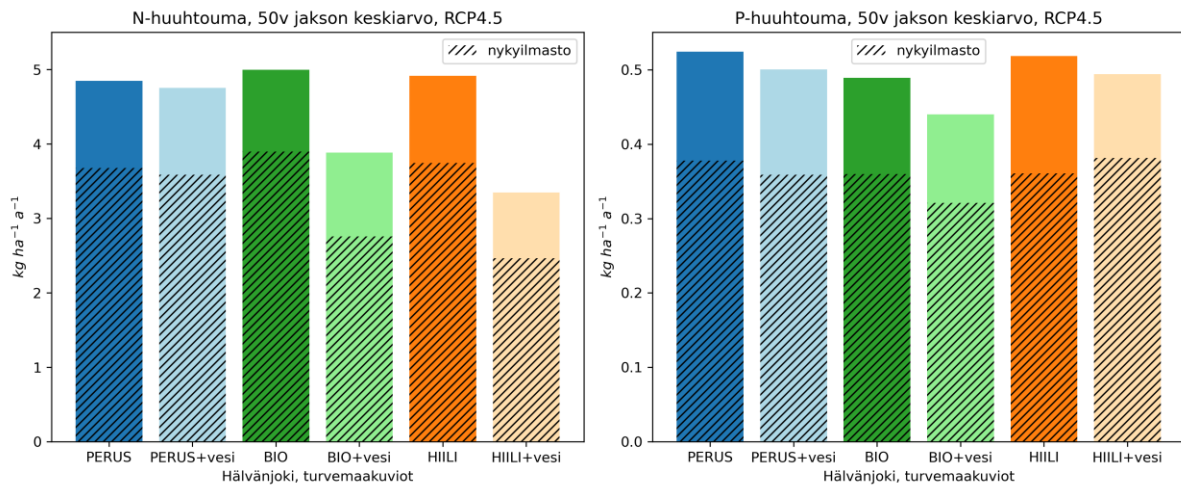
SUSI:ssa voidaan käyttää erilaisia ilmastoskenaarioita, mikä mahdollisti herkkyysanalyysin ojitettujen turvemaiden vesistökuormitukselle ja maaperän hiilitaseelle. Tässä herkkyysanalyysissä käytettiin yhtä FOSTER-hankkeessa (Honkaniemi ym. 2024) tuotettua sääaineistoa Hälvänjoen kohdealueella. Sääaineisto perustui CORDEX alueellisten ilmastomallien simulaatioista tuotettuun harhakorjattuun tulevaisuuden ilmasto kuvaavaan aineistoon RCP4.5 päästöpakotteella. Herkkyysanalyysiin ilmastomallisimulaatioista valittiin vuosikeskilämpötilan sademäärän muutosten osalta keskimääräistä lämpenemistä ja sademäärän lisäystä edustava simulaatio: EC-EARTH/CCLM4-8-17/RCP4.5 (Honkaniemi ym. 2024, luku. 3.1). Keskimääräisiä kuukausisadantoja tarkastelemalla voitiin havaita sadannan lisääntyvän RCP4.5-skenaariossa talvella ja vähenevän kesällä verrattuna SUSI-simulaatioissa nykyilmastoa kuvaavaan aineistoon (Kuva 48). Kuukauden keskilämpötilat nousevat RCP4.5-skenaariossa kaikkina kuukausina.



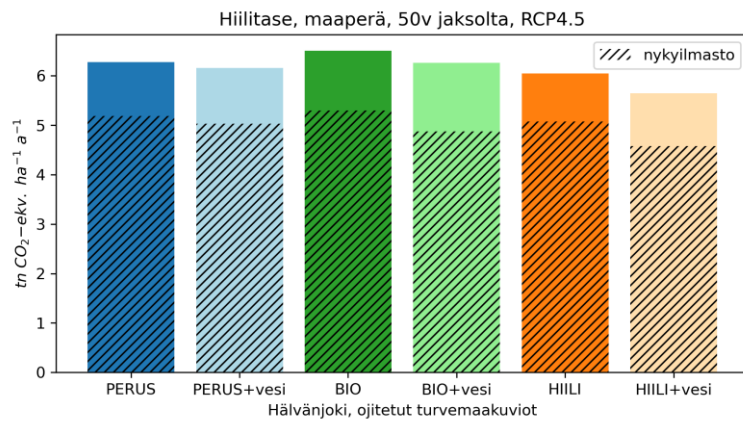
Kuva 48. SUSI-laskelmissa käytetyn nykyilmastoa kuvaavan aineiston ja ilmastoskenaario EC-EARTH/CCLM4-8-17/RCP4.5:n keskimääräisten (50 v) kuukausisadantojen ja -lämpötilojen erotukset.

