

An aerial photograph of a small, dark-roofed cabin with a white base, situated in a dense green forest. A red car is parked on a gravel path next to the cabin. A wooden walkway leads from the cabin towards a body of water on the right side of the image. The forest is composed of tall, thin evergreen trees.

Suomen ympäristökeskuksen raportteja 35 | 2023

Valuma-alue suunnittelulla kohti hiilineutraalia maankäyttöä

SysteemiHiili-hankkeen tulokset

Mika Marttunen ja Mari Annala (toim.)



Suomen ympäristökeskus
Finlands miljöcentral
Finnish Environment Institute

Valuma-aluesuunnittelulla kohti hiilineutraalia maankäyttöä

SysteemiHiili-hankkeen tulokset

Mika Marttunen ja Mari Annala (toim.)



Suomen ympäristökeskus
Finlands miljöcentral
Finnish Environment Institute

Suomen ympäristökeskuksen raportteja 35 | 2023

Suomen ympäristökeskus
Kestävä vesihuolto/Yhdyskuntaratkaisut

Toimittajat: Mika Marttunen¹⁾ ja Mari Annala¹⁾

Vastaava erikoistoimittaja: Vuokko Laukka¹⁾

Hankkeeseen osallistui: Anu Akujärvi¹⁾, Eerika Albrecht²⁾, Mari Annala¹⁾, Lasse Aro³⁾, Jose Cano-Bernal¹⁾, Tuomo Eskelinen⁴⁾, Nasim Fazel¹⁾, Martin Forsius¹⁾, Katri Haatainen¹⁾, Maria Holmberg¹⁾, Inese Huttunen¹⁾, Markus Huttunen¹⁾, Laura Härkönen¹⁾, Virpi Junttila¹⁾, Miika Kajanus⁴⁾, Timo P. Karjalainen²⁾, Marie Korppoo¹⁾, Pirkko Kortelainen¹⁾, Kai Kärkkäinen⁴⁾, Johanna Leino²⁾, Ahti Lepistö¹⁾, Mika Marttunen¹⁾, Jyri Mustajoki¹⁾, Maiju Narikka¹⁾, Lasse Peltonen²⁾, Katri Rankinen¹⁾, Lauri Rantala⁵⁾, Teija Rantala⁴⁾, Jani Ruohola¹⁾, Antti Räike¹⁾, Aleksi Räsänen³⁾, Torsti Schulz¹⁾, Matias Sivonen²⁾, Saara Sivonen¹⁾, Oili Tarvainen³⁾, Antti Taskinen¹⁾, Sara Todorovic¹⁾, Anne Tolvanen³⁾, Ville Turunen¹⁾, Teemu Ulvi¹⁾, Satu Virkkumaa⁴⁾, Sari Väisänen¹⁾, Jyri Wuorisalo⁴⁾

- 1) Suomen ympäristökeskus
- 2) Itä-Suomen yliopisto
- 3) Luonnonvarakeskus
- 4) Savonia ammattikorkeakoulu
- 5) Iin Mircopolis Oy

Rahoittaja/toimeksiantaja: Maa- ja metsätalousministeriö
Julkaisija ja kustantaja: Suomen ympäristökeskus (Syke)
Latokartanonkaari 11, 00790 Helsinki, puh. 0295 251 000, syke.fi

Taitto: Pirkko Väänänen

Kannen kuva: © nblxer - stock.adobe.com

Julkaisu on saatavana veloitusetta internetistä: syke.fi/julkaisut | helda.helsinki.fi/syke

ISBN 978-952-11-5618-2 (PDF)
ISSN 1796-1726 (verkkoj.)

Julkaisuvuosi: 2023



Tiivistelmä

Valuma-aluesuunnittelulla kohti hiilineutraalia maankäyttöä – SysteemiHiili-hankkeen tulokset

Raportissa on kuvattu vuosina 2021–2023 toteutetun maa- ja metsätalousministeriön hiilestä kiinni- ohjelman rahoittaman SysteemiHiili-hankkeen (Ilmastotoimenpiteiden kokonaisvaltainen arviointi valuma-alueilla - Systeemianalyysillä kohti hiilineutraalia maankäyttöä), keskeiset tulokset, johtopäätökset ja suositukset. Hankkeen päätavoitteena oli lisätä ymmärrystä, vuoropuhelua ja menetelmällisiä valmiuksia maankäytön muutosten vuorovaikutusketjuista ja kokonaisvaikutuksista sekä tukea ilmastoviisaiden ja monihyötyisten ratkaisujen käyttöönottoa kansallisesti sekä alueellisesti ja paikallisesti valuma-alueatasolla.

Laaja-alainen ja moniulotteinen hanke muodostui kahdeksasta työpaketista: 1) hiilinielut ja prosessit valuma-alueilla, 2) hiiliprosessit ja -virrat vesistöissä, 3) valuma-alueiden hiilitaseet ja skenaariot (Vemalan kehitystyö ja soveltaminen), 4) systeemianalyysin menetelmät arviointien tukena, 5) ohjauskeinot ja sosiaalinen hyväksyttävyys, 6) muuttuva maankäyttö Pohjois-Pohjanmaan turvetuotantoalueilla, 7) maankäytön muutokset, ohjauskeinot ja Nexus Pohjois-Savossa ja 8) yhteiskehittäminen, verkostoituminen ja viestintä.

Maa- ja vesiekosysteemien hiilitasetarkastelut, pitkäaikaisen vedenlaatuaineiston tilastolliset analyysit, skenaariotarkastelut ja useat tapaustarkastelut tuottivat tietoa, joka auttaa ymmärtämään nykytilannetta ja tulevaisuuden kehityspolkuja sekä edistää ilmastoviisaiden ja kokonaiskestävien toimenpiteiden tunnistamista maankäyttösektorilla. Tutkimus vahvisti, että vesistömme ovat tummuneet viime vuosikymmeninä ja jatkavat tummumistaan, ellei orgaanisen hiilen kuormitusta valuma-alueilta alenneta merkittävästi. Tummumista aiheuttavaa kuormitusta tulisi ehkäistä ennakolta turvemaiden maankäytön muutoksilla. Käytössä olevat turvemaiden metsätalouden vesiensuojelurakenteet eivät pysty pidättämään liukoista orgaanista hiiltä.

Hiilitasetarkastelujen perusteella metsät ovat ainoa merkittävä ilmamekan hiilidioksidin sitoja, mutta niiden merkitys on heikentynyt viimeaikaisten hakkuiden vuoksi. Metsien käsittelyssä olisikin otettava huomioon hiilivarastojen ja hiilensidonnan säilyttäminen varovaisuusperiaatetta noudattaen. Osin samoilla maankäyttösektorin toimenpiteillä voidaan hillitä vesien tummumista ja edistää ilmamekan hiilen sidontaa sekä hiilivarastojen kasvua. Mahdollisia toimenpiteitä ovat mm. siirtyminen jatkuvapeitteiseen metsänkasvatukseen, monimuotoisuuden ja suojelualueiden lisääminen ja sekametsien suosiminen. Turvetuotannon jatkokäytössä suositeltavia jatkokäyttömuotoja ovat etenkin ennallistaminen suoksi, kosteikkojen rakentaminen ja kuivemmilla alueilla metsitys.

Maanviljelijät ja metsänomistajat ovat valmiita edistämään ilmastotoimia, kun ne ovat mielekkäitä ja kannattavia. Riittävät korvaukset, taloudelliset kannustimet ja omaisuuden suoja ovat keskeisiä oikeudenmukaisuuden takaamiseksi.

Asiasanat: ilmastomuutoksen hillintä, ilmastomuutokseen sopeutuminen, kasvihuonekaasupäästöt, hiilitase, maatalous, metsätalous, turvetuotantoalueiden jatkokäyttö, orgaaninen hiili, vesistökuormitus, vedenlaatu, vesistöt, valuma-alue, metsät, laskentamallit, päätösanalyysi, systeemianalyysi, suunnittelu, Pohjois-Savo, Pääjärvi, Kiuruvesi

Sammandrag

Mot koldioxidneutral markanvändning med avrinningsområdesplanering – Resultaten av SysteemiHiili-projektet

Rapporten beskriver de viktigaste resultaten, slutsatserna och rekommendationerna från Systeemi-Hiili-projektet som genomfördes 2021–2023 och finansierades av Jord- och skogsbruksministeriets Hiilestä Kiinni -program. Huvudmålet med projektet var att öka förståelsen, dialogen och metodologiska möjligheter om interaktionskedjorna och övergripande effekter av markanvändningsförändringar, och att stödja implementeringen av klimatmässiga och lösningar som har flera fördelar nationellt, regionalt och lokalt på sub-upptagningsnivå.

Det omfattande och flerdimensionella projektet bestod av åtta arbetspaket: 1) kolsänkor och processer i avrinningsområden, 2) kolprocesser och flöden i vattendrag, 3) kolbalanser och scenarier för avrinningsområden (Vemalas utvecklingsarbete och tillämpning), 4) systemanalysmetoder till stöd för utvärderingar, 5) styrmedel och social acceptans, 6) förändrad markanvändning i Norra Österbottens torvproduktionsområden, 7) förändringar i markanvändning, styrmedel och Nexus i Norra Savolax, och 8) gemensam utveckling, nätverkande och kommunikation.

Kolbalansanalyser av mark- och vattenekosystem, statistiska analyser av långsiktiga vattenkvalitetsdata, scenarioanalyser och flera fallstudier gav information som hjälper till att förstå den nuvarande situationen och framtida utvecklingsvägar och främjar identifieringen av klimatmässigt och övergripande hållbara åtgärder inom markanvändningssektorn. Studien bekräftade att vårt ytvatten har mörknat under de senaste decennierna och kommer att fortsätta att mörkna, om inte belastningen av organiskt kol från avrinningsområdena minskas avsevärt. Belastningen som orsakar mörkning bör förhindras i förväg genom förändringar i skötseln av torvmarken, eftersom vattenskyddsstrukturerna i skogsbruket inte klarar av att hålla kvar lösligt organiskt kol.

Baserat på kolbalansanalyser är skogar den enda betydande bindaren av koldioxid i atmosfären, men deras betydelse har försvagats på grund av den senaste tidens ökade avverkning. När man arbetar med skog bör bevarandet av kollager och kolbindning beaktas, enligt försiktighetsprincipen. Delvis kan samma åtgärder inom markanvändningssektorn stävja mörkningen av vattnet och främja kolbindning i atmosfären och tillväxten av kollager. Möjliga åtgärder är t.ex. övergång till kontinuerligt täckande skogsbruk, ökad mångfald och skyddade områden samt att gynna blandskogar. Vid den fortsatta användningen av torvutvinningsområden är de rekommenderade formerna för vidare användning särskilt restaurering, anläggande av våtmarker och beskogning i torrare områden.

Jordbrukare och skogsägare är redo att främja klimatåtgärder när de är meningsfulla och lönsamma. Adekvat ersättning, ekonomiska incitament och tillgångsskydd är centrala för att säkerställa rättvisa.

Nyckelord: klimatförändringar, anpassning, växthusgaser, utsläpp, kolbalans, kolbindning, kolneutralitet, markanvändning, lantbruk, skogar, skogsbruk, torvproduktion, organiskt kol, belastning av vattendrag, vattenkvalitet, vattendrag, tillrinningsområden, kalkylmodeller, beslutsanalys, systemanalys, Pohjois-Savo, Pääjärvi, Kiuruvesi

Abstract

Towards carbon-neutral land use with catchment area planning – The results of the SysteemiHiili project

The report describes the key results, conclusions, and recommendations of the SysteemiHiili project implemented in 2021-2023 and funded by the Ministry of Agriculture and Forestry's Hiilestä kiinni program. The main goal of the project was to increase understanding, dialogue and methodological capabilities about the interaction chains and overall effects of land use changes, and to support the implementation of climate-wise and solutions having multiple benefits nationally, regionally, and locally at the sub-catchment level.

The wide-ranging and multidimensional project consisted of eight work packages: 1) carbon sinks and processes in catchment areas, 2) carbon processes and flows in water bodies, 3) carbon balances and scenarios of catchment areas (Vemala's development work and application), 4) systems analysis methods in support of evaluations, 5) means of control and social acceptability, 6) changing land use in the peat production areas of North Ostrobothnia, 7) changes in land use, means of control and Nexus in North Savo, and 8) joint development, networking and communication.

Carbon balance analyses of land and water ecosystems, statistical analyses of long-term water quality data, scenario analyses and several case studies produced information that helps to understand the current situation and future development paths and promotes the identification of climate-wise and overall sustainable measures in the land use sector. The study confirmed that our surface waters have darkened in recent decades and will continue to darken unless the load of organic carbon from the catchment areas is significantly reduced. The load that causes darkening should be prevented in advance by changes in the management of peatland, because the water protection structures in forestry are not able to retain soluble organic carbon.

Based on carbon balance analyses, forests are the only significant sequester of carbon dioxide in the atmosphere, but their importance has weakened due to recent increase in logging. When dealing with forests, the preservation of carbon stocks and carbon sequestration should be considered following the precautionary principle. In part, the same measures in the land use sector can curb the darkening of waters and promote carbon sequestration in the atmosphere and the growth of carbon stocks. Possible measures are, e.g., transition to continuous cover forestry, increasing biodiversity and protected areas, and favouring mixed forests. In the further use of peat extraction areas, the recommended forms of further use are especially restoration, construction of wetlands, and afforestation.

Farmers and forest owners are ready to promote climate actions when they are meaningful and profitable. Adequate compensation, financial incentives and asset protection are central to ensuring fairness.

Keywords: climate change, adaptation (change), greenhouse gases, emissions, carbon balance, carbon sequestration, carbon neutrality, land use, agriculture, forests, forestry, peat production, organic carbon, strain on the water system, water quality, water systems, catchment areas, calculation models, decision analysis, system analysis, Pohjois-Savo, Pääjärvi, Kiuruvesi

Valuma-aluesuunnittelulla kohti hiilineutraalia maankäyttöä

SysteemiHiili-hankkeen tulokset

Mika Marttunen ja Mari Annala (toim.)

Tämän raportin ydinviestit:

- **Maa-, metsätalous- ja turvetuotantoalueiden maankäytön muutoksia tulee tarkastella ja suunnitella valuma-alueitasolla, jotta voidaan löytää vesistöjen, ilmaston, luonnon monimuotoisuuden ja yhteiskunnan kannalta kestäviä ratkaisuja.**
- **Maa- ja vesiekosysteemien hiilitasetarkastelut, vedenlaatuaineiston tilastolliset analyysit, skenaariotarkastelut ja tapaustarkastelut ovat tuottaneet arvokasta tietoa ja menetelmiä, joita voidaan hyödyntää edistettäessä hiilineutraalia maankäyttöä.**
- **Ensimmäinen valtakunnallinen analyysi vahvistaa, että vesistömme ovat tummuneet viime vuosikymmeninä. Ne tummuvat myös tulevaisuudessa ilmastomuutoksen vuoksi, jos orgaanisen hiilen kuormitusta valuma-alueilta ei alenneta merkittävästi.**
- **Tummumista aiheuttavaa kuormitusta tulisi ehkäistä ennakolta turvemaan hoidon muutoksilla, koska metsätalouden vesiensuojelurakenteet eivät pysty pidättämään liukoista orgaanista hiiltä.**
- **Metsät ovat ainoa merkittävä ilmakehän hiilidioksidin sitoja, mutta niiden merkitys on heikentynyt viimeaikaisten hakkuiden vuoksi. Metsien käsittelyssä on otettava huomioon hiilivarastojen ja hiilensidonnan säilyttäminen varovaisuusperiaatetta noudattaen.**
- **Maanviljelijät ja metsänomistajat ovat valmiita edistämään ilmastotoimia, kun ne ovat mielekkäitä ja kannattavia. Riittävät korvaukset, taloudelliset kannustimet ja omaisuuden suoja ovat keskeisiä oikeudenmukaisuuden takaamiseksi.**

Esipuhe

Maa- ja metsätalousministeriön Hiilestä kiinni -ohjelman rahoittaman SysteemiHiili-hankkeen (Ilmasto-toimenpiteiden kokonaisvaltainen arviointi valuma-alueilla - Systeemianalyysillä kohti hiilineutraalia maankäyttöä), päätavoitteena oli parantaa menetelmällisiä valmiuksia ja ymmärrystä maankäytön muutosten vaikutusketjuista ja kokonaisvaikutuksista sekä tukea ilmastoviisaiden, kestävien ja kustannustehokkaiden ratkaisujen käyttöönottoa kansallisella, alueellisella, valuma-alue- ja paikallisella tasolla.

Hankkeessa kehitettiin laskentamalleja, menetelmiä ja lähestymistapoja maankäytön muutosten vaikutusten arviointiin ja vaihtoehtoehtojen vertailuun. Testaus tapahtui tapaustarkasteluissa lin-Komppasuolla, Oulun Miehonsuo-Turvesuolla sekä Kiurujoen vesistöalueella Pohjois-Savossa tiiviissä yhteistyössä alueiden viranomaisten ja muiden sidosryhmien kanssa. Kiitämme kaikkia tapaustarkasteluihin osallistuneita henkilöitä antoisasta yhteistyöstä.

SysteemiHiili-hanke teki tiivistä yhteistyötä seuraavien Hiilestä kiinni -ohjelman sisarushankkeiden kanssa: Metsäturvemailla – ratkaisuja päästöjen hillintään ja hiilinielujen kasvattamiseen (Turnee), Turvetuotantoalueiden ilmastokestävät jatkokäyttömahdollisuudet (Tuija) ja Suonpohjien hiilineutraali uusiokäyttö: edellytykset ja toimenpiteet (Uusisuo) ja Suonpohjien hiiliviisaan jatkokäytön suunnittelu (JälkiHiili). Lisäksi SysteemiHiili-hankkeessa tehtiin tiivistä yhteistyötä useampien ohjelman ulkopuolisten hankkeiden kanssa, mm. STN/IBC-Carbon, Suomen Akatemian PortRight ja EU Horizon Merlin.

Hankkeen aikana esittelimme tuloksiamme Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskusten valuma-aluekoordinaattoreille sekä ilmastoverkoston ja vesienhoidon asiantuntijoille useissa tilaisuuksissa. Kiitämme tapaamisiin osallistuneita henkilöitä hedelmällisestä ja sujuvasta yhteistyöstä.

Hankkeen ohjausryhmän muodostivat seuraavat henkilöt:

- Lauri Ahopelto (maa- ja metsätalousministeriö, Olle Häggbom 31.12.2021 asti), puheenjohtaja
- Olli-Pekka Pietiläinen (ympäristöministeriö)
- Ritva Isomäki (Pohjois-Pohjanmaan liitto)
- Soili Ingelin (Pirkanmaan ELY-keskus)
- Jukka Hassinen (Pohjois-Savon ELY-keskus)

Anne-Mari Rytkönen (Pohjois-Pohjanmaan ELY-keskus, maa- ja metsätalousministeriössä 17.10.2022-30.6.2023, sijainen Markus Saari 2.11.2022 alkaen, varajäsen Jaana Rintala)

- Riikka Myllylä (Metsähallitus, Antti Maukonen 31.8.2022 asti)
- Jari Kauhanen (Maa- ja metsätaloustuottajain Keskusliitto, MTK, Pohjois-Savo)
- Miia Saarimaa (Suomen metsäkeskus)
- Lauri Rantala (Micropolis Oy)
- Mikko Peltoniemi (Luonnonvarakeskus, Luke)
- Laura Härkönen (Suomen ympäristökeskus, Syke), sihteeri

Kiitämme ohjausryhmää ja sen puheenjohtajaa aktiivisuudesta ja erittäin asiantuntevista sekä työtä rikastuttaneista kommentteista.