Herkkyysanalyysi toteutettiin Hälvänjoen kohdealueen ojitetuille turvemaakuvioille. SUSI-tuloksissa voitiin havaita, että skenaarioiden väliset erot eivät juurikaan muuttuneet tai korostuneet ilmaston muuttuessa, mutta maaperän päästöt ja vesistökuormitus kasvoivat selvästi kaikissa skenaarioissa (Kuva 49, Kuva 50). Herkkyysanalyysi osoitti, että ilmastonmuutoksen myötä ”+vesi” -vaihtoehtojen merkitys ojitettujen turvemaiden vesistökuormitukselle korostui jonkin verran. Typpi- ja fosforikuormituksia tarkastelemalla (Kuva 49) voidaan havaita, että ”+vesi” -vaihtoehtojen tuottama vähennys on lähes kaikissa tapauksissa ilmastonmuutoksen myötä suurempi kuin nykyilmastossa. Maaperän hiilitaseessa skenaarioiden välinen järjestys muuttui hieman ilmastonmuutoksen vaikutuksesta, mutta skenaarioiden väliset erot olivat niin pieniä, että muutoksen merkitys on vähäinen.

Muutokset säädatassa (Kuva 48) vaikuttavat SUSI:ssa maaperän päästöihin ja ravinnekuormitukseen ainakin kahdella tavalla: 1) pohjavesipinnat laskevat kuivempien ja lämpimämpien kesi myötä, mikä lisää turpeen hajotusta ja ravinteiden vapautumista ja 2) lämpimämmät olosuhteet lämmittävät myös turvetta, mikä puolestaan lisää turpeen hajotusta. Lopullinen vaikutus ei kuitenkaan ole näin suoraviivainen. SUSI huomioi myös sen, että puusto käyttää osan turpeesta vapautuneista ravinteista kasvuun, joka on yleensä lämpimämissä olosuhteissa nopeampaa. Suuremman puuston kariketuotos on myös yleensä runsaampaa, mikä vaikuttaa SUSI:ssakin maaperän hiilitaseeseen.



Kuva 49. Ilmastonmuutoksen tuoma muutos ravinnekuormitukseen.



Kuva 50. Ilmastonmuutoksen tuoma muutos maaperän hiilitaseeseen.

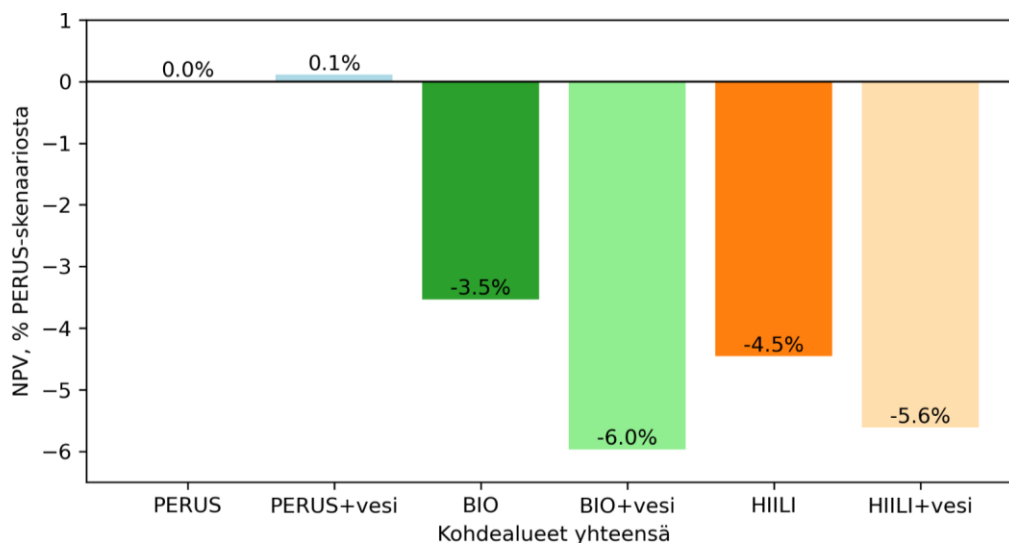
4. Yhteenveto

Tässä mallipohjaisessa skenaariotarkastelussa selvitettiin, miten metsätaloustoimenpiteiden muutoksilla voitaisiin ylläpitää ja kasvattaa metsien hiilivarastoa, lisätä monimuotoisuutta ja vähentää vesistövaikutuksia samalla säilyttäen nykyisen tasoiset hakkuut.

HIILIPOLKU-hankkeessa määritellyt metsienkäytön tavoitteet suuntasivat toimintaa eri skenaarioissa, esimerkiksi **HIILI-skenaariossa** pidennettiin kiertoaikoja, **BIO-skenaariossa** pyrittiin lisäämään lehtipuun osuutta, ja **”+vesi”-skenaariossa** vähentämään ojien kunnostusta sekä kivennäismaiden lannoitusta. **PERUS-skenaario** edusti metsien käsittelyn nykytasoa ja tarjosi vertailukohdan muille skenaarioille. Vaikka kaikki kolme kohdealuetta poikkesivat toisistaan pinta-alojen ja metsien rakenteen suhteen, **skenaarioiden välille muodostui tavoitteiden mukaisia eroja samaan tapaan kaikilla alueilla.**

Pienukkojen kohdealueiden (1 000–5 000 ha) hakkuiden ja toimenpiteiden tasot johdettiin maakunnassa viimevuosina keskimäärin toteutuneista määristä. Näin määritellyt vuotuiset hakkuut olivat näille kohdealueille mahdollisesti hieman ylimitoitettut, mikä näkyi puuston tilavuuden notkahduksena skenaarioiden alkupuoliskolla. Koska hakkuumäärät olivat kuitenkin likimain samansuuruiset kaikissa skenaarioissa, tarjoaa tarkastelu riittävän pohjan skenaarioiden väliseen vertailuun, ja tulokset osoittivat, että hakkuukertymätavoite oli mahdollista saavuttaa erilaisilla toimenpideyhdistelmillä.

Tasasuuruiset hakkuumäärät skenaarioiden kesken ja 5-vuotisjaksoittain tasoittivat skenaarioiden välisiä hakkuutuloja. Erot näkyivät kuitenkin hakkuutavoissa (harvennus tai päätehakkuu), niiden kohdentumisessa kivennäis- ja turvemaille ja kertymän puutavaralajisuhteissa. Varsinkin **”+vesi”-skenaariot** siirsivät hakkuita turvemailta kivennäismaille vähentäen turvemaidenhakkuiden osuutta 8–10 % ja päätehakkuista harvennuksiin joissakin skenaarioissa jopa lähes kokonaan. Aluetason hyvät mahdollisuudet hakkuiden kohdentamiseen eri metsiköihin vaikuttivat siihen, että hakkuiden tasaisuus toteutui ja skenaarioiden väliset erot taloustuloksissa jäivät pieniksi (Kuva 51).

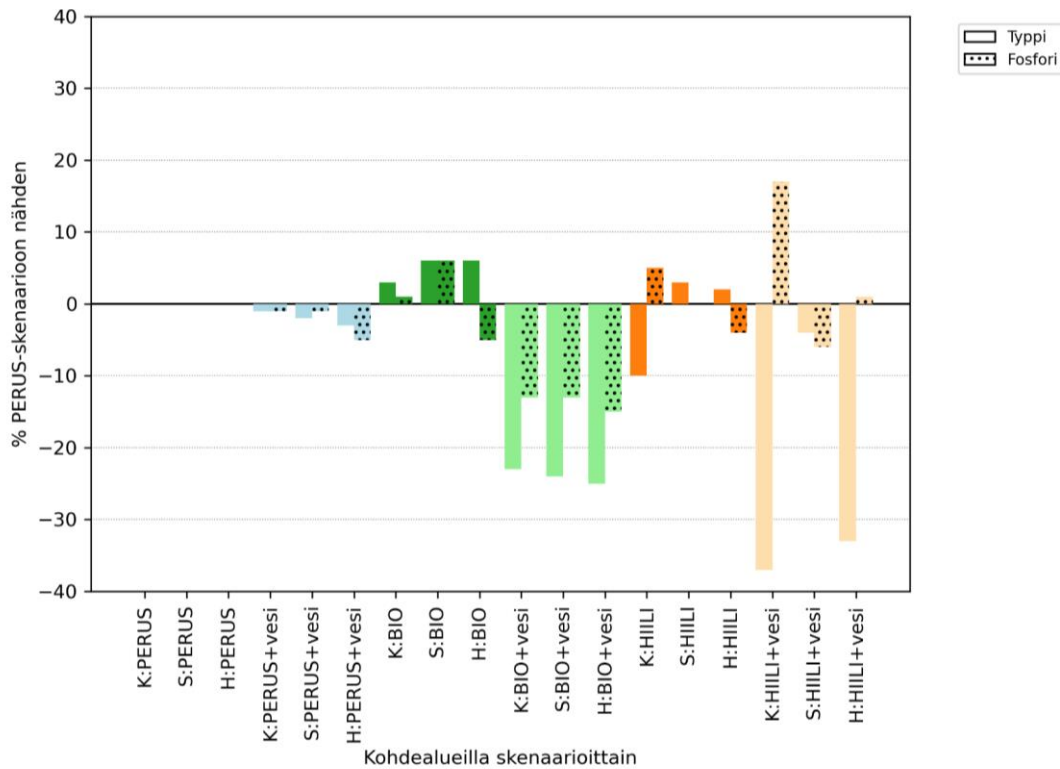


Kuva 51. Suhteelliset erot nettotulojen nykyarvossa PERUS-skenaarioon verrattuna 50 vuoden jaksolta 3 % korkokannalla kaikilta kolmelta kohdealueelta yhteensä.