Lopuksi haluamme kiittää maa- ja metsätalousministeriötä hankkeen rahoituksesta ja Hiilestä kiinni -ohjelman ohjelmapäälliköitä Mikko Pohjolaa ja Marjaana Suorsaa hyvästä yhteistyöstä hankkeen eri vaiheissa.

Toivottavasti laaja-alaisen ja kunnianhimoisen hankkeen tulokset palvelevat niin viranomaisia, neuvontajärjestöjä, toiminnanharjoittajia, suunnittelijoita kuin tutkijoita heidän työssään ja edistävät ilmastoviisaiden ja kokonaiskestävien ratkaisujen toteuttamista maankäyttösektorilla.

Tekijät

Sisällys

Tiivistelmä.....	3
Sammandrag.....	4
Abstract	5
Esipuhe	7
1 Johdanto.....	14
1.1 Tavoitteet	14
1.2 Toteutus	14
1.3 Lähestymistavat	16
2 Maaekosysteemien hiilinielut ja -prosessit	19
2.1 Tausta ja tavoitteet	19
2.2 Aineisto ja menetelmät.....	20
2.3 Tulokset ja johtopäätökset.....	20
2.3.1 Alueelliset kasvihuonekaasutaseet	20
2.3.2 Metsien käytön ja ilmastomuutoksen vaikutukset hiilitaseeseen	23
2.3.3 Vanhojen metsien hiilensidonta	24
2.3.4 Kansallisen hiilineutraalius- ja metsien suojelutavoitteiden yhdenmukaisuuden arviointi.....	24
2.4 Miten eri toimijat voivat hyödyntää tuloksia?	25
2.5 Suositukset	25
2.5.1 Toimintasuositukset.....	25
2.5.2 Tutkimussuositukset	26
2.6 Lähteet	26
3 Pintavesien tummuminen – muutostrendit ja mahdollisuudet hillitä tummumista	29
3.1 Hiilitrendit ja muutoksiin vaikuttavat tekijät	29
3.1.1 Tausta ja tavoitteet	29
3.1.2 Aineisto ja menetelmät.....	29
3.1.3 Tulokset.....	30
3.2 Vesistöjen hiilitaseet	31
3.2.1 Tausta ja tavoitteet	31
3.2.2 Aineisto ja menetelmät.....	31
3.2.3 Tulokset.....	31
3.3 Mahdolliset keinot suometsien hoidossa tummumisen hillitsemiseksi	33
3.3.1 Tausta ja tavoitteet	33
3.3.2 Aineisto ja menetelmät.....	33
3.3.3 Tulokset.....	33
3.4 Johtopäätökset.....	35
3.5 Miten eri toimijat voivat hyödyntää tuloksia?	36

3.6 Suositukset	36
3.6.1 Toimintasuositukset	36
3.6.2 Tutkimussuositukset	37
3.7 Lähteet	37
4 Vemala TOC sekä maankäyttö- ja ilmastoskenaarioiden vaikutukset orgaanisen hiilen kuormitukseen	41
4.1 Tausta ja tavoitteet	41
4.2 Aineisto ja menetelmät	41
4.2.1 Uusi hydrologinen malli	41
4.2.2 TOC-mallin kuvaus	42
4.2.3 Hiilen kierron kehittäminen biogeokemikaalisessa mallissa	42
4.2.4 Skenaarioiden kuvaus	43
4.3 Tulokset	44
4.3.1 Muutokset TOC-huuhtoumissa maa-alueilta	45
4.3.2 TOC-tase järvissä ja järven sisäiset häviöt skenaarioissa	46
4.4 Johtopäätökset	47
4.5 Miten eri toimijat voivat hyödyntää tuloksia?	47
4.6 Suositukset	47
4.6.1 Toimintasuositukset	47
4.6.2 Tutkimussuositukset	48
4.7 Lähteet	48
5 Päätös- ja systeemianalyysin menetelmät valuma-alue suunnittelussa ja ilmasto-vaikutusten arvioinnissa	51
5.1 Tausta ja tavoitteet	51
5.2 Aineisto ja menetelmät	51
5.2.1 Tarkasteltavat menetelmät	52
5.2.2 Tapaustutkimukset	52
5.3 Tulokset ja johtopäätökset	53
5.3.1 Ohjeisto systeemianalyttisten menetelmien tarkoituksenmukaiseen valintaan	53
5.3.2 Komppasuon turvetuotantoalueen jatkokäyttövaihtoehtojen arviointi	53
5.3.3 Miehonsuo-Turvesuon jatkokäyttövaihtoehtojen monitavoitteinen arviointi	53
5.3.4 Turve-Arvi-työkalu käytöstä poistuneiden turvetuotantoalueiden jatkokäyttövaihtoehtojen arviointiin	55
5.3.5 Kiuruveden vesienhallinta- ja ilmastomuutostarkastelu	55
5.3.6 Monitavoitearviointiin, PREBAS-malliin ja paikkatietoaineistoon perustuva menetelmä metsänhoidon suunnitteluun ja sen soveltaminen Kiuruvedellä	56
5.3.7 Ilmastotiekartta	56
5.4 Miten eri toimijat voivat hyödyntää tuloksia?	57
5.5 Toimintasuositukset	57

5.6	Lähteet	58
6	Maa- ja metsätalouden ilmastotoimenpiteiden ja ohjauskeinojen hyväksyttävyys	60
6.1	Tausta ja tavoitteet	60
6.2	Aineisto ja menetelmät	60
6.2.1	Haastattelututkimus turvetuotantoalueiden jatkokäyttövaihtoehtoista	60
6.2.2	Turpeennostosta luopuvien maanomistajien mielipiteet esiin kyselyllä	61
6.2.3	Kiuruveden ja Pohjois-Savon maa- ja metsätilallisille suunnattu mielipidekysely	61
6.3	Tulokset	61
6.3.1	Taloudellinen tuotto ja omistusoikeus tärkeitä	61
6.3.2	Kiuruveden ja Pohjois-Savon maa- ja metsätilallisten suhtautuminen ilmasto- ja ympäristötoimenpiteisiin	63
6.4	Johtopäätökset	64
6.5	Miten eri toimijat voivat hyödyntää tuloksia?	65
6.6	Toimintasuositukset	65
6.7	Lähteet	65
7	Turvetuotantoalueiden jatkokäyttövaihtoehtojen kokonaisarviointi	67
7.1	Tausta ja tavoitteet	67
7.2	Aineisto ja menetelmät	67
7.3	Tulokset ja johtopäätökset	68
7.4	Miten eri toimijat voivat hyödyntää tuloksia?	71
7.5	Suositukset	71
7.5.1	Toimintasuositukset	71
7.5.2	Tutkimussuositukset	72
7.6	Lähteet	72
8	Maa- ja metsätalouden vesienhallinta- ja ilmastokestävyys	
	Tapaustarkastelut Pohjois-Savossa	74
8.1	Tausta ja tavoitteet	74
8.2	Aineisto ja menetelmät	75
8.3	Tulokset ja johtopäätökset	75
8.3.1	Valuma-aluekohtaiset tarkastelut vesienhallinnan ja ilmastomuutoksen haasteista sekä niiden ratkaisusta	75
8.3.2	Valuma-alue suunnittelun kannalta tärkeimpien alueiden tunnistaminen Kiurujoella	76
8.3.3	Pohjois-Savon ilmastotiekarttatyössä kehitetty lähestymistapa toimenpiteiden valintaan	78
8.4	Miten eri toimijat voivat hyödyntää tuloksia?	79
8.5	Toimintasuositukset	80

9 Yhteenveto	82
9.1 Hiilitasetarkastelut maa-alueilla ja vesistöissä.....	82
9.2 Turvetuotantoalueiden jatkokäyttöä koskevat arvioinnit.....	83
9.3 Maankäyttösektorin ilmastotoimenpiteiden hyväksyttävyys	84
9.4 Lähestymistavat valuma-aluesuunnittelun ja ilmastokarttatyön tueksi	84
9.5 Jatkotutkimusta ja valuma-aluesuunnittelun kehittämistä koskevat suositukset	85
9.6 Toimintasuositukset	86
9.7 SysteemiHiili-hankkeen julkaisut	90
Liite 1. Vemalan biogeokemiallinen mallikaavio ja Kiuruveden valuma-alueen TOC- ominaiskuormitus.....	92
Liite 2. Lisätietoja Pohjois-Savon alueellisen turvallisuuden tilannekuvasta	94
Lähteet.....	94

1 Johdanto

**Mika Marttunen, Saara Sivonen, Katri Haatainen,
Sari Väisänen, Mari Annala ja Martin Forsius**

1 Johdanto

Ilmastomuutoksen hillintään ja sopeutumiseen liittyvän tiedon hajanaisuus ja synteesien puute ovat vaikeuttaneet tutkimustulosten kokonaisvaltaista hyödyntämistä maankäyttösektorilla. Tartuimme SysteemiHiili-hankkeessa haasteeseen ja päätimme kehittää parempia menetelmällisiä valmiuksia ja ymmärrystä maankäytön muutosten vaikutusketjuista ja kokonaisvaikutuksista. Hankkeen läpileikkaavina teemoina olivat valuma-
aluenäkökulma, systeemisyys, kokonaisvaltaisuus ja yhteiskehittäminen.

1.1 Tavoitteet

SysteemiHiili-hankkeen (Ilmastotoimenpiteiden kokonaisvaltainen arviointi valuma-alueilla - Systeemi-analyysillä kohti hiilineutraalia maankäyttöä) päätavoitteena oli lisätä ymmärrystä, vuoropuhelua ja menetelmällisiä valmiuksia maankäytön muutosten vuorovaikutusketjuista ja kokonaisvaikutuksista sekä tukea ilmastoviisaiden ja monihyötyisten ratkaisujen käyttöönottoa kansallisesti sekä alueellisesti ja paikallisesti valuma-alueitasolla.

Hankkeen yksityiskohtaisemmat tavoitteet olivat:

- Kehittää ekosysteemipalvelukonseptiin perustuva järjestelmä hiilivirtojen hallintaan valuma-alueitasolla ja tuottaa tietoa maankäytön ja ilmastomuutoksen vaikutuksista hiilitaseisiin.
- Lisätä tietopohjaa maa-alueilta vesistöihin huuhtoutuvan hiilen käyttäytymisestä sekä etsiä ratkaisuja, jotka hillitsevät maankäytön ilmastovaikutuksia ja vesien tummumista.
- Kehittää menetelmiä kokonaisvaltaisiin valuma-alue-tarkasteluihin, joilla voidaan arvioida maankäytön muutosten ja erilaisten toimenpiteiden vaikutuksia esim. KHK-päästöihin, vesitalouteen, vedenlaatuun ja monimuotoisuuteen.
- Lisätä valmiuksia systeemianalyttisten menetelmien tehokkaaseen soveltamiseen monimutkaisten kokonaisuuksien ja systeemisten vaikutusten hahmottamiseksi sekä luonnontieteiden, ympäristöpolitiikan suunnittelun ja sidosryhmien välisen vuoropuhelun edistämiseksi.
- Tutkia turvetuotantoalueiden uusien maankäyttövaihtoehtojen ja niitä edistävien ohjauskeinojen vaikutuksia ja hyväksyttävyyttä ja tukea ilmastoviisaiden ja kestävien ratkaisujen valintaa.
- Edistää valtakunnallisten ilmastotavoitteiden saavuttamista etsimällä hyväksyttäviä ja kestäviä ratkaisuja alueellisessa ilmastotyössä pilottialueilla.
- Edistää hankkeessa tuotettavan ja koottavan tietopohjan ja uusien ratkaisujen hyödynnettävyyttä päätöksenteossa ja käytännön toimintaympäristöissä yhteiskehittämisen menetelmillä.

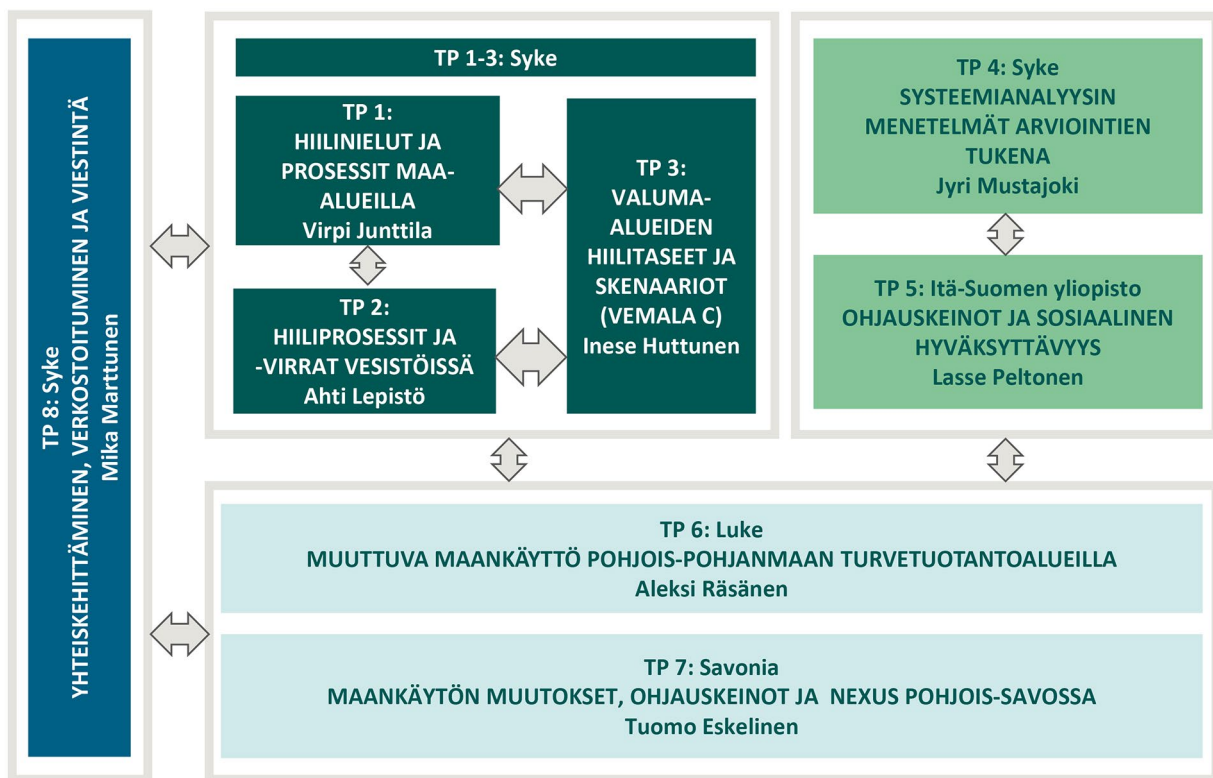
1.2 Toteutus

Laaja-alainen ja moniulotteinen hanke muodostui kahdeksasta työpaketista, jotka kytkeytyivät toisiinsa monin tavoin: 1) hiilinielut ja prosessit valuma-alueilla, 2) hiiliprosessit ja -virrat vesistöissä, 3) valuma-alueiden hiilitaseet ja skenaariot (Vemalan kehitystyö ja soveltaminen), 4) systeemianalyysin menetelmät

arviointien tukena, 5) ohjauskeinot ja sosiaalinen hyväksyttävyyys, 6) muuttuva maankäyttö Pohjois-Pohjanmaan turvetuotantoalueilla, 7) maankäytön muutokset, ohjauskeinot ja Nexus Pohjois-Savossa ja 8) yhteiskehittäminen, verkostoituminen ja viestintä. Työpakettit ja vastuuorganisaatiot on esitetty kuvassa 1.

Työpakettit 1–3 käsittelivät maa- ja vesiekosysteemien hiilivirtoja ja muodostivat toisiaan täydentävän kokonaisuuden. Työpaketti 4 pyrki kehittämään järjestelmällisten ja systeemisten lähestymistapojen soveltamista maankäyttösektorin suunnittelussa ja se osallistui aktiivisesti turvetuotantoalueiden jatkokäyttömuotojen arviointia (työpaketti 6) ja valuma-alue-suunnittelun kehittämistä (työpaketti 7) koskeviin tapaustarkasteluihin. Työpakettin 5 kyselytutkimusten laadintaan osallistuivat turvetuotanto-alueiden jatkokäytön (työpaketti 6) sekä maa- ja metsätalouden (työpaketti 7) asiantuntijat.

Hankkeessa tehtiin tapaustarkasteluja valtakunnallisella, alueellisella ja paikallisella tasolla. Valtakunnallisen tason tarkasteluja olivat pintavesien tummumiskehityksen ja sen syiden analysointi. Alueellisia tarkasteluja oli useita ja ne liittyivät Vemala- ja PREBAS-skenaariotarkasteluihin, valuma-alue-tason vesienhallinta- ja ilmastotarkasteluihin sekä Pohjois-Savon ilmastokarttatyöhön. Paikallisen tason tarkasteluja tehtiin mm. entisten turvetuotantoalueiden jatkokäyttövaihtoehtojen arvioinneissa lin Komppasuolla ja Oulun Miehonso-Turvesuolla.



Kuva 1. Hankkeen työpakettit (TP) vetäjäineen ja työpakettien väliset kytkökset.

Hankkeen toteutuksesta vastasivat Suomen ympäristökeskus (Syke), Luonnonvarakeskus (Luke), Savonia ja Itä-Suomen yliopisto (UEF). Mika Marttunen (Syke) vastasi hankkeen koordinoinnista Martin Forsiuksen (Syke) tukemana. Hankkeen kokonaiskustannukset olivat noin 1,7 milj. euroa. Hanke sai rahoituksen maa- ja metsätalousministeriön Hiilestä kiinni -tutkimus- ja innovaatio-ohjelmasta.

Hankkeen sisäinen vuoropuhelu oli vilkasta. Työpakettien välillä oli monia liittymäkohtia. Aktiivisen yhteydenpidon avulla tieto ja ideat siirtyivät työpakettien välillä ja yhteiskehittäminen edisti uusien oivallusten syntymistä. Erityisen paljon yhteistyötä eri työpakettien kanssa teki työpaketti 4, jossa kehitettiin ja sovellettiin systeemianalyysin menetelmiä tapaustarkasteluissa.

Hanke oli hyvin verkostoitunut. Teimme tiivistä yhteistyötä seuraavien Hiilestä kiinni -ohjelman sisä-rushankkeiden kanssa: Metsät turvemilla – ratkaisuja päästöjen hillintään ja hiilinielujen kasvattami- seen (Turnee), Turvetuotantoalueiden ilmastokestävät jatkokäyttömahdollisuudet (Tuija), Suonpohjien hiilineutraali uusiokäyttö: edellytykset ja toimenpiteet (Uusisuo), Suonpohjien hiiliviisaan jälkikäytön suunnittelu (JälkiHiili). Lisäksi SysteemiHiili-hankkeessa tehtiin tiivistä yhteistyötä useiden Hiilestä kiinni -ohjelman ulkopuolisten hankkeiden kanssa, mm. IBC-Carbon (STN), PortRight (Suomen Akate- mia) ja Merlin (EU Horizon).

Järjestimme tapaamisia ELY-keskusten valuma-aluekoordinaattorien kanssa liittyen hankkeessa ke- hitettyyn valuma-aluesuunnittelua tukeviin vesienhallinta- ja ilmastokestävyystarkasteluihin. ELY-kes- kusten ilmasto- ja vesienhoitoverkostojen kanssa suunnittelimme temaattisia tietoisuuksia, joista kaksi toteutettiin syksyllä 2023 (alueelliset hiilitasetarkastelut, maanomistajien asenteet ja suhtautuminen ilmastotoimenpiteisiin) ja kaksi on tarkoitus toteuttaa alkuvuodesta 2024 teemoina valuma-alueiden maankäytön vesienhallinnan ja ilmastomuutoksen haasteet sekä vesien tummuminen ja negatiivisen kehityskulun pysäyttäminen.

Syksyllä 2023 järjestämme kuusi kaikille avointa webinaaria, jossa esiteltiin hankkeen keskeisiä tulok- sia. Hankkeen tuloksia on koottu [hankesivulle](#), johon on koottu myös hankkeen julkaisut eri kanavissa. Hankkeen oma uutiskirje julkaistiin 2–3 kertaa vuodessa hankesivulla yhteensä kuusi kertaa.

1.3 Lähestymistavat

Lähtökohdat eri työpaketeissa olivat työtä aloitettaessa hyvin erilaiset. Osassa työpaketteja oli mah- dollista jatkaa varsin saumattomasti aiemmissa hankkeissa käynnistyneen työn pohjalta. Tällaisia työ- paketteja olivat hiilinielut ja prosessit maa-alueilla (TP1, taustalla IBC-Carbon -hanke), hiiliprosessit ja virrat vesistöissä (TP2, taustalla MetsäVesi-hanke) ja Vemala-mallin hiiliosamallin kehitystyö (TP3). Muissa työpaketeissa (TP4–TP7) aikaa kului alkuvaiheessa runsaasti työpaketin töiden sisällön ideoin- tiin ja konkretisointiin.

Hankkeessa sovellettujen menetelmien kirjo oli laaja: kirjallisuuskatsaukset, tilastolliset tarkastelut, paikatietotarkastelut, matemaattiset mallit, systeemi- ja päätösanalyysin menetelmät, haastattelut, kyselytutkimukset ja työpajat. Hankkeen keskeiset tuotokset on esitetty taulukossa 1.

Lähestymistapa	Tuotokset ja työpaketti (TP), jossa tuotettu
Kansainväliset kirjallisuuskatsaukset	Turvetuotantoalueiden jatkokäytön vaikutukset, TP6 Turvemaiden metsätalous ja vesien tummuminen, TP2
Tilastolliset tarkastelut	Suomen pintavesien tummuminen 1990–2020, ja siihen vaikuttavat tekijät, TP2
Laskentamallien kehitys	Vemala: orgaanisen hiilen kuvauksen kehittäminen, TP3 Vemala: hydrologisen osamallin sisällyttäminen malliin, TP3 Vemala: järven biogeokemiallisen mallin kehittäminen, TP3 PREBAS: epävarmuuslaskennan kehittäminen, TP1
Uudet lähestymistavat valuma-aluesuunnitteluun	Monitavoitearviointi turvetuotantoalueiden jatkokäyttövaihtoehtojen arvioinnissa, TP4 ja TP6 Valuma-alueen vesienhallinta- ja ilmastokestävyystarkastelut, TP4 ja TP7 Tietokortit maa- ja metsätalouden toimenpiteiden vaikutuksista, TP4 ja TP7

Lähestymistapa	Tuotokset ja työpaketti (TP), jossa tuotettu
Hiilitasetarkastelut ja ilmastotiekarttatyö	Maakuntatason hiilitasetarkastelut, TP1 Keskinäisriippuvuuksien huomioonottaminen ilmastotiekarttatyössä, TP7 ja TP4 Valtakunnallinen vesistöjen hiilitase, TP2
Kyselytutkimukset maanomistajien asenteista ja toimenpiteiden hyväksyttävyydestä	Turvetuotantoalueiden maanomistajat, TP5 Pohjois-Savon ja Kiuruveden maa- ja metsätilalliset, TP5
Päätöstukityökalut	TurveArvi: turvetuotantoalueiden jatkokäyttömuotojen soveltuvuuden arviointi, TP4 ja TP6
Tapaustarkastelut	Maankäyttö- ja ilmastoskenaariot Kiurujoen vesistöalueella 2030–2059 (PREBAS ja Vemala – mallien yhteiskäyttö), TP1 ja TP3 Iin Komppasuon turvetuotantoalueen jatkokäyttövaihtoehtojen arviointi, TP4 ja TP6 Oulun Turvesuo- Miehonsuon turvetuotantoalueen jatkokäyttövaihtoehtojen arviointi, TP6 ja TP4 Vesienhallinta- ja ilmastokestävyydestarkastelut Kiurujoen valuma-alueella, TP4, TP6 ja TP7

Maaekosysteemien hiilinielut ja -prosessit

**Virpi Junttila, Anu Akujärvi, Jose Cano-Bernal, Martin Forsius,
Maria Holmberg, Katri Rankinen ja Torsti Schulz**

2 Maaekosysteemien hiilinielut ja -prosessit

Maaekosysteemien hiilinieluja ja -prosesseja tarkasteltiin työpaketissa 1 (TP1). Kehitimme mallinnukseen perustuvan järjestelmän, jonka avulla ekosysteemien hiilivirtoja ja kasvihuonekaasutaseita voidaan arvioida paikallisesti. Järjestelmää sovellettiin ja arvioitiin hankkeen kohdevaluma-alueilla, joille tuotimme arviot metsien, peltojen ja ojittamattomien soiden kasvillisuuden ja maaperän hiilitaseesta. Laskentajärjestelmän avulla voidaan arvioida maaekosysteemien tuottamaa hiilensidonnan ekosysteemipalvelua alueellisesti.

2.1 Tausta ja tavoitteet

Alueellisten päästöjen vähentämiseksi ja nielujen vahvistamiseksi on löydettävä juuri kyseiselle alueelle sopivat ja tehokkaasti vaikuttavat keinot. Alueellisten ilmastosuunnitelmien pohjaksi tarvitaan kin alueellisesti mahdollisimman tarkkaa tietoa kasvihuonekaasutaseiden (KHK-tase) nykytilasta ja niiden muutoksista. Päästöjen määrä pinta-alaa kohti vaihtelee suuresti riippuen alueen maankäyttömuodosta ja maaperästä. Eri maankäyttöluokkien pinta-alojen jakautuminen myös vaihtelee maakunnittain. Metsien eri hakkuutasoilla on myös suuri vaikutus hiilinielujen ja varastojen kehitykseen. Toisaalta osa päästö- ja nielulähteistä tunnetaan tarkemmin kuin muut – erityisesti luonnon ainekiertojen arviointiin liittyy paljon epävarmuuksia, kun taas ihmisperäiset päästöt pystytään arvioimaan tarkemmin.

Työpaketin tavoitteena oli kehittää KHK-taseiden ja hiiliprosessien laskentajärjestelmä (yhteistyössä useiden muiden tutkimushankkeiden kanssa). Kehitettyä järjestelmää sovellettiin hankkeen kohdevaluma-alueilla selvittäen metsien hakkuutason vaikutuksia hiilensidontaan, hiilivarastoihin ja vesistövaikutuksiin nyt ja muuttuvassa ilmastossa. Arvioimme myös järjestelmän soveltuvuutta valtakunnallisiin maankäytön hiilineutraaliuden ja ekologisen kestävyys arviointeihin.

Maankäytön ilmastovaikutusten vähentämisen tueksi laskimme Manner-Suomen 18 maakunnan nykytilan kasvihuonekaasupäästöt ja –nielut sekä epävarmuusarviot viidelle maankäyttöluokalle: rakennetut alueet, maatalousalueet, metsät, sisävedet ja suoalueet. Näissä maankäyttöluokissa merkittävää hiilen sidontaa arvioitiin olevan vain metsissä ja ojittamattomissa soissa. Mallinsimme myös metsien hiilitasetta epävarmuuksineen maakunnittain koko Manner-Suomen metsissä eri ilmasto- ja hakkuuskenaarioiden vaikutuksessa aikavälillä 2015–2050. Kehitettyllä laskentajärjestelmällä tuotettiin myös Vemala-mallin tarvitsemat tiedot metsien kariketuotannosta ja maaperän hiilimäärästä, ja osallistuttiin Vemala-mallin skenaarioajojen analysointiin (ks. luku 4). Karttapohjaista aineistoa tuotettiin myös maankäytön monitavoitteista optimointia varten (ks. luku 5). Tarkastelimme myös vanhojen metsien hiilitasetta yleisesti, sekä luontoarvoiltaan arvokkaimmiksi arvioitujen alueiden hiilitaseen kehitystä aikajaksolla 2015–2050. Lisäksi mallinsimme tapaustarkasteluna ilmaston ja maankäytön muutosten sekä happamoitumisesta palautumisen vaikutusta tärkeän lintujärven tummumisen trendeihin historiallisen aineiston pohjalta.

2.2 Aineisto ja menetelmät

Kasvihuonekaasupäästöjen laskentaan käytettiin FRES- ja ALas-malleja (Karvosenoja 2008; Lounasheimo ym. 2020; Paunu ym. 2021). Metsän kasvun ja hiilitaseen laskentaan käytettiin prosessipohjaista PREBAS-mallia, jossa hyödynnettiin Yasso-mallin kuvausta kivennäismaan orgaanisen aineen hajoamisesta (Valentine & Mäkelä 2005; Minunno ym. 2016; 2019). Mallien lisäksi käytettiin pinta-alaperusteisia päästökertoimia (Holmberg ym. 2023a). Kertoimilla laskettiin päästöt metsämaalta (metaani, dityppioksidi), viljelymaalta (hiilidioksidi), sisävesiltä (metaani, hiilidioksidi), turvetuotantoalueilta sekä ojittamattomilta soilta (metaani, hiilidioksidi, dityppioksidi).

PREBAS-mallin lähtöaineistona käytettiin koko maan metsät kattavaa monilähde-VMI (MVMI) aineistoa. PREBAS-mallin syöttötietoina toimivat päivittäiset sääaineistot (joko toteutunut sää tai ilmastomalleista saatava säädata) sekä mahdolliset hakkuut. Hakkuut toteutettiin satunnaisessa järjestyksessä olevilla kuvioilla, joilla niitä Tapion hyvän metsänhoidon suositusten pohjalta oli mahdollisuus toteuttaa, kunnes tavoitteeksi asetettu hakkuutaso tuli vuosittain täyteen. Hakkuutaso määräytyi annettujen skenaarioiden pohjalta suhteessa vuosien 2015–2021 keskiarvoon (enemmän kuin nykyään, nykytasoa, vähemmän kuin nykyään ja ei hakkuuta).

Ilmastonmuutosta kuvattiin kolmella eri ilmastoskenaariolla: RCP2.6 (lievä ilmastonmuutos, lähellä Pariisin ilmastopimuksen tavoitetta), RCP4.5 (melko voimakas ilmastonmuutos) ja RCP8.5 (erittäin vakava ilmastonmuutos). Epävarmuusanalyysi toteutettiin poimimalla mallin rakenteeseen ja syöttötietoihin liittyvistä epävarmuusjakaumista satunnaisia otoksia ja laskemalla tulokset eri otoksilla lukuisia kertoja (Monte-Carlo simulointi). Simuloinneista laskettiin erikseen myös suojelualueiden, potentiaalisten suojelualueiden sekä kivennäismaan ja ojitetun turvemaiden metsien hiilitase.

Vanhojen metsien kasvua ja hiilensidontaa tutkittiin kolme kertaa samoilta paikoilta toistettujen inventointien perusteella. Aineisto koostui vuosina 1991–2019 tehdyistä mittauksista, jotka tehtiin 27:ssä suojelualueilla sijaitsevassa luonnontilaisessa havupuuvaltaisessa metsikössä Etelä- ja Keski-Suomessa. Selvitimme myös, onko uhanalaisten epifyyttijäkälien lajirunsaudella ja esiintymien määrällä yhteyttä metsien hiilivaraston kokoon samoilla paikoilla vuosina 2020–2021 tehdyn lajikartoituksen perusteella.

Mallinsimme tapaustarkasteluna yksittäisen valuma-alueen orgaanisen hiilen kuormituksen vaikutuksia vesistön tummenemiseen 1990-luvulta lähtien tehtyjä havaintojen perusteella. Teimme skenaariot happamoittavalle laskeumalle, sekä ilmaston ja maankäytön muutoksille ja laskimme niiden vaikutuksen tummenemiseen prosessipohjaisilla INCA- (Futter ym. 2007; 2014) ja MyLake-malleilla (Saloranta & Andersen 2007).

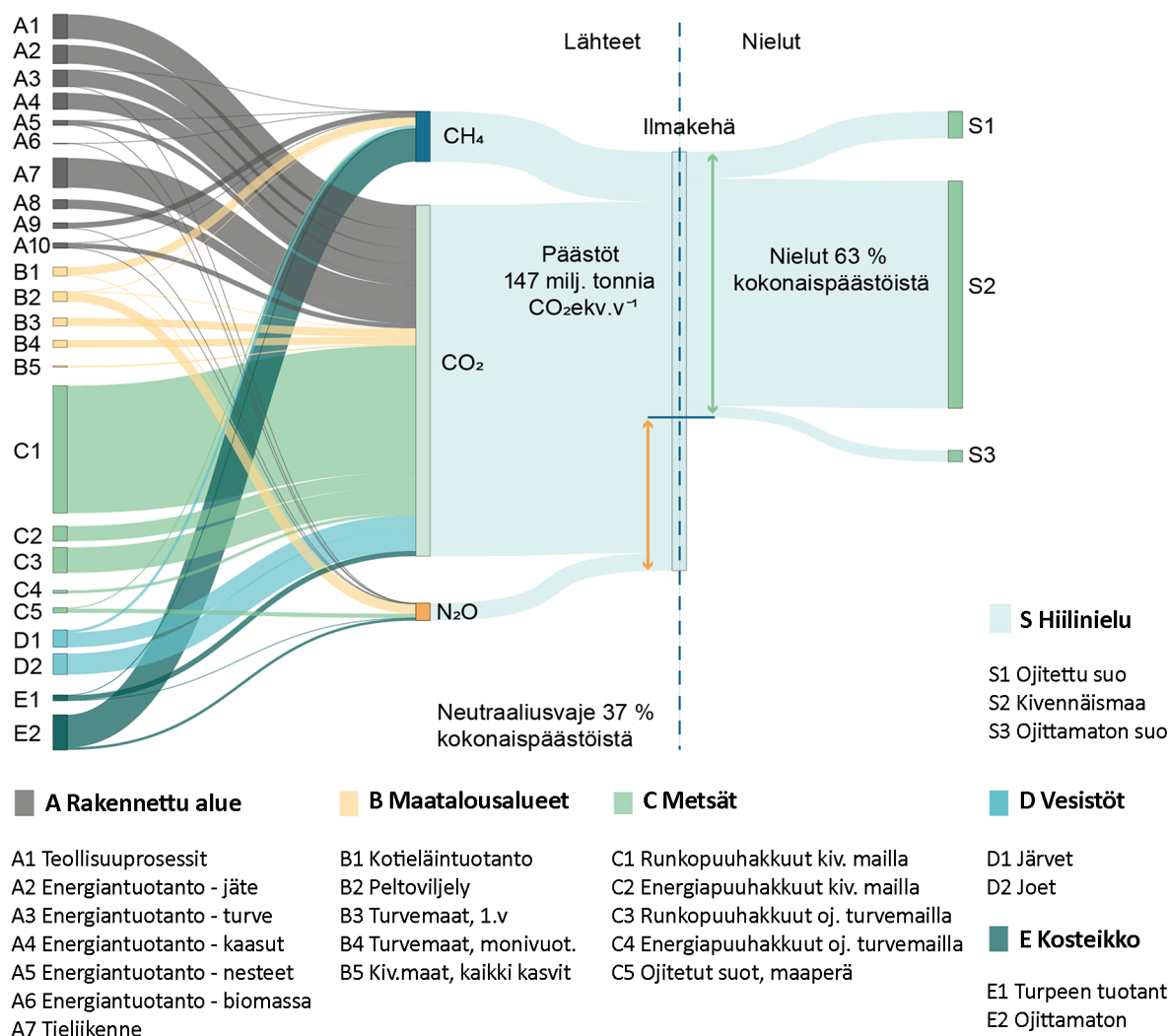
2.3 Tulokset ja johtopäätökset

2.3.1 Alueelliset kasvihuonekaasutaseet

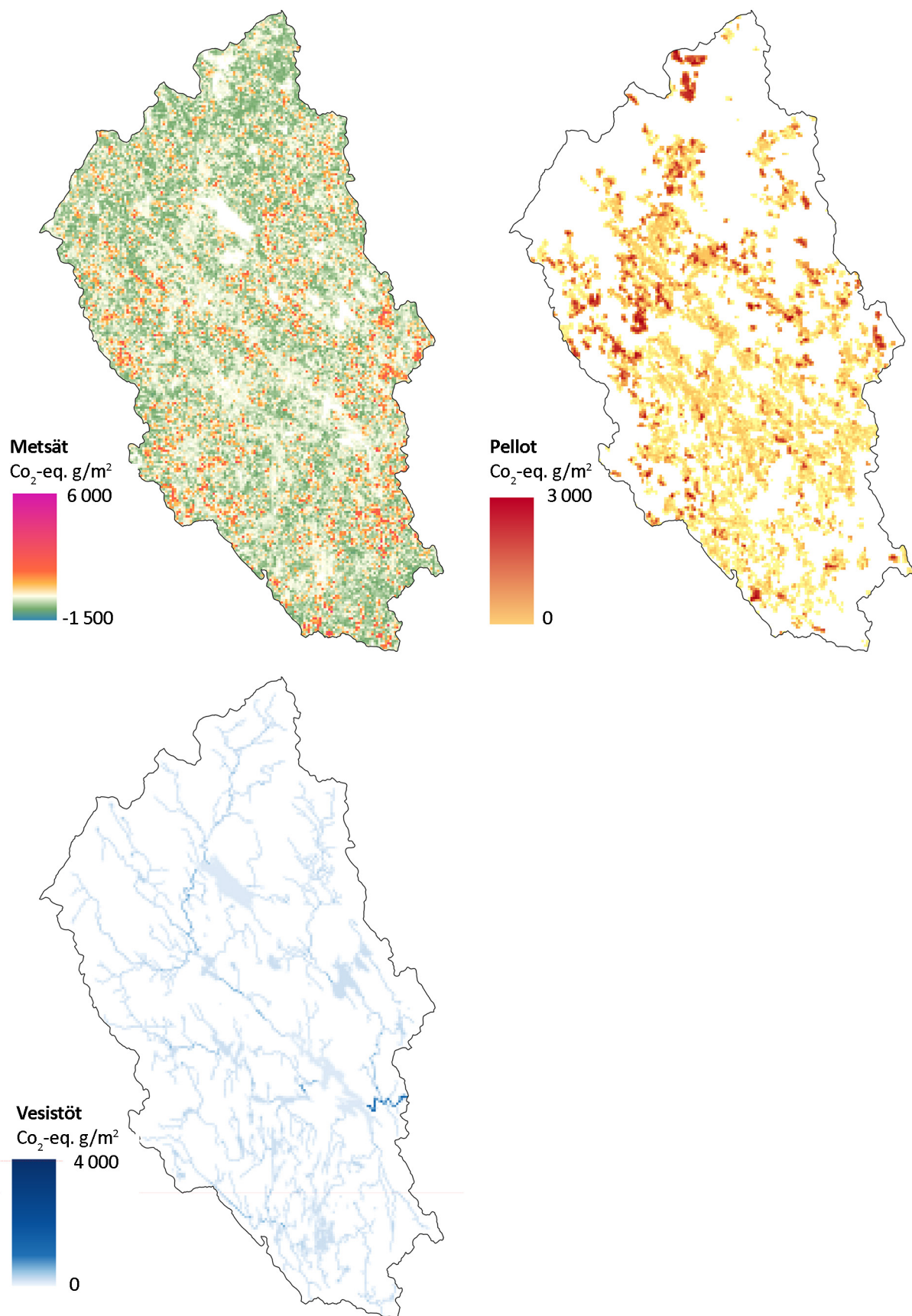
Saimme Manner-Suomen 18 maakunnan vuotuisiksi bruttopäästöiksi yhteensä $147,2 \pm 6,8$ Mt CO₂ekv (Holmberg ym. 2023a; 2023b). Tämä luku kuvaa jakson 2017–2025 tilannetta. Sähköntuotannon, teollisuuden, liikenteen sekä muiden rakennettujen alueiden vuosittaiset päästöt olivat noin kolmanneksen kaikista päästöistä (Kuva 2). Viljelyn päästöt olivat suurimmat turvemaille. Kotieläintuotanto ja peltoviljely aiheuttivat noin puolet maatalouden päästöistä, loput olivat maaperäpäästöjä kivennäismailta (4 %) ja turvemailta (43 %). Metsän osuus maamme kasvihuonekaasutaseesta on merkittävä. Metsänhakkuissa poistuva hiili sekä ojitetun metsämaan päästöt olivat yhdessä 42 % kaikista päästöistä.