HIIILI-skenaariossa tehdyt valinnat (mm. pidempi kiertoaika ja lannoitukset) kasvattivat selvästi elävän puuston hiilivarastoa. HIIILI-skenaariossa tehostettiin myös metsien hoitoa (taimikonhoito), jotta puuston kasvu keskittyisi järeään puuhun pitkäaikaiseksi hiilen varastoksi. HIIILI-skenaariolla saavutettiin suurin lisäys **hiilivarastoon**. HIIILI-skenaario paransi **puuston ja maaperän hiilitasetta** eniten suhteessa PERUS-skenaarioon, mutta vesistökuormitus oli HIIILI-skenaariossa korkea erityisesti fosforin osalta. Vesistökuormituksen huomioiminen HIIILI+vesi -skenaariossa aiheutti muutoksia toimenpiteiden kohdentumisessa sekä hakkuiden jakaantumisen harvennuksiin ja päätehakkuisiin, jolloin puuston hiilivaraston kasvu oli suurempaa turvemaiden metsissä kuin kivennäismailla, ja varasto kasvoi yhteensä vähemmän HIIILI+vesi skenaarioissa kuin HIIILI-skenaariossa.

BIO-skenaariossa tehdyt valinnat (mm. puulajisuhteiden ohjaus, tiheämpänä kasvattaminen ja pidempi kiertoaika) paransivat monimuotoisuuden kannalta tärkeitä rakennepiirteitä – metsiin saatiin enemmän lehtipuustoa ja kaikilla alueilla keskimäärin myös kuollutta puuta. Keskimäärin **lehtipuuston määrä** kasvoi eniten BIO-skenaarioissa ja toiseksi eniten BIO+vesi -skenaarioissa. Kohdealueiden välillä oli kuitenkin metsien rakenteesta johtuvia eroja: lehtipuuston määrä muodostui 50 vuoden tarkastelujakson loppuun mennessä suurimmaksi Kuonanjoen ja Sorvasrannan BIO-skenaariossa, mutta Hälvänjoella suurin lehtipuumäärä saavutettiin HIIILI-skenaariossa. Pidemmät kiertoajat ja lehtipuun osuuden kasvu vaikuttivat **kuolleen puun kertymää** lisäävästi BIO-skenaarioissa. Pidemmistä kiertoajoista huolimatta HIIILI-skenaarioiden kuolleen puun määrä ei noussut samaan tapaan kuin BIO-skenaariossa, koska tilavuuden (hiilivaraston) lisäystä suunnattiin puuston järeytymiseen mm. taimikonhoitoa lisäämällä. Sorvasrannalla ja Hälvänjoella kuolleen puun määrä oli suurin PERUS-skenaariossa, mikä selittyi eroista harvennusmäärissä, puuston tiheyden vaikuttaessa kuolemiseen.

”+vesi” -skenaarioissa pyrittiin minimoimaan vesistövaikutuksia verrattuna niiden verrokki-skenaarioihin (PERUS, BIO ja HIIILI-skenaariot). PERUS+vesi skenaariossa saatiin pieni parannus vesistökuormitukseen. Esimerkiksi turvemaiden typpi- ja fosforikuormitus pienenevät noin 2 % (Kuva 52). BIO+vesi -skenaario oli kaikilla alueilla **vesistökuormituksen** kannalta suotuisin (Kuva 52). Se tuotti erityisesti alhaisimmat fosforin huuhtoutumat. Lisäksi kiintoainekuorma pieneni merkittävästi, kun ojien kunnostusta vältettiin. Kuonanjoella ja Hälvänjoella HIIILI+vesi skenaario vähensi typen huuhtoutumaa PERUS-skenaarioon verrattuna, mutta samalla aiheutti suurimmat fosforihuuhtoutumat. Fosforihuuhtoutumien lisääntymisen todettiin liittyvän erityisesti pidempiin kiertoaikoihin, joissa puustot olivat suurempia ja tuottivat enemmän kariketta. SUSI:ssa fosforia vapautuu karikkeesta suhteellisesti nopeammin kuin typpeä (Palviainen ym. 2024), mikä on todettu myös kokeellisissa tutkimuksissa (Palviainen ym. 2004). Kun puusto ja aluskasvillisuus eivät ehdi käyttää kaikkea vapautunutta fosforia, sitä huuhtoutuu enemmän vesistöihin. HIIILIPOLKU-skenaarioissa käytettiin huomattavasti pidempää simuloituaikaa (50 vuotta) kuin on käytetty SUSI:a kehitettäessä ja testattaessa (Palviainen ym. 2024, Laurén ym. 2021), joten pitkien kiertoaikojen vaikutusta fosforihuuhtoumiin olisi tarpeen selvittää vielä tarkemmin lisätutkimuksilla.