Metsät ja ojittamattomat suot toimivat hiilen nieluina. Vuosittainen hiilensidonta ilmakehästä oli 93,2 ± 13,7 Mt CO₂ekv., josta suurin osuus (96 %) oli kangasmailla. Hiilinielut korvasivat siten 63 % kaikista päästöistä ja nettopäästöt olivat 53,9 ± 15,3 Mt CO₂ekv vuodessa.

Vain Uudellamaalla rakennetut alueet olivat maakunnan suurin päästölähde, muissa maakunnissa yli puolet päästöistä tulivat muista maankäyttötavoista. Metsänhakkuut aiheuttivat yli 60 % neljän maakunnan päästöistä (Etelä- ja Pohjois-Savo, Pohjois-Karjala ja Keski-Suomi). Etelässä ja länsirannikolla hiilen sidonta metsiin oli suurimmillaan suotuisten metsänkasvuolosuhteiden ansiosta. Matalammista lämpötiloista huolimatta Lapin ja Pohjois-Pohjanmaan laajat metsät edustivat yhteensä lähes kolmannesta koko maan metsänielusta. Etelä- ja Keski-Pohjanmaalla maatalous aiheutti 26 % ja 29 % maakunnan kaikista päästöistä, ja runsaat 10 % muiden Pohjanmaan maakuntien päästöistä. Muualla maataloudesta tuli alle 10 % maakuntien päästöistä. Ojittamattomien soiden päästöt olivat korkeimmat pohjoisten alueiden avosoilla ja saranevoilla (Lappi, Kainuu, Pohjois-Pohjanmaa) ja matalimmat alueille, joissa on paljon puustoisia korpia ja rämeitä ja vain vähän nevaa ja saranevaa (Uusimaa, Päijät-Häme, Etelä-Karjala ja Etelä-Savo).



Kuva 2. Suomen vuosittainen KHK-tase nykytilanteessa. Vasemmalla maankäyttoluokkien kasvihuonekaasupäästöt, oikealla hiilinielut. Viivojen leveydet edustavat vuosittaista päästön tai nielun suuruutta. Eri maankäyttöryhmien päästöt on piirretty eri väreillä. Metsät (vihreät viivat C1 - C5) tuottavat suurimmat päästöt, mutta muodostavat myös tärkeimmät nielut (S1 ja S2). Ilmakehään vuosittain päästetyistä kaasuista (147 milj. tonnia hiilidioksidiekvivalenttia) vajaa kaksi kolmasosaa sitoutuu uudelleen kasvillisuuteen, jolloin ilmakehää lämmittämään jää runsas kolmannes päästöistä.



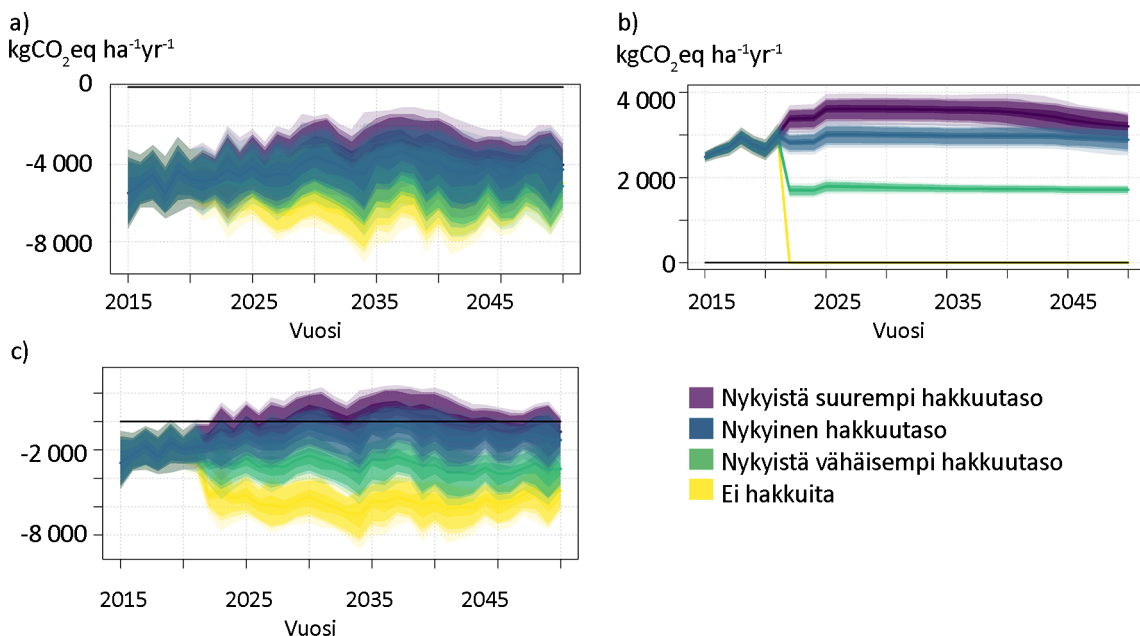
Kuva 3. Kiuruveden valuma-alueen keskimääräinen kasvihuonekaasutase nykytilassa v. 2017–2025: a) Metsät, b) Pellot ja c) Vesistöt. Positiiviset arvot kuvaavat kasvihuonekaasujen päästöjä ja negatiiviset arvot nieluja.

Tuotimme eri maankäyttöluokkien kasvihuonekaasutaseesta myös kartta-aineistoa 250 metrin tarkkuudella. Aineisto kattaa koko Manner-Suomen ja se on vapaasti saatavana (Holmberg ym. 2023b). Kartta-aineistosta voi valita esimerkiksi Kiuruveden valuma-alueen lähempään tarkasteluun ja vertailla eri maankäyttöluokkien nykyistä hiilitasetta (Kuva 3). Kartta-aineisto osoittaa, millä alueilla päästöt (positiivinen arvo kartalla) ja nielut (negatiivinen arvo kartalla) todennäköisimmin sijaitsevat. On kuitenkin muistettava, että tuloksiin liittyy malleista ja lähtöaineistosta johtuvaa epävarmuutta. Kartta-aineistoa voidaan käyttää esimerkiksi alueellisten ilmastosuunnitelmien vaikutusten arvioinnin tukena.

2.3.2 Metsien käytön ja ilmastomuutoksen vaikutukset hiilitaseeseen

Metsien maakuntakohtainen epävarmuusmallinnus paljasti, että metsien nettohiilitase ja sen epävarmuus vaihtelevat riippuen mallinnetusta maakunnasta ja ajanjaksosta (Junttila ym. 2023). Metsien hiilensidonnalla tarkoitetaan metsäekosysteemin fotosynteesissä vuosittain ilmakehästä sitoman hiilen määrää. Metsien hiilensidonta (Net Ecosystem Exchange, NEE) lasketaan fotosynteesissä sitoutuvan ja maaperän orgaanisen aineen hajotuksessa vapautuvan hiilen summana. Metsäekosysteemin nettohiilitase (Net Biome Exchange, NBE) taas on hiilensidonnasta ja hakkuissa poistuvan hiilen summa.

Metsien hiilensidonnasta arviot sisälsivät paljon mallista ja lähtöaineistoista johtuvaa epävarmuutta. Suurestikaan toisesta eroavien hakkuutasojen vaikutusta hiilensidontaan ei pystytty luotettavasti erottamaan toisistaan, vaikka hiilensidonnasta keskiarvoissa näkyikin pieniä eroja (Kuva 4a). Toisaalta metsistä hakkuiden myötä poistuvan hiilen määrä riippui hakkuutasosta selvästi (Kuva 4b). Metsäekosysteemin nettohiilitase vaihteli hakkuutason mukaan selvemmin hiilensidonnasta epävarmuudesta huolimatta, erityisesti toisistaan eniten eroavien hakkuuskenaarioiden välillä (Nykyistä suurempi hakkuutaso vs. ei hakkuuta) (Kuva 4c).



Kuva 4. Metsäekosysteemin kasvihuonekaasutaseet (CO₂-ekvivalenttina pinta-alaa kohti) merkittävästi muuttuneessa ilmastossa (RCP4.5) koko Suomen tasolla, kun hakkuutaso muuttuu vuoden 2021 jälkeen todellisista toteutuneista määristä eri hakkuuskenaarioiden mukaiseksi. a) Metsien hiilensidonta (NEE) eri hakkuuskenaariossa. b) Metsistä hakkuiden myötä poistuva biomassa (hiili). c) Metsien kasvihuonekaasutase nettona, kun hiilensidonnasta on vähennetty hakkuissa poistuva biomassa.

Tarkastellessa suurimpia epävarmuuden lähteitä, hakkuutason epävarmuus olikin useimmissa maakunnissa selvästi suurin epävarmuuden lähde vuosisadan puoliväliin ulottuvissa mallisimulaatioissa. Ilmastomuutoksen voimakkuuden ei havaittu vielä tällä aikavälillä vaikuttavan hiilensidontan tasoon selvästi, mutta ilmaston lämpeneminen kuitenkin voimisti hiilensidontaa. Tässä työssä ei mallinnettu maaperän ravinteiden määrän vaikutusta metsän kasvuun eikä erilaisia häiriöitä (metsäpalot, hyönteistuhot, myrskyt), jotka todennäköisesti rajoittavat kasvua ilmastomuutoksen edetessä.

Maakuntakohtaiset analyysit eri hakkuu- ja ilmastoskenaarioiden vaikutuksista osoittivat, että metsien hiilitase riippui ennen kaikkea metsän alkutilasta simulointijakson alussa johtuen kasvuolosuhteista ja aiemmasta metsänkäytöstä, simulointijaksolla tehtävien hakkuiden määrästä ja voimakkuudesta suhteessa pinta-alaan tai alkutilaan, sekä ilmastomuutokseen liittyvistä malleista (ilmastonmuutoksen voimakkuus ja eri ilmastomallien erot). Kaikilla alueilla metsien nettohiilinielu oli kuitenkin sitä suurempi, mitä vähemmän tällä aikajaksolla tehtiin hakkuita.

Valuma-alueen vesistökuormituksen mallinnuksen tulokset osoittivat metsähakkuiden muutokset ensisijaiseksi syyksi tapaustutkimukseen valitun Kukkiajärven tummenemiseen (Rankinen ym. 2023). Simulaatioiden mukaan happaman laskeuman väheneminen on hillinnyt orgaanisen hiilen huuhtoutumista jonkin verran. Toisaalta havaittu kahden asteen lämpötilan nousu selitti valuman ja orgaanisen hiilen huuhtoutumisen kasvua viimeisen 25 vuoden aikana.

2.3.3 Vanhojen metsien hiilensidonta

Etelä- ja Keski-Suomessa sijaitsevien luonnontilaisten metsien kasvua ja hiilensidontaa arvioitiin vuosien 1991–2019 aikana kerätystä inventointiaineistosta. Tutkitut metsät olivat selvästi keskimääräisiä talousmetsiä vanhempia, noin 150–200-vuotiaita (Akujärvi ym., käsikirjoitus). Metsien kasvu ja hiilensidonta kiihtyivät tutkimusjakson 1991–2019 aikana painottuen pieni- ja keskiläpimittaisiin puihin. Lahopuun määrä kasvoi jyrkästi, koska lahopuuta kertyi nopeammin kuin sitä hajosi. Puuston vuosittainen kuolleisuus oli samaa suuruusluokkaa kasvun lisäyksen kanssa, joten metsien tila säilyi keskimäärin vakana. Tutkimus paljasti vaihtelevia yhteyksiä metsien rakennepiirteiden ja uhanalaisten epifyyttijäkälän monimuotoisuuden välillä. Jäkäläesiintymiä oli sitä enemmän, mitä pienempi puuston biomassa oli. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että jotkut jäkälälajit olivat runsaimpia suhteellisen avoimissa metsiköissä, joiden biomassa on pienempi kuin runsaspuustoissa varjoisissa metsissä. Uhanalaisten jäkälän lajirunsaus ja havaittujen esiintymien määrä lisääntyivät metsikön iän kasvaessa. Lisäksi jäkälän lajirunsaus oli sitä suurempi, mitä enemmän metsässä kasvoi lehtipuita. Tulokset viittaavat siihen, että vanhojen metsien säilyttäminen tukee sekä ilmastomuutoksen hillitsemistä että luonnon monimuotoisuuden ylläpitämistä, koska puuston kasvu jatkuu alemmissa latvuserroksissa ja metsiin kertyy eri lajeille tärkeää lahopuuta.

2.3.4 Kansallisen hiilineutraalius- ja metsien suojelutavoitteiden yhdennetty arviointi

Mallintamalla selvitimme mahdollisuuksia Suomen hiilineutraaliustavoitteen saavuttamiseksi sekä kansallisella että alueellisella tasolla (Forsius ym. 2023). Huomioimme tarkastelussa myös EU:n monimuotoisuusstrategian ja Suomen Luontopaneelin ehdottamia tavoitteita metsien lisäsuojelulle. Kasvihuonekaasujen nettopäästöissä oli suuria alueellisia eroja. Hiilineutraaliustavoitteen saavuttaminen kansallisella tasolla edellyttäisi hakkuiden vähentämistä nykytasosta. Myös olemassa olevien suojelualueiden pinta-ala ja osuus maa-alasta vaihtelevat huomattavasti alueellisesti. Metsien lisäsuojelun

tarve on suurin Etelä-Suomessa, jotta Luontopaneelin tavoite suojella 10 prosenttia metsistä maakunnallisesti saavutettaisiin.

Tulokset osoittivat, että jos metsiä suojeltaisiin kansallisen Luontopaneelin tavoitteen mukaisesti 10 prosenttia maakunnallisesti, saataisiin luontohyötyjen lisäksi merkittäviä ilmastohyötyjä kansallisten ilmastotavoitteiden saavuttamisessa. Tulosten perusteella suojeltujen metsien pitkän aikavälin hiilinielu olisi samaa suuruusluokkaa kuin kansalliset ihmisperäiset kasvihuonekaasupäästöt tehokkaiden päästövähennystoimien jälkeen vuonna 2050. Suomen metsien hiilivarastoja olisi mahdollista kasvat-
taa merkittävästi.

2.4 Miten eri toimijat voivat hyödyntää tuloksia?

- Työpaketti tuotti (yhteistyössä useiden muiden tutkimushankkeiden kanssa) kaikille Manner-Suomen maakunnille tietoa eri maankäyttöluokkien KHK-taseiden nykytilasta sekä eri maakuntien mahdollisuuksista lisätä hiilinieluaan. Maakunnat voivat käyttää tietoa ilmastosuunnitelmien laadinnan tukena.
- Työpaketti tuotti tietoa vanhojen metsien sekä potentiaalisesti suojeltavien, luontoarvoiltaan rikkaimpien alueiden hiilitaseesta. Näitä tietoja voidaan hyödyntää suojelualueiden luonto- ja ilmastohyötyjen yhdenmetyssä arvioinnissa.
- Työpaketti tuotti tietoa mallinnetun hiilitasetiedon epävarmuuden syistä ja vaihtelusta ajallisesti ja alueellisesti. Tämä tieto on hyödyllistä pitkän aikajänteen suunnitelmissa: varovaisuusperiaatteen kannalta olisi pyrittävä siihen, että päätöksenteossa valittu keino toteuttaa tavoitteen suurella todennäköisyydellä (esim. 95 %).
- Maakunnat voivat hyödyntää tuloksia tunnistettaessa päästö- ja nielutavoitteiden kannalta merkittävimpiä maankäyttömuotoja, joiden käyttötapoihin tulisi kiinnittää huomiota.

2.5 Suositukset

2.5.1 Toimintasuositukset

- Metsien käsittelyssä on huomioitava metsien hiilivarastojen ja hiilensidonnan säilyminen riittävänä varovaisuusperiaatteen mukaisesti, huomioiden tiedon ja ennusteiden epävarmuus. Metsät olivat tutkimustuloksissamme ainoa merkittävä hiilen sitoja. Havaitimme esimerkitapauksessa suuria epävarmuuksia metsien KHK-taseessa. Päätöksiä tehtäessä on tärkeää ottaa huomioon epävarmuudet, sillä niiden huomioimatta jättäminen voi johtaa merkittäviin poikkeamiin todellisen KHK-taseen ja päätöksenteon perustana olevan arvion välillä. Kohderyhmät: hallinto, maakunnat, kunnat, maanomistajat.
- Valtion hiilineutraaliustavoitteen saavuttaminen edellyttäisi hakkuiden vähentämistä nykytasosta. Metsien suojelutasoa tulisi nostaa kansallisen Luontopaneelin asettaman tavoitteen mukaisesti 10 prosenttia maakunnallisesti. Vanhoja metsiä tulee säilyttää sekä ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi että luonnon monimuotoisuuden ylläpitämiseksi. Kohderyhmät: hallinto, maakunnat, kunnat, maanomistajat.

- Holmberg, M., Junttila, V., Schulz, T., Minunno, F., Ojanen, P., Mäkelä, A., Peltoniemi, M. & Forsius, M. 2023b. Regional greenhouse gas net emission intensities by land cover category in Finland [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7827577>
- Junttila, V., Minunno, F., Peltoniemi, M., Forsius, M., Akujärvi, A., Ojanen, P. & Mäkelä, A. 2023. Quantification of forest carbon flux and stock uncertainties under climate change and their use in regionally explicit decision making: Case study in Finland. *Ambio* 52: 1716–1733. <https://doi.org/10.1007/s13280-023-01906-4>
- Karvosenoja, N. 2008. Emission scenario model for regional air pollution. Monographs of the Boreal Environmental Research 32. Finnish Environment Institute, Helsinki 2008. <http://hdl.handle.net/10138/39332>
- Lounasheimo J., Karhinen, S., Grönroos, J., Savolainen, H., Forsberg, T., Munther, J., Petäjä, J. & Pesu, J. 2020. Suomen kuntien kasvihuonekaasupäästöjen laskenta: ALas-mallin menetelmäkuvaus ja laskentojen tuloksia 2005–2018. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 25/2020. <http://hdl.handle.net/10138/316216>
- Minunno, F., Peltoniemi, M., Launiainen, S., Aurela, M., Lindroth, A., Lohila, A., Mammarella, I., Minkkinen, K. & Mäkelä, A. 2016. Calibration and validation of a semi-empirical flux ecosystem model for coniferous forests in the Boreal region. *Ecological Modelling*. 341: 37–52. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2016.09.020>
- Minunno, F., Peltoniemi, M., Härkönen, S., Kalliokoski, T., Makinen, H. & Mäkelä, A. 2019. Bayesian calibration of a carbon balance model PREBAS using data from permanent growth experiments and national forest inventory. *Forest Ecology and Management* 440: 208–257. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.02.041>
- Paunu, V.-V., Karvosenoja, N., Segersson, D., López-Aparicio, S., Nielsen, O.-K., Schmidt Plejdrup, M., Thorsteins-son, T., Niemi, J. V., Vo, T. D., van der Gon, H. A. C. D., Brandt, J. & Geels, C. 2021. Spatial distribution of residential wood combustion emissions in the Nordic countries: How well national inventories represent local emissions? *Atmospheric Environment* 264: 118712. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118712>
- Rankinen, K., Junttila, V., Futter, M., Cano Bernal, J. E., Butterfield, D. & Holmberg, M. 2023. Quantification of the effect of environmental changes on the brownification of Lake Kukkia in southern Finland. *Ambio* 52: 1834–1846. <https://doi.org/10.1007/s13280-023-01911-7>
- Saloranta, T.M. & Andersen, T. 2007. MyLake—a multi-year lake simulation model code suitable for uncertainty and sensitivity analysis simulations. *Ecological Modelling* 207: 45–60. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.03.018>
- Valentine H.T. & Mäkelä A. 2005. Bridging process-based and empirical approaches to modeling tree growth. *Tree Physiology* 25:769–779. <https://doi.org/10.1093/treephys/25.7.769>

3 Pintavesien tummuminen – muutostrendit ja mahdollisuudet hillitä tummumista

**Ahti Lepistö, Laura H. Härkönen, Pirkko Kortelainen,
Antti Räike ja Antti Taskinen**

3 Pintavesien tummuminen – muutostrendit ja mahdollisuudet hillitä tummumista

Työpaketissa 2 (TP2) tarkastelimme ensin maankäytön vaikutusta valuma-alueen ja vastaanottavien vesistöjen hiilivirtoihin ja niiden muutoksiin, eli vesien tummumiseen Suomen eri osissa. Toiseksi tuotimme arvion Suomen vesistöjen hiilitaseesta, ja kolmanneksi tarkastelimme mahdollisuuksia vesien tummumisen hillitsemiseksi laajan kansainvälisen kirjallisuuskatsauksen avulla.

3.1 Hiilitrendit ja muutoksiin vaikuttavat tekijät

3.1.1 Tausta ja tavoitteet

Suomen vesistöt ovat viimeisten kahden vuosikymmenen aikana tummuneet laaja-alaisesti aina latva-vestistä Perämeren rannikkovesiin asti (esim. Vuorenmaa ym. 2006; Sarkkola ym. 2009; Fleming-Lehtinen ym. 2014; Räike ym. 2016). Tummumisen aiheuttaa pääasiallisesti turvemailta tuleva humuskuorituksen sisältämä orgaaninen hiili. Tummuminen on yhdistetty moniin eri taustatekijöihin, joista useat linkittyvät happaman laskeuman vähenemiseen ja ilmastomuutokseen. Viimeisten vuosien aikana on kiinnitetty yhä enemmän huomioita maankäytön, erityisesti turvemaiden metsätalouden merkitykseen lisääntyvän humuskuorituksen aiheuttajana (Finér ym. 2021).

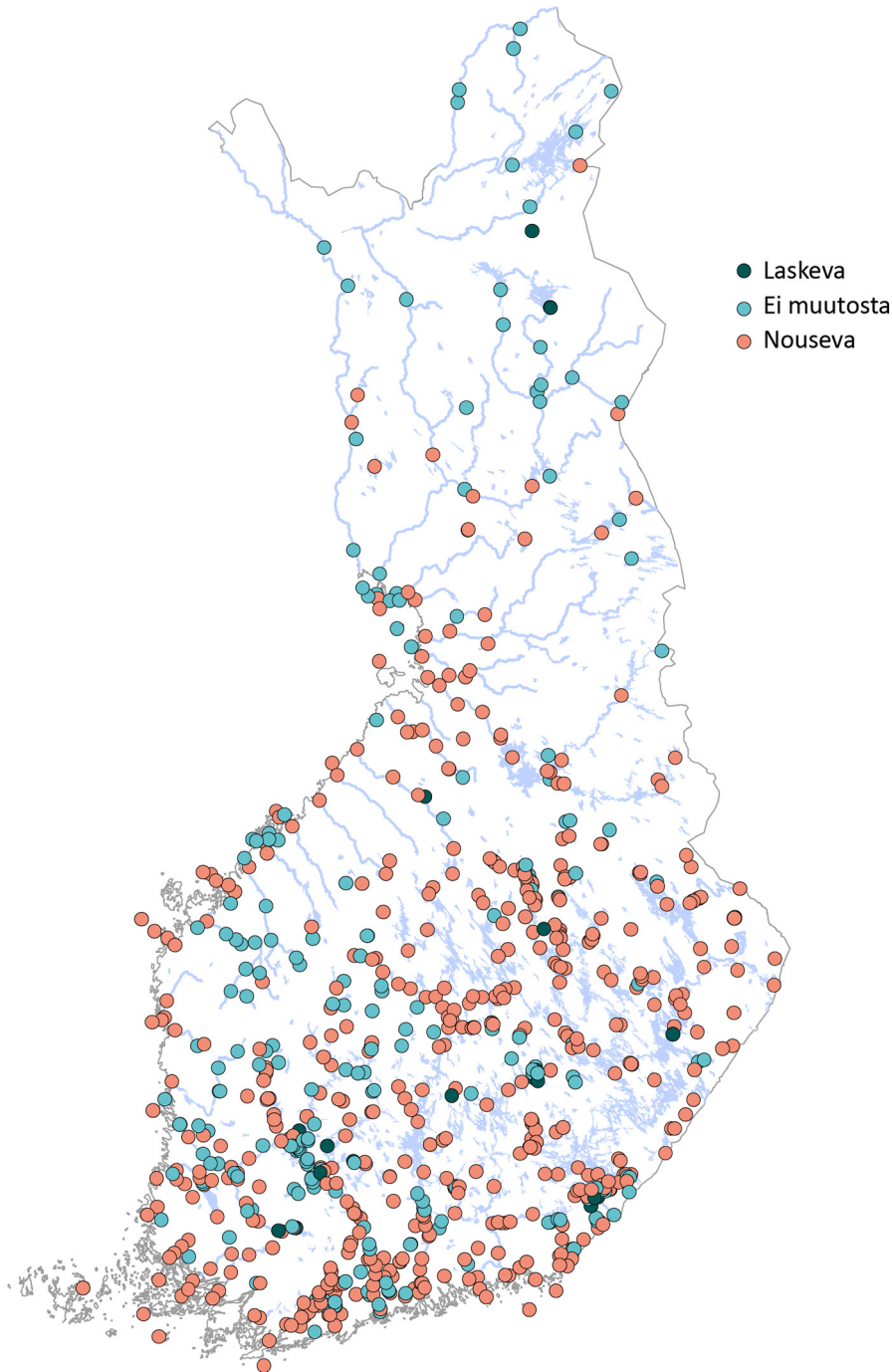
Suomessa on tehty lukuisia tummumiseen liittyviä tutkimuksia. Ne ovat enimmäkseen kohdistuneet joko pieniin valuma-alueisiin tai järviin (esim. Sarkkola ym. 2009; Lepistö ym. 2021), tietyn kuormituslähteen, kuten metsätalouden vaikutuksiin (esim. Finér ym. 2021) tai suurten jokien kuljettamaan hiilivirtaan (esim. Lepistö ym. 2014; Räike ym. 2016). Tässä työssä yhtenä tavoitteenamme oli tarkastella maantieteellisesti mahdollisimman laaja-alaisesti erityyppisten vesistöjen tummumista, käsittäen pienet ja suuret järvet, latvapurot, reittivesistöt, suuret joet sekä rannikkovedet.

3.1.2 Aineisto ja menetelmät

Keräsimme trenditarkasteluun ympäristöhallinnon avoimista tietokannoista mahdollisimman kattavan vesistöjen orgaanisen kokonaishiilen (TOC) aineiston, sekä maantieteellisesti että vesistötyypeittäin. TOC-aineistoa täydennettiin orgaanisen hiilen kanssa voimakkaasti korreloivan kemiallisen hapenkulutuksen (COD) aineistolla. Poimimme tietokannasta kaikki vedenlaadun seurantapaikat, joilta oli aikasarja-analyysin kannalta riittävä määrä (yli 50 kpl) vedenlaatuhavaintoja koko ajanjaksolla 1990–2020. Aineisto käsitti kaikkiaan 746 seuranta-asemaa, joista virtavesikohteita oli eniten (417 kpl). Järvikohteita oli mukana 279 ja rannikkovesien seuranta-asemia 50. TOC tai COD-näytteitä oli yhteensä yli 130 000 kappaletta. Tummumiskehityksen pitkäaikaismuutosten analysoinnin teimme Mann-Kendall-testillä, jonka avulla pystyimme määrittämään monotonisen trendin suuruuden ja sen tilastollisen merkitsevyyden. Lisäksi käytimme tarkastelussa ns. GAM-malleja, joilla pystyimme tarkemmin arvioimaan muutosten vaihtelun ja suunnan pitkällä aikajaksolla. Lisäksi käytimme ns. boruta-analyysijä eri taustatekijöiden vaikutuksen arvioinnissa (Räike ym. 2024).

3.1.3 Tulokset

Vuoden 1990 jälkeen TOC-pitoisuus kasvoi suurimmalla osalla seurantakohteista (67 %, N = 500) ja vain harvoilla kohteilla (3 %, N = 20) havaittiin pitoisuuden laskua. Eniten pitoisuudet kasvoivat järvissä ja rannikkovesissä, melko voimakkaasti myös jokivesissä, mutta yllättävästi vähiten puroissa. Nousevia TOC-pitoisuuksia havaitsimme kaikkialla Suomessa, mutta Lapissa niitä oli selkeästi muuta maata vähemmän (Räike ym. 2022; Räike ym. 2024; Kuva 5). Tummumisen lisääntyminen oli havaittavissa monilla isoilla järvillä, esimerkiksi Saimaa, Pielinen, Päijänne, Näsijärvi ja Oulujärvi. Reittivesistöistä tummuminen näkyi mm. Iisalmen, Saarijärven ja Rautalammin reiteillä.



Kuva 5. Muutokset orgaanisen kokonaishiilen trendeissä Suomen vesistöissä vuosijaksolla 1990–2020 (Räike ym. 2022).

Vesistöjen tummumista esiintyy Suomessa siis laajamittaisesti. Seuraavaksi tarkastelimme pitoisuusai-
kasarjojen ns. epälineaarisia muutoksia GAM-mallinnuksen avulla. Tummuminen on jaksolla 1990–
2020 edennyt puroista ja jokivesistöistä järviin ja edelleen rannikkovesiin. Analyysin perusteella virtaa-
vissa vesissä ja järvissä oli eniten kasvavia trendejä vuoden 2005 tienoilla, rannikkovesissä taas viisi
vuotta myöhemmin. Havaitsimme myös, että kasvavien trendien vähentyessä on päädytty uudelle
aiempaa korkeampien pitoisuuksien tasolle, eivätkä trendit ole kääntyneet laskuun (Räike ym. 2024).

Trendeihin vaikuttavat mm. lämpötilan ja valun nousu, ojitusten vaikutus ja metsien osuus va-
luma-alueilla. Lisäksi havaitsimme, että turvemaiden, erityisesti korprien osuus vaikuttaa trendeihin.
Sulfaattilaskeuman vähenemisellä on vaikutusta TOC-pitoisuuksien nousuun, mutta vaikutus on vähe-
nemässä samaan aikaan, kun ilmastomuutoksen vaikutus on voimistumassa (deWit ym. 2021; Räike
ym. 2024), Lämpenevä ilmasto, syys- ja talviaikaisten vesisateiden ja tulvien lisääntyminen ja roudan
väheneminen ovat tekijöitä, jotka tulevat pitämään humuskuormituksen tulevaisuudessakin korkealla
tasolla.

Tummumisen voimakas väheneminen ei vaikuta todennäköiseltä ilman voimakkaita, globaaleja il-
mastomuutoksen torjuntaan tähtääviä toimenpiteitä. Kansallisella tasolla tarvitaan paikallisia, erityi-
sesti turvemaiden metsätalouden toimintatapoihin liittyviä muutoksia ja vesiensuojelutoimenpiteiden
tehostamista (Härkönen ym. 2022; 2023).

3.2 Vesistöjen hiilitaseet

3.2.1 Tausta ja tavoitteet

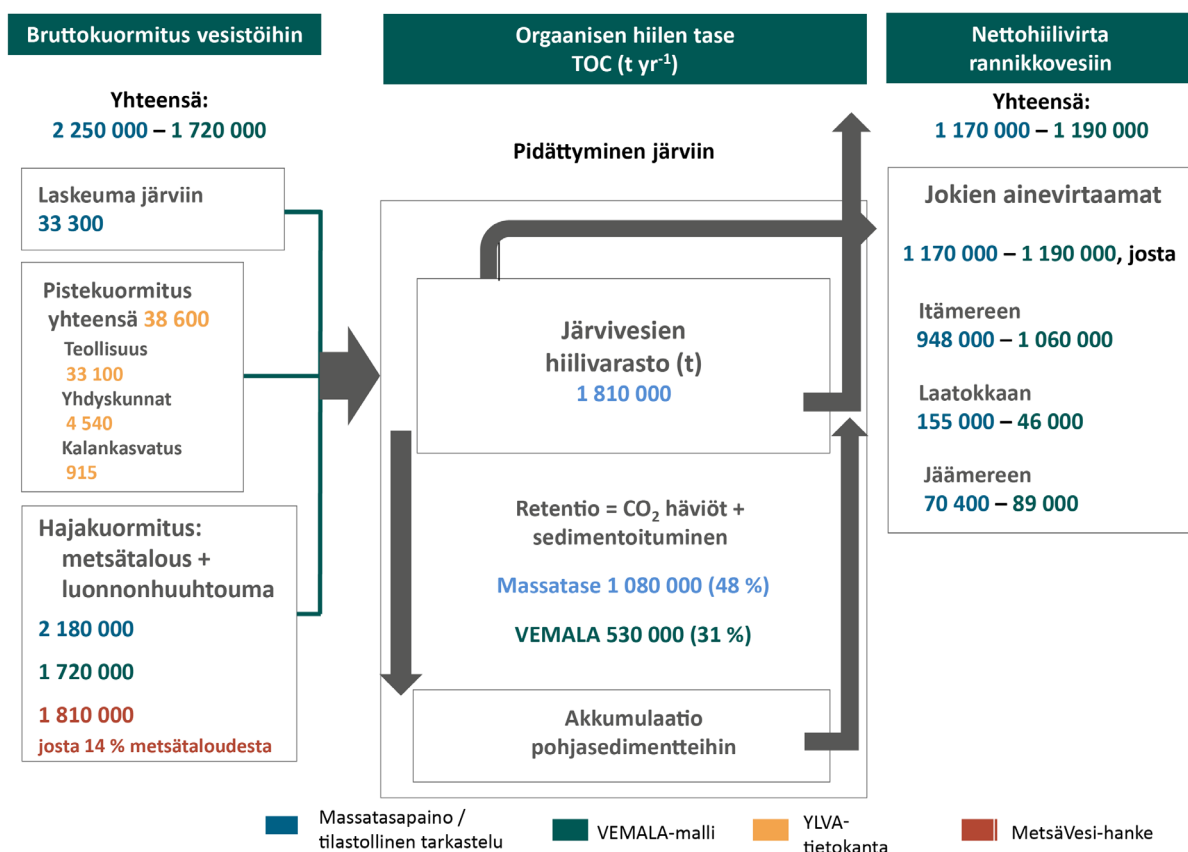
Vesistöjen valtakunnallisten hiilitaseiden avulla saadaan kokonaiskuva hiilen tärkeimmistä lähteistä ja
varastoista, eri tekijöiden vuorovaikutuksista, häviöistä ilmakehään tai vesistöjen pohjille (retentio)
sekä hiilivirroista maa-alueilta rannikkovesiin.

3.2.2 Aineisto ja menetelmät

Tutkimme hiilivirtoja vesistöissä hyödyntäen uusimpia paikkatietoaineistoja valuma-alue-
tekijöistä, pit-
kiä aikasarjoja hydrometeorologisista ja vedenlaadun muuttujista, mallinnusta ja massataselaskentaa,
sekä empiiristä tietoa hiilen pidätyksestä ja kasvihuonekaasupäästöistä sisävesissä. Vertasimme
massataselaskennalla saatuja arvioita Vemala-TOC -mallin arvioihin (vrt. Huttunen ym. 2016).

3.2.3 Tulokset

Suomen sisävesiin huuhtoutuu maa-alueilta vuosittain noin 2 250 000 tonnia hiiltä (Kuva 6). Tärkeim-
mät lähteet ovat luonnonhuuhtouma, metsätalous sekä maatalous. Hiiltä päätyy vesiin pienempiä
määriä myös pistekuormituksena, teollisuudesta ja jätevedenpuhdistamoilta. Massataseen perusteella
hiiltä pidättyy arviolta 1 080 000 t/vuosi: osa sedimentoituu vesistöihin, osa taas vapautuu hiilidioksi-
dina ja metaanina ilmakehään (pidättyminen yhteensä noin 48 %). Joet kuljettavat loput noin 52 % hii-
livirroista merialueille.



Kuva 6. Lohkokaavio arvioituista vesistöjen hiilivirroista Suomessa (tonnia/vuosi), ja arvio järvivesien hiilivarastoista (tonnia). Tärkeimmät orgaanisen hiilen lähteet, pidättyminen (retentio; sisältäen sekä hiilidioksidin ja metaanin vapautumisen ilmakehään että orgaanisen hiilen sedimentoitumisen) ja hiilivirrat valuma-alueilta rannikkovesiin. Järvivesien hiilivarasto (t) on arvioitu orgaanisen hiilen pitoisuuden ja järvien tilavuuden avulla. Massataseen avulla laskettu retentio käsittää sekä järvi- että virtavesien prosesseja, VEMALA TOC -mallin arvio koskee ainoastaan järviä.

Vemala-TOC -arvioiden (vrt. luku 4.3., Huttunen ym. 2016) mukaan bruttokuormitus vesistöihin on noin 1 720 000 tonnia hiiltä vuosittain, josta pidättyy retentiona noin 31 % (530 000 t/vuosi). On huomattava, että Vemala-TOC -malli ei nykyisellään sisällä hiilen pistekuormitusta ja laskeumaa. Loput hiilestä, noin 69 % (1 190 000 t/vuosi), päätyy merialueille. Näitä arvioita ja eri menetelmien välisiä eroja tarkastelemme jatkotyössä. Jo nyt kuitenkin voidaan todeta, että massataselaskennalla ja Vemalalla saadaan samansuuntaisia arvioita. Samoin nähdään, että merkittäviä määriä (30–50 %) hiilivirroista pidättyy matkalla valuma-alueiden latvoilta rannikkovesiin, suurimman osan vapautuessa ilmakehään ns. kasvihuonekaasuina (vrt. Kortelainen ym. 2013).

3.3 Mahdolliset keinot suometsien hoidossa tummumisen hillitsemiseksi

3.3.1 Tausta ja tavoitteet

Tummumisella on vesistöissä useita vaikutuksia, joista monet ovat haitallisia ja vaikuttavat paitsi ekologiaan, myös raakaveden ottoon ja virkistyskäyttöön. Tummumisen taustalla on ilmastotekijöiden lisäksi myös maankäyttö, varsinkin soiden kuivattaminen metsätaloutta varten. Turvemaiden metsätalouden seurauksena orgaanisen hiilen kuormitus valuma-alueilta vesiin on selvästi lisääntynyt (Finér ym. 2021). Toteutimme kansainvälisen kirjallisuuskatsauksen, sillä maailmalta löytyy runsaasti tietoa, joka on osin hyödynnettävissä Suomen olosuhteissa.