Kuva 52. Ravinnekuormituksen muutos ojitetuilla turvemaiden alueittain typen ja fosforin osalta. Kuvassa K=Kuonanjoki, S=Sorvasranta, H=Hälvänjoki.

BIO+vesi -skenaarion tavoitteena oli lisätä luonnon monimuotoisuutta vesistökuormitus minimoiden. **BIO+vesi -skenaario onnistui edistämään monihyötyistä metsänhoitoa**, sillä monimuotoisuuden kohentumisen lisäksi myös hiilinielu kasvoi ja ravinnekuormitus pieneni PERUS-skenaarioon verrattuna. Tässä skenaariossa ravinnekuormitus väheni erityisesti sellaisilta alueilta, joilla kuormitus oli PERUS-skenaariossa suurin. Toisaalta kivennäismailla sekä puuston että maaperän hiilitaseessa nielut pienenevät BIO+vesi -skenaariossa.

Vaikka turvemaita oli vain noin neljännes kohdealueiden metsien pinta-alasta, niiden rooli vesistökuormituksessa ja kasvihuonekaasupäästöissä oli suuri ja kivennäismaiden hiilinieluihin verrattuna turvemaiden vapautui hiiltä paljon. HIILI+vesi -skenaariossa ojitettujen turvemaiden päästöt hieman pienenevät PERUS-skenaarioon verrattuna. Yleisesti skenaarioiden tulokset ojitetuille turvemaiden vastaavat päästöjen osalta rehevien ojitettujen soiden maaperän hiilitasetta (Ojanen & Minkkinen 2019). Ojitettujen turvemaiden tärkeän aseman takia kokonaistar-kastelussa BIO+vesi -skenaario edistää parhaiten monihyötyistä metsänhoitoa.

Tässä skenaariotarkastelussa käytettyyn laskentakehikkoon liittyy sen monimutkaisuudesta ja useiden työkalujen yhdistelystä sekä lähtöaineistoista ja taustaoletuksista ja johtuen monia epävarmuuksia. Laskelmissa ei esimerkiksi ole huomioitu mahdollisia tuuli-, hyönteis- tai muita tuhoja. Tällaisten, merkittävää satunnaisuutta sisältävien riskien huomioiminen skenaarioissa on vaikeaa tässä analyysissä käytetyillä työkaluilla. Skenaarioiden tavoitteita tukevissa toimenpiteissä oli runsaasti vaihtoehtoja tasaikäiselle metsänkasvatukselle. Pidempien kiertoaikojen käyttö saattaa kasvattaa joitakin tuhoriskejä, mutta tässä tarkastelussa pidennykset ovat varsin maltillisia. Lisäksi skenaariotarkastelussa oli mukana jatkuvapeitteiseen metsänkasvatukseen tähtäävä toimenpidevaihtoehto, ja se valikoitui käyttöön BIO- ja HIILI-skenaarioissa sekä näiden "+vesi" -verrokeissa pienelle osalle rehevien kasvupaikkojen kuusikoita

(noin 3 % kaikkien metsien pinta-alasta). Valinta oli laskennallinen, eikä kohteen puustorakenteen soveltuvuutta jatkuvapeitteiseen kasvatukseen voitu arvioida. Numeeriseen kuviotietoon pohjautuvassa tarkastelussa ei huomioitu metsiköiden keskinäisiä sijainteja tai kuvioiden sijaintia suhteessa vesistöön (pl. kuviotietoihin merkityt hakkuurajoitteet). Eroosion merkitys Puruveden järviolueen tilaan (mm. tummuminen) on merkittävä ja tässä tarkastelussa huomiointiin vain ojitettujen turvemaiden osalta ojien kunnostukseen liittyen kiintoainekuormitus, mutta kivennäismaiden eroosioriskiä tai kuvion sijainnin vaikutusta ravinnehuuhtoumaan määrään ei huomioitu.

Ilmastonmuutos todennäköisesti äärevöittää sääilmiöitä nykykäsityksen mukaan. Ilmaston lämpeneminen voi lisätä puiden kasvua mutta toisaalta myös kasvattaa tuhoriskejä. Se voi muuttaa myös vesistöihin kohdistuvan ravinnekuormituksen ajoitusta ja määrää. Herkkyysanalyysi osoitti, että ilmastonmuutoksen myötä "+vesi" -vaihtoehtojen merkitys ojitettujen turvemaiden vesistökuormituksen minimoimiseksi korostui jonkin verran.

Huolimatta epävarmuustekijöistä, tarkastelua voidaan käyttää perusteltaessa turvemaametsien tärkeää roolia vesistökuormituksessa ja kasvihuonekaasupäästöissä, sekä antamaan pohjaa sellaisten toimenpideyhdistelmien löytämiseksi, joilla voidaan edistää monihyötyistä metsänhoitoa.

5. Lopuksi

Skenaariotarkastelussa onnistuttiin suuntaamaan metsien käyttöä ennalta asetettujen tavoitteiden mukaisesti suhteellisen pienillä eroilla toimenpidevalikoimassa. Tarkastelun mukaan oli myös mahdollista löytää aluetasolla yhdistelmä metsänkäsittelytoimenpiteistä, joilla voidaan edistää monia tavoitteita yhtä aikaa: BIO+vesi -skenaario vähensi vesistökuormitusta, kasvatti hiilivarastoa sekä lisäsi monimuotoisuutta.

Skenaarioanalyysi tehtiin aluetasolla, jolloin liikkumavaraa oli suhteellisen paljon, esimerkiksi hakkuiden estyessä jollain kohteella jossain skenaariossa, vastaava puumäärä voitiin hakata toisaalta.

Yksittäisen metsänomistajan valintamahdollisuudet toimintojen suuntaamisessa ovat rajalliset ja riippuvat tilan metsien rakenteesta. Tulokset kuitenkin osoittivat, että aluetasolla voidaan pienilläkin muutoksilla kiertoaikoihin, ojien kunnostukseen, lannoitukseen tai lehtipuustoon vaikuttaa hiilivaraston kasvattamiseen, monimuotoisuuden lisäämiseen sekä vesistökuormituksen pienentämiseen.

Skenaarioiden vertailujen lisäksi on syytä jatkossa huomioida toimenpiteiden sijoittuminen alueilla. Tällä on erityisesti vaikutusta ravinnekuormitukseen, jolloin esimerkiksi hakkuu ja ojien kunnostus isolla kuviolla etenkin lähellä vesistöjä lisää vesistökuormitusta. Hehtaarikoh- taisten tarkastelujen rinnalla on syytä tarkastella absoluuttisia ravinnekuormitusmääriä ja tarkastella valuma-aluelähtöisesti toimenpiteiden kohdentumista ja kokonaismäärää.

Vaikka ojitettujen turvemaiden osuus skenaariotarkastelun kohdealueilla oli vain noin neljännes, niiden rooli hiilitaseessa ja vesistökuormituksessa oli erittäin merkittävä. Metsien käytön suunnittelussa turvemaihin tulee kiinnittää erityistä huomiota, kohdentaa toimenpiteet kustannustehokkaasti ja kannustaa metsänomistajia ratkaisuihin, jotka edistävät monitavoitteista metsänhoitoa.

Ilmaston tuoma epävarmuus yhdistettynä mallinnuksen epävarmuuksiin alleviivaavat tarvetta katsoa tarkkojen numeroiden sijaan erilaisten skenaarioiden keskinäisiä eroja, jotka mahdollistavat hahmottamaan vaikuttavuuden mittakaavaa. On hyödyllistä, kun hiilen sidonnan lisäksi tarkastellaan vaikutuksia vesistökuormitukseen ja monimuotoisuuteen.

Viitteet

- Aalto, J., Pirinen, P. & Jylhä, K. 2016. New gridded daily climatology of Finland: Permutation-based uncertainty estimates and temporal trends in climate. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 121(8): 3807–3823. [DOI:10.1002/2015JD024651](https://doi.org/10.1002/2015JD024651)
- Finér, L., Mattsson, T., Joensuu, S., Koivusalo, H., Laurén, A., Makkonen, T., Nieminen, M., Tattari, S., Ahti, E., Kortelainen, P. & Koskiaho, J. 2010. Metsäisten valuma-alueiden vesistökuormituksen laskenta. *Suomen ympäristö* 10(2010):1–33.
- Haikarainen, S., Huuskonen, S., Ahtikoski, A., Lehtonen, M., Salminen, H., Siipilehto, J., Korhonen, K.T., Hynynen, J. & Routa, J. 2021. Does Juvenile Stand Management Matter? Regional Scenarios of the Long-Term Effects on Wood Production. *Forests* 12(1): 84. [DOI:10.3390/f12010084](https://doi.org/10.3390/f12010084)
- Hakala, A., Hagman, A.-M., Kangas, H. & Heikkala, E. 2021. Etelä-Savon Ely keskus: Vesienhoidon yleissuunnitelma Puruveden kalatalousalueelle. Ramboll Finland oy 86 s.
- Honkaniemi, J., Albrich, K., Repo, A., Aalto, J., Graf, L., Haikarainen, S., Huitu, O., Hantula, J., Hynynen, J., Jantunen, A., Kolstela, J., Lehtonen, I., Matala, J., Nikula, A., Poutanen, J., Salminen, H. & Vauhkonen, J. 2024. Multifunctional forests and their risks under climate change. *Natural Resources and Bioeconomy Studies* 28/2024. Natural Resources Institute Finland. Helsinki. 59 p.
- Huuskonen, S., Haikarainen, S., Sauvula-Seppälä, T., Salminen, H., Lehtonen, M., Siipilehto, J., Ahtikoski, A., Korhonen, K.T. & Hynynen, J. 2020. Benefits of juvenile stand management in Finland—impacts on wood production based on scenario analysis. *Forestry: An International Journal of Forest Research* 93: 458–470. [DOI: 10.1093/forestry/cpz075](https://doi.org/10.1093/forestry/cpz075)
- Hynynen, J., Ojansuu, R., Hökkä, H., Siipilehto, J., Salminen, H. & Haapala, P. 2002. Models for predicting stand development in MELA system. The Finnish Forest Research Institute, Research papers 835. 116 s.
- Hynynen, J., Ahtikoski, A., Siitonen, J., Sievänen, R. & Liski, J. 2005. Applying the MOTTI simulator to analyse the effects of alternative management schedules on timber and non-timber production. *Forest Ecology and Management* 207(1–2): 5–18. [DOI:10.1016/j.foreco.2004.10.015](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.10.015)
- 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. *European Journal of Forest Research* 134: 415–431. [DOI:10.1007/s10342-014-0860-0](https://doi.org/10.1007/s10342-014-0860-0)
- Juvonen, J., Artell, J., Haikarainen, S., Häyrinen, L., Pouta, E., Pirinen, P., Soini, K., Salmivaara, A., Stenberg, L., Tuomenvirta, H., Ukonmaanaho, L., Hynynen, J. & Vanninen, P. 2023. Puruveden metsät – taustatietoa monitavoitteiseen metsienhoitoon tietopaketti. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 27 s. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-700-6>