3.3.2 Aineisto ja menetelmät

Kirjallisuuskatsausta varten teimme Web of Science-, Google Scholar- ja BASE-tietokantoihin kirjallisuushaku, jonka tuloksena tuotimme yhteenvedon haussa löydetystä 226 vertaisarvioidusta artikkelista (Härkönen ym. 2022; 2023).

3.3.3 Tulokset

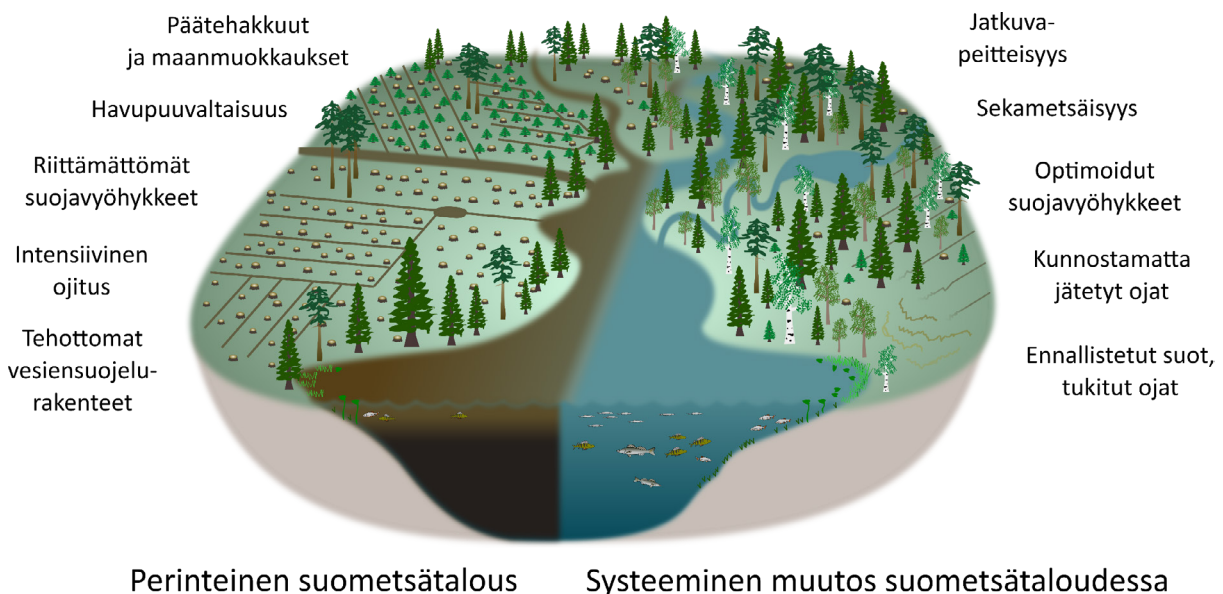
Lisääntyneen **puustobiomassan merkitys** yhtenä tummumiseen vaikuttavana tekijänä on viime aikoina saanut vahvistusta (mm. Kritzberg ym. 2020). Puuston määrä on Suomessa kasvanut erityisesti ojiteuilla soilla. Vaikka tietoa onkin karttunut metsätalouden vaikutuksista lisääntyneeseen kuormitukseen, kuormituksen syntymekanismit prosessitasolla tunnetaan kuitenkin vielä heikosti. Tummumisella on vesistöissä useita vaikutuksia, joista monet ovat haitallisia ja vaikuttavat paitsi ekologiaan, myös raakaveden ottoon ja virkistyskäyttöön (Forsius ym. 2017; Kritzberg ym. 2020).

Jaksollinen metsänkasvatus edistää orgaanisen hiilen huuhtoutumista ja kulkeutumista. Suomessa metsätalous turvemailla perustuu pääasiassa ns. jaksolliseen metsänkasvatukseen, johon sisältyy sekä voimakkaita hakkuita ja maanmuokkaustoimenpiteitä, että ojen kunnostusta (Kuva 7). Turvemaiden hakkuut lisäävät orgaanisen hiilen kuormitusta aiheuttamalla vaihtelua pohjaveden pinnantasoon, nostamalla maaperän lämpötilaa, sekä lisäämällä valuntaa puuston haihdunnan heikentyessä. Myös uudistushakkuiden jälkeen tehtävät voimakkaat maanmuokkaukset sekä hakkuutähteet voimistavat orgaanisen hiilen huuhtoutumista (Schelker ym. 2012).

Vaikka useissa tutkimuksissa itse ojitustapahtumalla on raportoitu olevan vähäisiä negatiivisia, tai jopa positiivisia vaikutuksia hiilen huuhtoutumiseen (Joensuu ym. 1999), voi ojitus pitkällä aikajaksolla lisätä hiilen huuhtoutumista, kun pohjaveden pinta laskee ja turpeen hajoaminen siten lisääntyy (Rantakari ym. 2010). Lisäksi ojitus lisää merkittävästi valuma-alueen ja vesistöjen välistä hydrologista kytkeytyneisyyttä nopeuttaen veden kulkeutumista valuma-alueelta vesistöön, mikä johtaa kohonneisiin orgaanisen hiilen pitoisuuksiin alapuolisissa vesissä (Härkönen ym. 2022; 2023).

Nykyisillä ojitusten vesiensuojelurakenteilla ei pidätetä orgaanista hiiltä. Ojituksissa yleisimmin hyödynnetyt laskeutusaltaat voivat pidättää keskikarkeita ja karkeita epäorgaanisia maalajitteita, mutta orgaanista hiiltä ne eivät pidätä (Joensuu ym. 1999). Myöskään putkipadot, jotka muutoin huomattavasti parantavat altainen pidätyskykyä, eivät vaikuta etenkään liunneen orgaanisen hiilen pidättymiseen (Marttila & Kløve 2010). Kosteikkojen vaikutusta hiilen pidättymiseen ei toistaiseksi ole

metsätalousmailla tutkittu, mutta turvetuotannossa kosteikkomaisten rakenteiden vaikutus orgaanisen hiilen pidättämiseen on useimmiten heikko (Heikkinen ym. 2018). Riittävän kokoisia pintavalutus-kenttiä pidetään kiintoaineen ja ravinteiden osalta tehokkaimpina vesiensuojeluratkaisuin, mutta orgaanisen hiilen kuormitusta ne eivät vähennä vaan saattavat sitä jopa lisätä (Nieminen ym. 2017). Koska mitkään käytössä olevat ratkaisut eivät pysty pidättämään orgaanisen hiilen kuormitusta, olisi sen vähentämiseksi jatkossa keskityttävä ensisijaisesti hiilikuormituksen syntymistä ennalta ehkäiseviin metsänkäsittelymenetelmiin (Härkönen ym. 2022; 2023).



Kuva 7. Turvemaiden metsätalouden aiheuttamaa orgaanisen hiilen kuormitusta voitaisiin hillitä systeemisellä toimintatapojen muutoksella (Härkönen ym. 2022, 2023).

Turvemaiden metsien käsittelytapa on muutettava. Ensisijaisesti tulisi keskittyä turpeen hajoamisen hillintään ja hidastamiseen. Keinoja siihen voisivat tarjota jatkuvapeitteinen metsänkasvatus sekä tarpeettomien kunnostusojitusten ja liian syvien ojien välttäminen (Kuva 7). Jatkuvapeitteisellä metsänkasvatuksella pyritään pitämään puusto eri-ikäisrakenteisena, joka voi vähentää sekä kunnostusojitustarvetta (Nieminen ym. 2018) että pohjavedenpinnan vaihtelusta johtuvaa turpeen hajoamista ja vastaavasti vesistökuormitusta (Palviainen ym. 2022). Turvemetsien käsittelyssä on huomioitava optimoidut, riittävän leveät suojavyöhykkeet, jotka ovat tärkeitä myös monimuotoisuuden kannalta (Kritzborg ym. 2020; Mykrä ym. 2023). Lisäksi sekametsien suosiminen saattaa vähentää orgaanisen hiilen huuhtoutumista (Kritzborg ym. 2020). Erityisen tärkeää olisi pyrkiä lisäämään valuma-alueen vedenpidätyskykyä ja lisätä veden viipymää valuma-alueella, jotta orgaaninen aines voisi hajota tai pidäytyä ennen kuin vedet päätyvät alapuolisiin vesiin. Keinoja tähän ovat mm. soiden ennallistamisen lisääminen varsinkin puuntuotannollisesti heikotuohtoisilla soilla sekä vedenpinnan nostaminen ojitusalueilla ojasyvyyttä pienentämällä ja ojaverkostoja patoamalla. Lisäksi tarvitaan uomaverkostojen ennallistamista sekä vesiensuojelun ja valuma-alueen suunnittelun parantamista (Härkönen ym. 2022; 2023). Vaikka soiden ennallistaminen varsinkin rehevillä kasvupaikoilla saattaa aluksi lisätä sekä ravinteiden että orgaanisen hiilen kuormitusta, vaikutukset usein vähenevät vuosikymmenen kuluessa. Joidenkin tutkimusten mukaan soiden ennallistaminen saattaisi olla yksi harvoista keinoista pysäyttää kuormitus pitkällä aikavälillä (Juutinen ym. 2020).

Tummumisen hillintä huomioitava metsänhoidon suosituksissa. Yksityismaiden käytännön metsänhoitotoimenpiteitä vahvasti ohjaavat ”Metsänhoidon suositukset” päivitettiin vesiensuojelun osalta

Tapio Oy:n koordinoimana vuoden 2023 aikana. Samalla suosituksiin nostettiin entistä näkyvämmiin esille turvemaiden metsätalouden vaikutus orgaanisen hiilen kuormitukseen Härkösen ym. (2023) artikkeliin perustuen. Samalla tuotiin esille jatkuvapeitteisen metsänkasvatuksen vesiensuojeluhuötyjä ja kuormituksen ennaltaehkäisyn merkitystä, ja toisaalta huomioitiin vesiensuojelurakenteiden rajoitteita humuskuormituksen pidättämisessä. Jatkossa myös valuma-alueen vedenpidätyskyvyn parantamisen, eli soiden ennallistamisen ja ojien patoamisen merkitystä tulisi korostaa suosituksissa. Keinot orgaanisen hiilen kuormituksen vähentämiseksi tulee jatkossakin sisällyttää säännöllisesti päivitettäviin, tarkentuvaan tutkimustietoon perustuviin metsänhoidon suosituksiin. Lisää tutkimusta kaivattaisiin kipeästi myös kuormituksen syntymekanismeista muuttuvassa ilmastossa. Vihreä siirtymä yhdessä metsäpohjaisen biotalouden kasvun kanssa korostavat tarvetta tehostaa metsätalouden vesiensuojelua ja vähentää metsäteollisuuden haitallisia vesistövaikutuksia.



Kuva: Laura Härkönen

3.4 Johtopäätökset

Tuotimme työpaketissa uutta tietoa maa-alueilta vesistöihin huuhtoutuvan hiilen määrästä ja muutok-
sista sekä vesistöjen hiilivirroista Suomessa, ja ehdotuksia ratkaisuisista, joilla voidaan hillitä maankäy-
tön ilmastovaikutuksia ja vesien tummumista. Tarkastelimme kattavaa aineistoa (lähes 750

mittausasemaa) hiilipitoisuuksien kasvusta jaksolla 1990–2020 sekä maantieteellisesti että vesistötyypeittäin. Orgaanisen hiilen kokonaispitoisuus kasvoi lähes 70 prosentilla kohteista, kaikkialla muualla Suomessa paitsi Lapissa. Kasvaviin trendeihin vaikuttavina tekijöinä analyysissä nousivat esiin mm. lämpötilan ja valunnon nousu, ojitusten osuus sekä metsien ja turvemaiden osuus valuma-alueilla. Lisäksi laadimme kokonaisarvion vesistöjen hiilivirroista Suomessa: vesistöillä on iso rooli orgaanisen hiilen siirtämisessä ilmakehään lähinnä hiilidioksidina. Arviomme mukaan hiilen häviöt vesistöissä ovat 30–50 % kokonaiskuormituksesta.

Viime aikoina on saatu entistä enemmän uutta tutkimustietoa siitä, että turvemaiden liian voimakas metsätalous on merkittävä tekijä tummumisilmiön taustalla, yhdessä ilmastotekijöiden kanssa. Metsätalouden seurauksena orgaanisen hiilen kuormitus metsätalousvaltaisilta valuma-alueilta on kasvanut ja kasvaa edelleen. Turvemaiden metsätalouden toimintatapoja tulee arvioida uudelleen ja muuttaa niitä entistä kestävämmiksi. Metsien hoidossa turvemaidella on tarvetta systeemisellemuutokselle. Tavoitteena tulisi olla kuormituksen pysäyttäminen jo valuma-alueiden latva-alueilla, siis ennen alapuolisia vesistöjä, missä erityisesti liukoiseen hiilikuormitukseen ei enää pystytä vaikuttamaan.

3.5 Miten eri toimijat voivat hyödyntää tuloksia?

- Sekä maantieteellisesti että vesistötyypeittäin kattavaa aineistoa vesistöjen tummumisesta Suomessa jaksolla 1990–2020 voidaan hyödyntää alueellisessa vesienhoitotyössä sekä maa- ja metsätalouden toimijoiden neuvontatyössä.
- Tuloksia voidaan hyödyntää valuma-alueelähtöisissä vesien kunnostushankkeissa, kun tavoitteena on hillitä orgaanisen hiilen kuormituksen syntymistä ja vesien tummumista.
- Tutkijat voivat jatkossa hyödyntää vastaavissa tarkasteluissa soveltamiamme uusia menetelmiä vesiekosysteemien hiilitrendien tarkasteluun (mm. GAM epälineaariset mallit).
- Alan toimijat, mukaan lukien opetustoimi, voivat hyödyntää uutta laajaa tietopakettia, eli kansainvälistä kirjallisuuskatsausta turvemaiden hoidosta ja kuormituksen hillinnän mahdollisuuksista Suomea vastaavissa olosuhteissa.

3.6 Suositukset

3.6.1 Toimintasuositukset

- Vesien tummuminen on laajamittainen ja hankalasti hallittava ongelma, joka tulisi ottaa paremmin huomioon myös vesien ekologisen tilan arvioinnissa.
- Työpaketti tuotti uutta tietoa pintavesien merkittävästä roolista siirtää hiiltä ilmakehään lähinnä hiilidioksidina. Tämä tulisi ottaa huomioon jatkossa tehtävissä kansallisissa hiilitasetarkasteluissa ja etsittäessä keinoja Suomen KHK-päästöjen vähentämiseksi.
- Suometsien hoidossa on tarvetta systeemisellemuutokselle. Mitkään käytössä olevat metsätalouden vesiensuojelurakenteet eivät pysty pidättämään liukoista orgaanista hiiltä. Sen vuoksi tavoitteena tulee olla ennaltaehkäistä kuormituksen syntymistä jo valuma-alueiden latvoilla, ennen kuormituksen päätyä alapuolisiin vesistöihin ja edelleen rannikkovesiin asti.

Kirjallisuusselvityksen perusteella suosittelemme, että metsätalouden kestävyys edistämiseksi erityisesti turvemaiden otetaan käyttöön:

- ojitusten tarveharkinta ja matalammat ojitussyvytykset
- siirtyminen jatkuvapeitteiseen metsänkasvatukseen mahdollisimman laajamittaisesti
- riittävät ja optimoidut suoja- ja ohjaukset vesistöjen varsilla
- puuston monipuolisuuden lisääminen ja sekametsien suosiminen
- valuma-alueiden vedenpidätyskyvyn parantaminen ojitettuja soita ennallistamalla ja ojaverkostoja patoamalla

Kohderyhmät: Hallinto, neuvontajärjestöt, alan opetus, tutkijat, suunnitteluorganisaatiot, maanomistajat

3.6.2 Tutkimussuosituksia

- Jatkotutkimuksissa tulisi kehittää prosessipohjaista Vemala TOC -mallia integroiduksi työkaluksi. Uudella integroidulla mallilla voitaisiin arvioida sekä kokonaisuutta Suomessa että yksittäisten toimenpiteiden vaikutusta kuormitukseen valituilta turvemaiden valuma-alueilta, sekä mallintaa kuormituksen muutoksia tulevaisuudessa.
- Hiilivirtojen muutoksia tulisi tutkia ja mallintaa entistä tarkempien arvioiden saamiseksi. Erityisesti tulisi selvittää:
 - kuinka paljon hiiltä vapautuu vesistöistä ilmakehään, kuinka paljon sitä sedimentoituu ja kuinka paljon päätyy rannikkovesiin asti?
 - mitkä ovat hiilikuormituksen ekologiset ja yhteiskunnalliset (juomavesi, kalat, kalastus, virkistyskäyttö) vaikutukset vesistöissä ja minkälaisia kytkeitä tummumiskehityksellä on rehevöitymiskehitykseen?
 - mikä on ihmistoimintojen vaikutus vesistöjen KHK-taseissa?
- Turvemaiden metsätalouden vaikutuksia monimuotoisuuteen, hiili- ja ravinnetaseisiin sekä ekosysteemipalveluihin tulisi tutkia kokonaisvaltaisesti vesistö- ja valuma-alueilla.