- Kortelainen, P., Mattsson, T., Finér, L., Ahtiainen, M., Saukkonen, S. & Sallantausta, T. 2006. Controls on the export of C, N, P and Fe from undisturbed boreal catchments, Finland. *Aquatic Sciences* 68: 453–468. [DOI:10.1007/s00027-006-0833-6](https://doi.org/10.1007/s00027-006-0833-6)
- Kortelainen, P., Ahtiainen, M., Finér, L., Mattsson, T., Sallantausta, T. & Saukkonen, S., 1999. Luonnonhuuhtouma metsävaluma-alueilta. Teoksessa: Ahti, E., Granlund, H. & Puranen, E. (toim.). *Metsätalouden ympäristökuormitus. Seminaari Nurmeksessa* 23.–24.9.1998. Tutkimusohjelman väliraportti. *Metsäntutkimuslaitoksen Tiedonantoja* 745: 9–13. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-1694-7>
- Lappi, J. & Lempinen, R. 2014. A Linear Programming Algorithm and Software for Forest-Level Planning Problems Including Factories. *Scandinavian Journal of Forest Research* 29(1): 178–184. [DOI: 10.1080/02827581.2014.886714](https://doi.org/10.1080/02827581.2014.886714)
- Laurén, A., Palviainen, M., Launiainen, S., Leppä, K., Stenberg, L., Urzainki, I., Nieminen, M., Laiho, R. & Hökkä, H. 2021. Drainage and Stand Growth Response in Peatland Forests—Description, Testing, and Application of Mechanistic Peatland Simulator SUSI. *Forests* 12(3): 293. [DOI:10.3390/f12030293](https://doi.org/10.3390/f12030293)
- Luke 2024. <https://www.luke.fi/fi/palvelut/luonnonvarakeskuksen-mottiohjelmistolla-voidaan-ennustaa-metsikon-tulevaa-kehitysta> - tiedot haettu 28.10.2024
- Nieminen, M., Palviainen, M., Sarkkola, S., Laurén, A., Marttila, H. & Finér, L. 2017. A synthesis of the impacts of ditch network maintenance on the quantity and quality of runoff from drained boreal peatland forests. *Ambio* 47: 523–534. [DOI:10.1007/s13280-017-0966-y](https://doi.org/10.1007/s13280-017-0966-y)
- Nieminen, M., Koskinen, M., Sarkkola, S., Laurén, A., Kaila, A., Kiikkilä, O., Nieminen, T.M. & Ukonmaanaho, L. 2015. Dissolved organic carbon export from harvested peatland forests with differing site characteristics. *Water Air and Soil Pollution* 226: 181. [DOI:10.1007/s11270-015-2444-0](https://doi.org/10.1007/s11270-015-2444-0)
- Nieminen M., Pukkala T., Stenberg L., Sarkkola S., Vihonen A. & Valkeapää A. 2023. Jatkuvan kasvatuksen ja tasaikäismetsätalouden vaikutus metsäisten valuma-alueiden vesistökuormitukseen Suomessa. *Metsätieteen aikakauskirja vuosikerta 2023 artikkeli 22001*. [DOI:10.14214/ma.22001](https://doi.org/10.14214/ma.22001)
- Ojanen, P. & Minkkinen, K. 2019. The dependence of net soil CO₂ emissions on water table depth in boreal peatlands drained for forestry. *Mires and Peat* 24(27): 1–8. [DOI: 10.19189/MaP.2019.OMB.StA.1751](https://doi.org/10.19189/MaP.2019.OMB.StA.1751)
- Palviainen, M., Finér, L., Kurka, A.-M., Mannerkoski, H., Piirainen, S. & Starr, M. 2004. Decomposition and nutrient release from logging residues after clear-cutting of mixed boreal forest. *Plant Soil* 263: 53–67. [DOI: 10.1023/B:PLSO.0000047718.34805.fb](https://doi.org/10.1023/B:PLSO.0000047718.34805.fb)
- Palviainen, M., Pumpanen, J., Mosquera, V., Maher Hasselquist, E., Laudon, H., Ostonen, I., Kull, A., Renou Wilson, F., Peltomaa, E., Könönen, M., Launiainen, S., Peltola, H., Ojala, A. & Laurén, A. 2024. Extending the SUSI peatland simulator to include dissolved organic carbon formation, transport and biodegradation - Proper water management reduces lateral carbon fluxes and improves carbon balance. *Science of the Total Environment* 950: 175173. [DOI:10.1016/j.scitotenv.2024.175173](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175173)

- Salminen, H., Lehtonen, M. & Hynynen, J. 2005. Reusing legacy FORTRAN in the MOTTI growth and yield simulator. in Computers and Electronics in Agriculture 49: 103–113. [DOI:10.1016/j.compag.2005.02.005](https://doi.org/10.1016/j.compag.2005.02.005)
- Salmivaara, A., Leinonen, A., Palviainen, M., Korhonen, N., Launiainen, S., Tuomenvirta, H., Ukonmaanaho, L., Finér, L. & Laurén, A.M. 2023. Exploring the Role of Weather and Forest Management on Nutrient Export in Boreal Forested Catchments Using Spatially Distributed Model. Forests 14(1). [DOI:10.3390/f14010089](https://doi.org/10.3390/f14010089)
- Suomen virallinen tilasto (SVT) a: Puun markkinahakkuut [verkkójulkaisu]. Helsinki: Luonnonvarakeskus. Viitattu: 20.10.2022. <https://www.luke.fi/fi/tilastot/puun-markkinahakkuut>
- Suomen virallinen tilasto (SVT), b: Metsänhoito- ja metsänparannustyöt [verkkójulkaisu]. Helsinki: Luonnonvarakeskus. Viitattu: 20.10.2022. <https://www.luke.fi/fi/tilastot/metsanhoito-ja-metsanparannustyot>
- Suomen virallinen tilasto (SVT) c: Teollisuuspuun kauppa [verkkójulkaisu]. Helsinki: Luonnonvarakeskus. Viitattu: 20.10.2022. <https://www.luke.fi/fi/tilastot/teollisuuspuun-kauppa>
- Suomen virallinen tilasto (SVT), d: Kuluttajahintaindeksi [verkkójulkaisu]. ISSN=1796-3524. Helsinki: Tilastokeskus. Viitattu: 20.10.2022. <https://stat.fi/tilasto/khi>
- Suoseura 2020. Ojittamattomien ja ojitettujen soiden vesistökuormitus. <https://www.suoseura.fi/ojitettujen-soiden-kestava-kaytto/ojittamattomien-ja-ojitettujen-soiden-vesistokuormitus/> - Haettu 2024
- SYKE 2018. Corine maapeiteluokitus 2018. <https://ckan.ymparisto.fi/dataset/corine-maanpeite-2018> - Haettu 2019
- Tossavainen, T. 2018. Puruveden Savonlahden nykytila - Sedimentin laatu ja määrä, pohjaeläimistö, vedenlaatu sekä kuormitus- ja fosforimallitarkastelu. Karelia-ammattikorkeakoulun julkaisuja C, Raportteja: 48. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/141710/Savonlahtiraportti_verkkoversio.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Tuomi, M., Vanhala, P., Karhu, K., Fritze, H. & Liski, J. 2008. Heterotrophic soil respiration - comparison of different models describing its temperature dependence. Ecological Modelling 211(1-2): 182–190. [DOI:10.1016/j.ecolmodel.2007.09.003](https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.09.003)
- Ukonmaanaho, L., Artell, J., Haikarainen, S., Huhta, E., Hynynen, J., Häyrynen, L., Juvonen, J., Karhunkorva, R., Kaseva J., Kietäväinen, P., Kolstela, J., Pirinen, P., Pouta, E., Salmivaara, A., Soini, K., Stenberg, L., Tuomenvirta, H. & Vanninen, P. 2024. Polkuja monitavoite-metsään – HIILIPOLKU hankkeen loppuraportti. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-959-8>



**Löydät meidät
verkosta**

luke.fi



Luonnonvarakeskus (Luke) Latokartanonkaari 9, 00790 Helsinki