3.7 Lähteet

- de Wit, H. A., Stoddard, J. L., Monteith, D. T., Sample, J. E., Austnes, K., Couture, S., Fölster, J., Higgins, S. N., Houle, D., Hruška, J., Krám, P., Kopáček, J., Paterson, A. M., Valinia, S., Van Dam, H., Vuorenmaa, J. & Evans, C. D. 2021. Cleaner air reveals growing influence of climate on dissolved organic carbon trends in northern headwaters. *Environmental Research Letters* 16: 104009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac2526>
- Finér, L., Lepistö, A., Karlsson, K., Räike, A., Härkönen, L., Huttunen, M., Joensuu, S., Kortelainen, P., Mattsson, T., Piirainen, S., Sallantausta, T., Sarkkola, S., Tattari, S. & Ukonmaanaho, L. 2021. Drainage for forestry increases N, P and TOC export to boreal surface waters. *Science of the Total Environment*: 762. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144098>
- Fleming-Lehtinen, V., Räike, A., Kortelainen, P., Kauppila, P. & Thomas, D. N. 2014. Organic Carbon Concentration in the Northern Coastal Baltic Sea between 1975 and 2011. *Estuaries and Coasts* 38(2): 466–481. <https://doi.org/10.1007/s12237-014-9829-y>

- Forsius, M., Räike, A., Huttunen, I., Poutanen, H., Mattsson, T., Kankaanpää, S., Kortelainen, P. & Vuorilehto, V.-P. 2017. Observed and predicted future changes of total organic carbon in the lake Päijänne catchment (southern Finland): Implications for water treatment of the Helsinki metropolitan area. *Boreal Environmental Research* 22: 317–336. <https://www.borenv.net/BER/archive/pdfs/ber22/ber22-317-336.pdf>
- Heikkinen, K., Karppinen, A., Karjalainen, S.M., Postila, H., Hadzik, M., Tolkkinen, M., Marttila, H., Ihme, R. & Kløve, B., 2018. Long-term purification efficiency and factors affecting performance in peatland-based treatment wetlands: An analysis of 28 peat extraction sites in Finland. *Ecological Engineering* 117: 153–164. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.04.006>
- Huttunen, I., Huttunen, M., Piirainen, V., Korppoo, M., Lepistö, A., Räike, A., Tattari, S. & Vehviläinen, B. 2016. A national-scale nutrient loading model for Finnish watersheds – VEMALA. *Environmental Modeling and Assessment* 21(1): 83–109. <http://link.springer.com/article/10.1007/s10666-015-9470-6>
- Härkönen, L. H., Lepistö, A., Sarkkola, S., Kortelainen, P. & Räike, A. 2022. Vesistöjen tummumisen hillintä edellyttää systeemistä muutosta turvemaiden metsätalouden toimintatavoissa. *Vesitalous* 5/2022.
- Härkönen, L. H., Lepistö, A., Sarkkola, S., Kortelainen, P. & Räike, A. 2023. Reviewing peatland forestry: Implications and mitigation measures for freshwater ecosystem browning. *Forest Ecology and Management* 531: 120776. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.120776>
- Joensuu, S., Ahti, E. & Vuollekoski, M. 1999. The effects of peatland ditch maintenance of suspended solids in runoff. *Boreal Environment Research* 4: 343–355. <https://www.borenv.net/BER/archive/pdfs/ber4/ber4-343-355.pdf>
- Juutinen, A., Tolvanen, A., Saarimaa, M., Ojanen, P., Sarkkola, S., Ahtikoski, A., Haikarainen, S., Karhu, J., Haara, A., Nieminen, M., Penttilä, T., Nousiainen, H., Hotanen, J.-P., Minkkinen, K., Kurttila, M., Heikkinen, K., Sallantausta, T., Aapala, K. & Tuominen, S. 2020. Cost-effective land-use options of drained peatlands – integrated biophysical-economic modeling approach. *Ecological Economics* 175: 106704. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106704>
- Kortelainen, P., Rantakari, M., Pajunen, H., Huttunen, J. T., Mattsson, T., Alm, J., Juutinen, S., Larmola, T., Silvola, J. & Martikainen, P. J. 2013. Carbon evasion/accumulation ratio in boreal lakes is linked to nitrogen. *Global Biogeochemical Cycles* 27: 363–374. <https://doi.org/10.1002/gbc.20036>
- Kritzberg, E. S., Hasselquist, E. M., Škerlep, M., Löfgren, S., Olsson, O., Stadmark, J., Valinia, S., Hansson, L. A. & Laudon, J. 2020. Browning of freshwaters: Consequences to ecosystem services, underlying drivers, and potential mitigation measures. *Ambio* 49: 375–390. <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01227-5>
- Lepistö, A., Futter, M. & Kortelainen, P. 2014. Almost 50 years of monitoring shows that climate, not forestry, controls long-term organic carbon fluxes in a large boreal watershed. *Global Change Biology* 20: 1225–1237. <https://doi.org/10.1111/gcb.12491>
- Lepistö, A., Räike, A., Sallantausta, T. & Finér, L. 2021. Increases in organic carbon and nitrogen concentrations in boreal forested catchments — Changes driven by climate and deposition. *Science of The Total Environment* 780: 146627. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146627>
- Marttila, H. & Kløve, B. 2010. Managing runoff, water quality and erosion in peatland forestry by peak runoff control. *Ecological Engineering* 36: 900–911. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.04.002>
- Mykrä, H., Annala, M., Hilli, A., Hotanen, J.-P., Hokajärvi, R., Jokikokko, P., Karttunen, K., Kesälä, M., Kuoppala, M., Leinonen, A., Marttila, H., Meriö, L.-J., Piirainen, S., Porvari, P., Salmivaara, A. & Vaso, A. 2023. GIS-based planning of buffer zones for protection of boreal streams and their riparian forests. *Forest Ecology and Management* 528: 120639. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120639>
- Nieminen, M., Sarkkola, S. & Laurén, A. 2017. Impacts of forest harvesting on nutrient, sediment and dissolved organic carbon exports from drained peatlands: A literature review, synthesis and suggestions for the future. *Forest Ecology and Management* 392: 13–20. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.02.046>
- Nieminen, M., Hökkä, H., Laiho, R., Juutinen, A., Ahtikoski, A., Pearson, M., Kojola, S., Sarkkola, S., Launiainen, S., Valkonen, S., Penttilä, T., Lohila, A., Saarinen, M., Haahti, K., Mäkipää, R., Miettinen, J. & Ollikainen, M. 2018. Could continuous cover forestry be an economically and environmentally feasible management option on drained boreal peatlands? *Forest Ecology and Management* 424: 78–84. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.04.046>

- Palviainen, M., Peltomaa, E., Laurén, A., Kinnunen, N., Ojala, A., Berninger, F., Zhu, X. & Pumpanen, J. 2022. Water quality and the biodegradability of dissolved organic carbon in drained boreal peatland under different forest harvesting intensities. *Science of the Total Environment* 150919. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150919>
- Rantakari, M., Mattsson, T., Kortelainen, P., Piirainen, S., Finér, L. & Ahtiainen, M. 2010. Organic and inorganic carbon concentrations and fluxes from managed and unmanaged boreal first-order catchments. *Science of the Total Environment* 408: 1649–1658. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.12.025>
- Räike, A., Kortelainen, P., Mattsson, T. & Thomas, D. N. 2016. Long-term trends (1975–2014) in the concentrations and export of carbon from Finnish rivers to the Baltic Sea: organic and inorganic components compared. *Aquatic Sciences* 78(3): 505–523. <https://doi.org/10.1007/s00027-015-0451-2>
- Räike, A., Lepistö, H., Härkönen, L. H., Taskinen, A. & Kortelainen, P. 2022. Eteneekö Suomen vesistöjen tummuus? *Vesitalous* 5/2022.
- Räike A, Taskinen A, Härkönen L, Kortelainen P & Lepistö A. 2024. Browning from headwaters to coastal areas in the boreal region: Trends and drivers. (manuscript to be submitted to *Science of the Total Environment*).
- Sarkkola, S., Koivusalo, H., Laurén, A., Kortelainen, P., Mattsson, T., Palviainen, M., Piirainen, S., Starr, M. & Finér, L. 2009. Trends in hydrometeorological conditions and stream water organic carbon in boreal forested catchments. *Science of the Total Environment* 408(1): 92–101. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.09.008>
- Schelker, J., Eklöf, K., Bishop, K. & Laudon, H., 2012. Effects of forestry operations on dissolved organic carbon concentrations and export in boreal first-order streams. *Journal of Geophysical Research*, 117: G01011. <https://doi.org/10.1029/2011JG001827>
- Vuorenmaa, J., Forsius, M. & Mannio, J. 2006. Increasing trends of total organic carbon concentrations in small forest lakes in Finland from 1987 to 2003. *Science of the Total Environment* 365: 47–65. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.02.038>

4 Vemala TOC sekä maankäyttö- ja ilmastoskenaarioiden vaikutukset orgaanisen hiilen kuormitukseen

**Inese Huttunen, Marie Korppoo, Markus Huttunen,
Nasim Fazel ja Maiju Narikka**

4 Vemala TOC sekä maankäyttö- ja ilmastoskenaarioiden vaikutukset orgaanisen hiilen kuormitukseen

Integroimme työpaketissa 3 (TP3) työpaketin 1 ja 2 tuottamia prosessi- ja skenaariotietoja Suomen ympäristökeskuksen kansalliseen Vemala valuma-alue mallisysteemiin. Vemala-malli yhdistää valuma-alue- ja vesistöprosesseja. Työpaketissa kehitimme maa- ja vesiekosysteemien hiiliprosessien laskentaa. Sen jälkeen arvioimme Vemala-mallilla ilmastomuutos- ja maankäyttöskenaarioiden vaikutuksia pilottivaluma-alueiden hiilikuormitukseen ja hiilen kulkeutumiseen sekä hiilipäästöihin.

4.1 Tausta ja tavoitteet

Tavoitteenamme oli kehittää ja soveltaa WSFS-Vemala-kuormitusmallia (Vemala) orgaanisen hiilen kokonaiskuormituksen (TOC) simulointiin sekä vallitsevissa olosuhteissa että erilaisissa ilmasto- ja maankäyttöskenaarioissa. Lisäksi kehitimme biogeokemiallista osamallia simuloimaan järvien hiilikiertoa ja hiilidioksidipäästöjä (CO₂). Vemala-malli on kansallinen ravinnekuormitustyökalu, jonka tuloksia ELY-keskukset käyttävät vesipolitiikan puitedirektiivin toimeenpanoon. Sitä hyödynnetään myös kansainvälisessä kuormitusraportoinnissa (esim. HELCOM). Vemala-malli simuloi kokonaistypen ja -fosforin kuormitusta niiden osayhdisteineen, sekä kiintoaineen ja kokonaishiilen kuormitusta kaikilla Suomen vesistöalueilla.

Hankkeessa kehitettiin Vemalan uusi versio (Vemala TOC SysteemiHiili), joka perustuu hydrologiseen malliin ja paranneltuun kuvaukseen maaperän ja järvien hiiliprosesseista. Täten se soveltuu ilmastomuutoksen ja maankäytön muutoksiin liittyvien skenaarioiden simulointiin.

4.2 Aineisto ja menetelmät

4.2.1 Uusi hydrologinen malli

Uuteen Vemala-versioon on sisällytetty Syken vesistömallijärjestelmässä (WSFS:ssä -Watershed simulation and forecasting system) esitetty fysikaalinen hydrologinen malli (Jakkila ym. 2014). Tämän ansiosta simuloinnissa on mahdollista huomioida maaperätyyppikohtaiset erot hydrologisissa prosesseissa: esimerkiksi vedenjohtavuus ja vedenpidätyskyky ovat erilaisia orgaanisessa ja kivennäismaassa. Mallissa käytetään Suomen maaperäkarttoihin (Suomen maannostietokanta) perustuvia maalajiluokituksia. Luokkia on kaikkiaan kuusi - orgaaninen, savi-, moreeni-, hiesu-, hiekka- ja kivimaa – ja niitä on käytetty mallin syötteenä jokaisen uoman valuma-alueelle. CORINE-maanpeitetietoja käytettiin luokittelemaan kukin uoma maankäyttöluokkiin, joita olivat pelto, metsä-, suo- ja rakennetut alueet. Tämä luokitus on välttämätön myös kokonaishaihdunnan simuloinnin tarkentamiseksi.

Turvemailla pohjaveden pinta on yleensä korkeammalla kuin kivennäismailla, ja matalammista maa-kerroksista peräisin oleva pohjaveden veden virtaus on yleensä suurempaa. Lisäksi hiilipitoisuus

vaihtelee kivennäis- ja turvemaiden välillä. Kivennäismaassa orgaanista hiiltä löytyy pääasiassa muokkauskerroksesta, ja hiilipitoisuus pienenee eksponentiaalisesti syvyyden kasvaessa. Turvemaiden hiilipitoisuus voi olla neljästä viiteen kertaa suurempi kuin kivennäismailla ja Vemalalla mallinnettu valunta jakautuu tasaisesti syvyysuunnassa koko turvekerroksen syvyydeltä. Nämä erot hydrologisissa olosuhteissa ja hiilipitoisuuksissa kivennäis- ja turvemaiden välillä johtavat siihen, että orgaanisen kokonaishiilen huuhtouma maaperätyyppien välillä poikkeaa toisistaan.

4.2.2 TOC-mallin kuvaus

Vemala TOC mallin kehitystyö perustuu Vemala-N -malliin (Huttunen ym. 2016) ja INCA-C -malliin (Futter ym., 2007). Maaperän hiilivarastot jaetaan kolmeen luokkaan: kiinteä orgaaninen hiili, liennut orgaaninen hiili (DOC) ja liennut epäorgaaninen hiili. Mallin syötteinä käytettiin vuotuista karikemäärää ja maaperän alkuperäisen hiilivaraston määrää. Eri varastojen välillä tapahtuu vaihtantaa: Liennut orgaaninen hiili dissosioituu kiinteästä orgaanisesta hiilestä ja päinvastoin. Kiinteä orgaaninen hiili ja liennut orgaaninen hiili voi mineralisoitua myös liuenneeksi epäorgaaniseksi hiileksi, joka sitten voi vapautua ilmaan. DOC huuhtoutuu pintakerros- ja pohjavesivalunnan kautta vesistöihin.

Käytimme TOC-mallissa kuutta maankäyttöluokkaa, joita olivat maatalousalueiden 1) savimaat, 2) karkeat kivennäismaat ja 3) turvemaiden sekä metsäisten alueiden 4) kivennäismaat, 5) ojitetut turvemaiden ja 6) ojittamattomat turvemaiden. Simuloimme hiilen massataseen kahdelle maaperän kerrokselle päiväkohtaisesti. Liunneen orgaanisen hiilen huuhtoutumisen laskenta suoritettiin seuraavasti: Simuloitu hiilipitoisuus laskettiin jakamalla liunneen orgaanisen hiilen massa maaveden määrään. Tämän jälkeen liunneen orgaanisen hiilen pitoisuus kerrottiin päivittäisellä valunnalla huomioiden valunta maaperän eri kerroksista, minkä tuloksena saatiin maaperästä poistuva liunneen orgaanisen hiilen kuorma.

Koko Suomen alueen mallinnuksessa on huomioitava malliin käytettävien aineistojen, ilmastomuutosten ja liukoisen hiilen tuotantonopeuden alueellinen vaihtelu. Alkuperäinen hiilipitoisuus maaperässä perustuu peltojen multavuustietoihin ja kivennäismetsien monilähteisiin kansallisiin metsäinventointitietoihin (VMI). Maahan päätyvän lehtikarikkeen määrä saatiin metsien kasvua ja hiiliprosesseja kuvaavan PREBAS-mallin tuloksista 16 x 16 m ruudukoilta koko Suomelle. PREBAS yhdistää hiilen kertymään fotosynteesin, puiden kasvun ja maaperän hiiliprosessien kautta muodostuneen hiilimäärän (Liski ym. 2005; Valentine & Mäkelä 2005). Liukoisen orgaanisen hiilen tuotantonopeus ja lämpötilariippuvuuskertoimen (Q10) arvot turvemaiden määritettiin Laurénin ym. 2019 mukaan.

Vemalan TOC-mallin kehittämisessä ja kalibroinnissa Pääjärven valuma-alueella käytettiin Helsingin yliopiston Lammin biologisen aseman korkealaatuisia orgaanisen kokonaishiilipitoisuuden havaintoja.

4.2.3 Hiilen kierron kehittäminen biogeokemikaalisessa mallissa

Järvet ovat tärkeä osa ekosysteemin hiilen kiertokulkua. Ne sitovat orgaanista hiiltä ja toisaalta tuottavat hiilidioksidi- ja metaanipäästöjä. Tässä osatyössä kehitimme Vemala TOC-mallin lisäksi järvien ja jokien biogeokemiallista mallia (Korppoo ym. 2017) epäorgaanisten hiiliprosessien simuloimiseksi. Tämän mallikehityksen tulokset on vielä jatkossa yhdistettävä Vemala TOC -malliin, jotta kokonaishiilen kiertokulun simuloinnilla voitaisiin arvioida erikseen hiilen sedimentaatiota ja ilmaan vapautuvia CO₂-päästöjä.

Epäorgaanisen hiilen kokonaismäärään vaikuttavat prosessit ovat 1) mineralisaatio, joka muuttaa orgaanisen kokonaishiilen epäorgaaniseksi hiileksi, 2) fotosynteesi, jossa epäorgaanista hiiltä käytetään levien kasvuun, 3) hengitys, joka vapauttaa epäorgaanista hiiltä veteen ja 4) hiilidioksidin vaihto veden ja ilman välisen rajapinnan kautta (Liite 1: Kuva L1). Hiilidioksidin osuus hiilen kokonaismäärästä riippuu sekä pH:sta että kokonaisalkaliteetista.

4.2.4 Skenaarioiden kuvaus

Yhdistimme eri ilmastomuutos-, metsänhakkuu- ja turvemaidenhoitoskenaarioita ja simuloimme malliketjutuksen avulla TOC-kuormituksen ja pitoisuuksien muutoksia vuosille 2030–2059 (Kuva 8). Simulaatio toteutettiin kahdelle pilottialueelle, jotka olivat Kiuruveden ja Pääjärven valuma-alue. Muuttuva ilmasto vaikuttaa puiden kasvuun, mikä puolestaan vaikuttaa maaperän hiilivarastoihin. Siksi TOC-kuormitussimulaatioissa tulee ottaa huomioon myös hakkuutasojen vaikutus turvemaiden metsätaloustähtäytty.

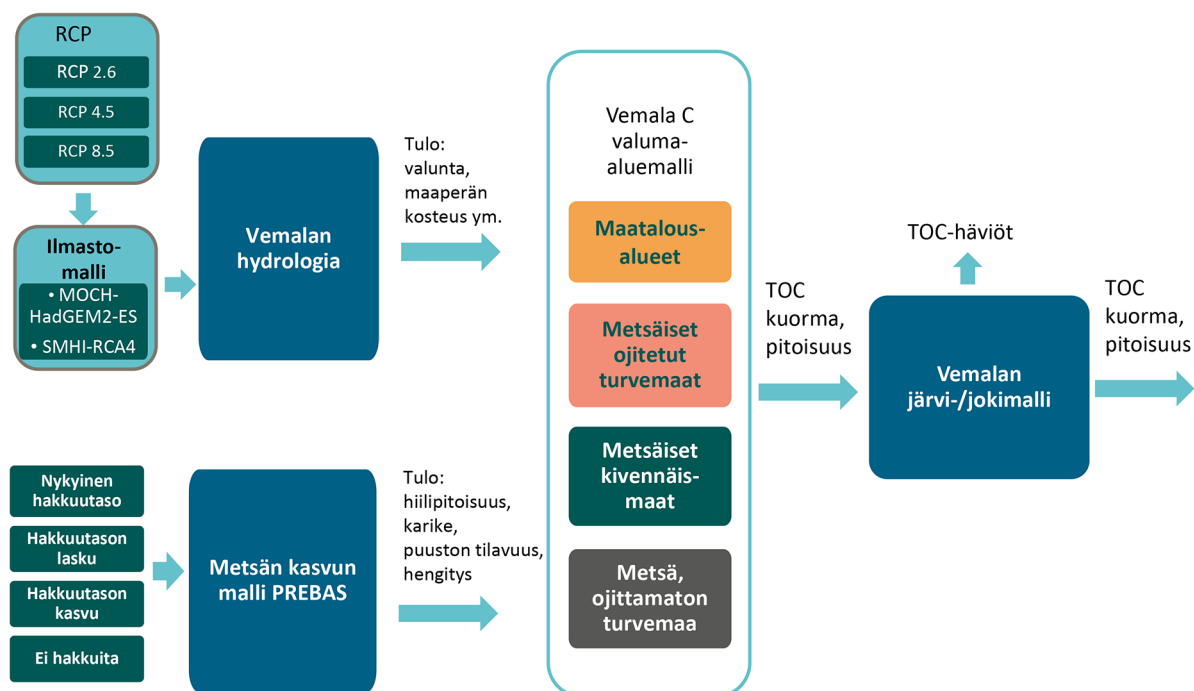
Käytimme kahden ilmastomallin ja kahden ilmastoskenaarion yhdistelmää. Ilmastomallien mukaiset lämpötila- ja sademäärät vietiin Vemala-malliin (Huttunen ym. 2021). Simuloimme metsien aiempaa ja tulevaa kasvua maisematasolla prosessipohjaisella PREBAS-mallilla. Puiden tuottaman karikkeen sisältämä hiili vaikuttaa suoraan maaperän TOC-prosesseihin, mutta sen määrä vaihtelee ilmastomuutos- ja metsänhakkuuskkenaarioissa. Seuraavat skenaariot on ajettu PREBAS-mallilla ja näiden skenaarioiden tuottamia lehtikarikkeen määriä on käytetty Vemala TOC -mallissa: 1) BaseHarv - nykyiset hoitokäytännöt (aikaisempien vuosien keskimääräinen kokonaishakkuutaso) jatkuvat myös tulevaisuudessa, 2) LowHarv - kohtalainen hakkuutaso: 0,6 kertaa BaseHarv-taso, 3) MaxHarv - erittäin korkea hakkuutaso: 1,2 kertaa BaseHarv-taso, 4) NoHarv - mahdolliset hiilivirratt ja -varastot ilman hoitoa: ei hakkuuta vuoden 2021 jälkeen.

Turvemaiden hoitokäytäntöjen muutokset tulee huomioida malleissa, jos turvemaiden hakkuutaso kasvaa tai laskee. Käytimme mallissa ojitettun turvemaan TOC-ominaiskuormituksen simulointiin oletuksena lineaarisesta empiiristä kerrointa (kg/ha/vuosi), joka kasvaa lineaarisesti vuodesta 1990 vuoteen 2022. Mallissa eri turvemaan maankäyttöskenaariorille oletetaan erilaiset kulmakertoimet, eli hiilikuorman kasvuvauhti eroaa maankäyttö-skenaarioiden välillä.

Lisääntyneiden hakkuiden tapauksessa avohakkuiden ja turvemaiden ojitusten odotetaan lisääntyvän. Pienemmällä hakkuumäärällä joitain prosentteja ojitetuista turvemaista voidaan jättää metsätalouden ulkopuolelle ja varata turvemaiden ennallistamiseen. Yhdistetyt hakkuiden ja metsien hoidon skenaariot turvemailla ovat:

- BASE (Nykyinen hakkuutaso) – maankäyttö jatkuu totuttuun tapaan. Turvemaiden ojitukset lisäävät TOC-ominaiskuormitusta edelleen tulevaisuudessa, mutta kasvu hidastuu 50 % aikavälillä 2023–2059. Turvemaiden ennallistamista ei toteuteta.
- LowHarv+Rest (Hakkuutason lasku ja soiden ennallistaminen) – Turvemaiden ojitukset lisäävät TOC-ominaiskuormitusta edelleen tulevaisuudessa, mutta kasvu hidastuu 50 % aikavälillä 2023–2059. Lisäksi 40 % ojitetuista turvemaista ennallistetaan vuoteen 2030 mennessä. Skenaariossa oletetaan, että 10 vuoden kuluessa TOC-kuormitus vähenee luonnon huuhtouman tasolle.
- NoHarv+Rest (Ei hakkuuta ja soiden ennallistaminen) – Turvemaiden ojitukset lisäävät TOC-ominaiskuormitusta edelleen tulevaisuudessa, mutta kasvu hidastuu 50 % aikavälillä 2023–2059. Lisäksi 100 % ojitetuista turvemaista ennallistetaan vuoteen 2030 mennessä. Skenaariossa oletetaan, että 10 vuoden kuluessa TOC-kuormitus vähenee luonnon huuhtouman tasolle.

- MaxHarv+Peat (Hakkuutason ja suometsien käsittelyn kasvu) – DOC:n tuotantonopeus ojitetuilla turvemaidella kasvaa 20 % enemmän kuin Base-, LowHarv- ja NoHarv-skenaarioissa. Turvemaiden ennallistamisesta ei toteuteta.



Kuva 8. Skenaariotarkastelujen toteutus SysteemiHiili -hankkeessa.

4.3 Tulokset

Tutkimme kahta eri valuma-aluetta järvineen. Kiuruveden valuma-alue sijaitsee Vuoksen valuma-alueen yläosassa. Sen pinta-ala on 1 419 km² ja itse järven pinta-ala on 14,2 km² ja keskisyyvyys 1,4 m. Valittavia maankäyttötyyppejä Kiuruveden valuma-alueella ovat kivennäismaan metsät (52 %) sekä ojitettujen turvemaiden metsät ja maatalous (31 %). Valuma-alueen suuri ojitettujen turvemaiden osuus selittää pintavesien korkeat TOC-pitoisuudet. TOC-pitoisuudet Kiuruvedellä ovat kasvaneet 1990-luvulta lähtien 16,4 mg/l:sta (keskiarvo vuosille 1990–1999) 18,7 mg/l:aan (keskiarvo vuosille 2010–2019). Kasvun syitä on useita: 1) Ilmastonmuutoksen myötä maaperän kohonnut lämpötila nopeuttaa orgaanisen aineksen hajoamista ja TOC:n huuhtoutumista. Sademäärän ja valunnan lisääntyminen lisää myös TOC:n huuhtoutumista. 2) Pidempi kasvukausi lisää puiden kasvua ja hiilen päätymistä takaisin maaperään. Maaperässä on enemmän hajotettavaa ja huuhtoutuvaa hiiltä suurempien karikemäärien vuoksi. 3) Turvemaiden kuivatus lisää TOC-pitoisuuksia pintavesissä.

Pääjärven valuma-alue sijaitsee Kokemäenjoen valuma-alueen kaakkoisosassa. Sen pinta-ala on 224 km² ja itse järven pinta-ala on 13,5 km² ja keskisyyvyys 14,8 m. Pääjärven valuma-alueen hallitsevia maankäyttötyyppejä ovat kivennäismaan metsät (68 %); ojitettuja turvemaametsiä on 13 %. Kaudella 2000–2022 TOC-pitoisuuksissa ei ole havaittu merkittävää nousua, mikä johtuu luultavasti siitä, että valuma-alueella on suhteellisen vähän ojitettuja turvemaita.

4.3.1 Muutokset TOC-huuhtoumissa maa-alueilta

Simuloitu orgaanisen hiilen kokonaiskuormitus Kiuruvedellä oli 8 080 t/vuosi (keskiarvo ajanjaksolla 1990–2022). Suuren TOC-ominaiskuormituksen vuoksi ojitetut turvemaat ovat pääasiallinen TOC-kuormituksen lähde Kiuruveden valuma-alueella: niiden kuormitusosuus on 4 080 t/vuosi. Ilmastomuutos-skenaarioissa (2020–2049) simuloitu keskivirtaama Kiuruveden valuma-alueella kasvaa skenaariosta riippuen 5–14 % verrattuna vuosiin 1990–2019. Virtauksen lisääntyminen on yksi TOC-kuormituksen lisääntymisen syistä. BASE-skenaariossa TOC-kuormituksen ennustetaan nousevan tasoon 10 380 t/vuosi eli 28 % nykyistä suuremmaksi (2030–2059) (Taulukko 2).

Tulevaisuuden skenaarioissa suurin TOC-ominaiskuormituksen kasvu on ojitetuilla turvemailla (metsä- ja maatalousmaa) johtuen meneillään olevasta maaperän kuivumisprosessista. Sisällytimme tämän malliin empiirisellä kertoimella, minkä vuoksi kyseisiin ennusteisiin liittyy suurta epävarmuutta. Myös muiden maankäyttöluokkien TOC-kuormituksen ennustetaan kasvavan ilmastomuutoksen ja lisääntyvän karikemäärän vuoksi. TOC:n kuormituksen kasvun alueellinen jakautuminen eri skenaarioissa osoittaa, että TOC-kuormitus lisääntyy eniten osavaluma-alueilla, joissa ojitetut turvemaat ovat pääasiallinen maankäyttömuoto (Liite 1: Kuva L2).

Taulukko 2. Kiuruveden TOC-tasapaino yhdistetyissä skenaarioissa kaudelle 2023–2059.

Kiuruvedellä viipymäaika on 14 vuorokautta.

Skenaario	Tuleva TOC	Lähtevä TOC	TOC-häviö	TOC-pitoisuus
1990–2022	8 080 t/v	8 050 t/v	30 t/v	17,1 mg/L
Base	10 380 t/v	10 340 t/v	45 t/v	20,9 mg/L
LowHarv+Rest	9 440 t/v	9 400 t/v	40 t/v	19,0 mg/L
NoHarv+Rest	8 090 t/v	8 060 t/v	35 t/v	16,2 mg/L

Mallitarkastelussa TOC-kokonaiskuormitukseksi Pääjärvelle saatiin 880 t/vuosi (keskiarvo ajanjaksolla 1990–2022). Pääjärven TOC-kuormituksen ensisijainen lähde ovat kivennäismailla olevat metsät, joiden osuus kuormituksesta on 560 t/vuosi. Perusskenaariossa TOC-kuormituksen ennustetaan nousevan tasoon 1 140 t/vuosi, eli 29 % nykyistä suuremmaksi (2030–2059) (Taulukko 3). Suurin TOC-kuormituksen lisäyksestä valuma-alueelta tulee ojitettujen turvemaiden metsistä. Myös kivennäismaiden metsistä ennustetaan tulevan suhteellisesti suurempi TOC-kuormitus aikaisempaan jaksoon verrattuna, mikä mahdollisesti johtuu ilmastomuutoksen myötä kasvavasta karikemäärästä.

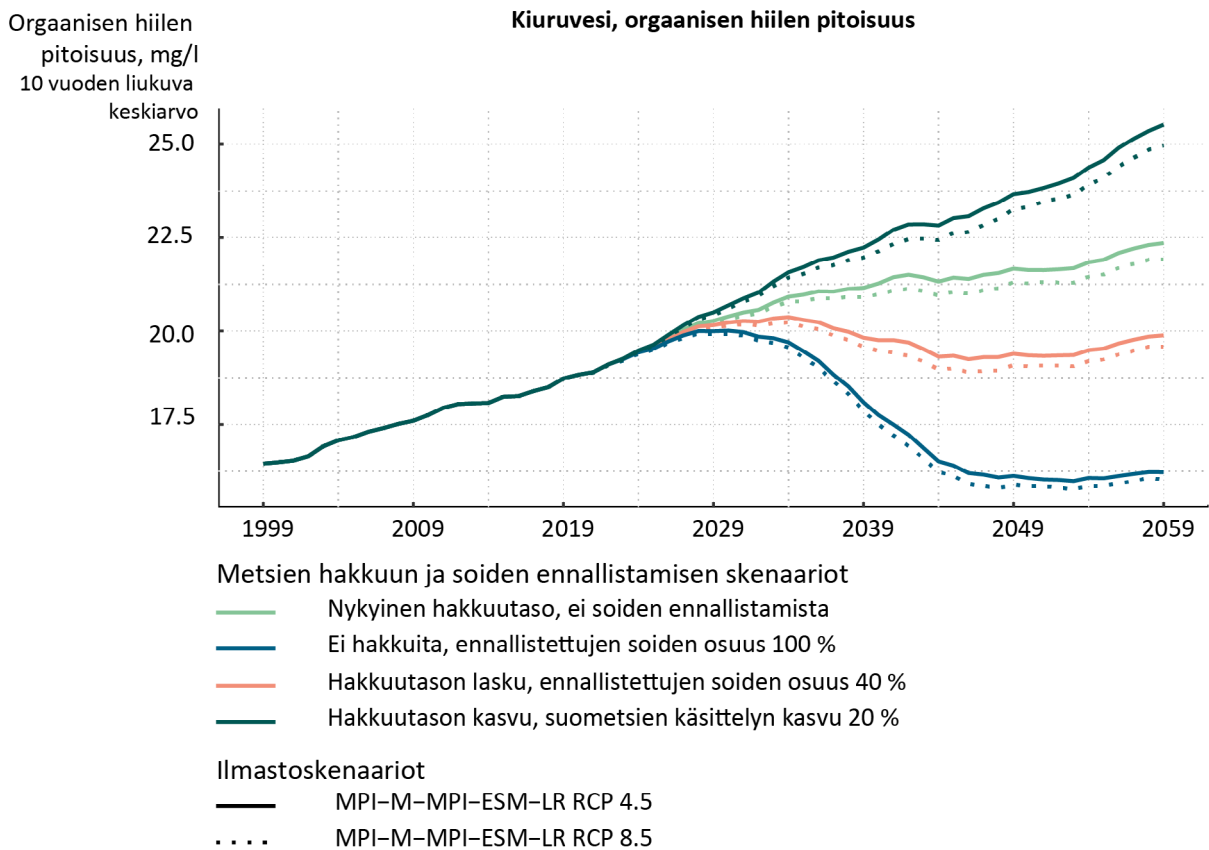
Taulukko 3. Pääjärven TOC-tase yhdistetyissä skenaarioissa kaudelle 2023–2059. Veden

teoreettinen viipymä Pääjärven Pääjärven on noin kolme vuotta.

Skenaario	Tuleva TOC	Lähtevä TOC	TOC-häviö	TOC-pitoisuus
1990–2022	883 t/v	629 t/v	225 t/v	10,6 mg/L
Base	1 140 t/v	851 t/v	284 t/v	11,9 mg/L
LowHarv+Rest	1 046 t/v	788 t/v	263 t/v	11,0 mg/L
NoHarv+Rest	948 t/v	721 t/v	241 t/v	10,1 mg/L

4.3.2 TOC-tase järvissä ja järven sisäiset häviöt skenaarioissa

Järvien TOC-tase ja -pitoisuus riippuu TOC:n tulevasta ja lähtevästä kuormasta sekä TOC-häviöstä järvessä. Veden viipymät voivat olla hyvin erilaisia Suomen järvissä, muutamasta päivästä useisiin vuosiin. Kiuruveden keskimääräinen viipymä on 14 päivää, joten se on nopeasti läpivirtaava järvi. Suurin osa kuormituksesta myös lähtee järvestä, ja vain 30 t/vuosi (0,4 %) tulokuormasta jää järveen. TOC-pitoisuudet Kiuruvedellä (Kuva 9) ovat seurausta TOC:n tulevan kuormituksen, lähtevän kuormituksen ja järven TOC-häviön muutoksista skenaarioissa. Skenaarioista turvemaanhoitolla on eniten vaikutuksia orgaanisen kokonaishiilen pitoisuuteen. Kuvassa 9 todennukainen pitoisuusmäärä on vihreiden (BASE) ja oranssien viivojen välissä (alhainen hakkuu, 40 %:n ennallistaminen). Punainen (Max Harvest) ja sininen (No harvest) ovat äärimmäisiä, varsin epärealistisia skenaarioita, jotka edustavat maksimirajoja. Kiuruveden TOC-pitoisuus kasvaa BASE- ja LowHarv+Rest-skenaarioissa. Vain NoHarv+Rest-skenaariossa TOC-pitoisuus järvessä laskee.



Kuva 9. TOC-pitoisuuden vaihtelu Kiuruvedellä yhdistetyissä skenaarioissa.

Pääjärvi ja Kiuruvesi ovat pinta-alaltaan yhtä suuria, mutta järven simuloidut TOC-häviöt ovat eri suuruusluokkaa, 225 t/vuosi (28 %), mikä selittyy Pääjärven veden pitkällä viipymällä (noin 3 vuotta). Järvissä, joissa viipymä on lyhyt, TOC-pitoisuudet seuraavat TOC:n kuormituksen muutoksia. Järvissä, joissa viipymä on pidempi, TOC:sta suurempi osa häviää järvessä, mikä hidastaa TOC-pitoisuuden muutoksia. Pääjärven TOC-pitoisuuden nousu BASE- ja LowHarv-skenaarioissa ei ole yhtä korostunut verrattuna Kiuruveden muutoksiin johtuen järven pidemmän viipymän aiheuttamista suuremmista TOC-häviöistä skenaarioissa.

4.4 Johtopäätökset

Kehitimme uuden Vemala TOC-mallin ja testasimme sitä kahdella eri valuma-alueella. Mallia sovellettiin erilaisiin ilmastomuutoksen, metsänhakkuu ja turvemaiden hoidon skenaarioyhdistelmiin. TOC-pitoisuudet ovat nousseet 1990-luvulta lähtien valuma-alueilla, joilla on runsaasti ojitettua turvemaita. Syynä TOC-pitoisuuksien kasvuun ovat ilmastomuutos, maahan päätyvien karikemäärien kasvu ja turvemaiden ojitus. Kaikkien näiden tekijöiden muutokset sisältyvät malliin. TOC-kuormituksen ja TOC-pitoisuuksien ennustetaan kasvavan BASE-skenaariossa molemmissa järvissä. TOC-kuormitusta ja TOC-pitoisuuden kasvua voidaan hidastaa ennallistamalla ojitetut turvemaat (LowHarv+Rest- ja No-Harv+Rest-skenaariot).

Järvien TOC-häviöiden määrässä on huomattavia eroja järvissä, joiden viipymät poikkeavat toisistaan. Pitkän viipymän Pääjärvellä orgaanista hiiltä sedimentoituu ja häviää hiilidioksidina huomattavia määriä, ja näiden häviöiden odotetaan kasvavan BASE-skenaariossa. Se, että iso osa TOC:sta häviää Pääjärvessä voisi selittää hitaamman TOC-pitoisuuden kasvun eri skenaarioissa. Lyhyen viipymän Kiuruvedellä järven TOC-häviöt olivat vähäisiä. Järvien TOC-taseen mallinnus ei kuitenkaan riitä CO₂-häviöiden arvioimiseksi: lisäksi tulisi simuloida epäorgaanisen kokonaishiilen kuormitus ja tase. Vemalan biogeokemiallista osamallia tulisi kehittää edelleen yhdistämään TIC- ja TOC-kierrot ja simuloimaan järvien CO₂-häviöitä.

Lisää työtä tarvitaan myös uuden Vemala TOC-mallin soveltamiseksi kaikilla Suomen vesistöalueilla, sillä se auttaisi hahmottamaan TOC-kuormituksen lähteiden alueellisen jakautumisen ja soveltuisi yhdistettyyn skenaarioanalyysiin. Koko Suomen kattava mallinnus on kuitenkin haastavaa järviketjujen suurten valuma-alueiden vuoksi. Hydrologisen mallin kalibrointi järvien valuma-alueille ilman jokien virtaamahavaintoasemia on haastavaa. Järvet pidättävät myös vettä, joten veden imeytymistä maaperään kuvaavien muuttujien kalibrointi järven juoksutuksien perusteella on haastavaa. Tutkimusta tarvittaisiinkin hydrologisen mallin parantamiseksi eri maaperärakenteille kalibroittavien parametrien vähentämiseksi.

4.5 Miten eri toimijat voivat hyödyntää tuloksia?

Vemala TOC -mallin tuloksia voidaan hyödyntää alueellisessa ja paikallisessa vesienhoitotyössä tunnistettaessa alueita, joille kannattaisi kohdentaa orgaanisen hiilen kuormitusta vähentäviä toimenpiteitä. Skenaariotarkastelut auttavat myös hahmottamaan maankäytön eri muotojen ja ilmastomuutoksen vaikutusten suuruusluokkasuhteita. Tuloksista viestiminen neuvontajärjestöjen kautta metsänomistajille voi herätellä metsänomistajia ympäristöystävällisempiin käytäntöihin.

4.6 Suositukset

4.6.1 Toimintasuositukset

- Ojitettuja turvemaita tulisi ennallistaa TOC-kuormituksen estämiseksi. Mallinnuksen perusteella, jos esimerkiksi 40 % ojitetusta turvemaasta ennallistetaan, johtaisi se noin 10 % pienempään TOC-pitoisuuden nousuun Kiuruvedellä verrattuna BASE-skenaarioon. Kohderyhmät: ELY, maanomistajat, paikalliset sidosryhmät.

- Orgaanisen kokonaishiilen pitoisuuksien muutokset tulisi sisällyttää lisäkritereinä vesipuitedirektiivin vesistöjen ekologista luokittelua koskevaan työhön. Vemalan TOC-malli voisi tulevaisuudessa tarjota TOC-pitoisuudet kaikille Suomen vesistöille vesienhoitotyöhön. Kohderyhmä: hallinto.

4.6.2 Tutkimussuosituks

- Vemala TOC -malliin lisätyn maaperän fysikaalisiin ominaisuuksiin pohjautuvan hydrologisen mallin jatkokehittäminen on olennaista sen käytön laajentamiseksi suurille järviketjujen valuma-alueille. Hydrologisen mallin tulisi olla prosessipohjainen, jotta voidaan minimoida riippuvuus lukuisista kalibroivista muuttujista erityisesti, kun otetaan huomioon jokien virtaamamittausten rajallinen saatavuus järvien valuma-alueiden kalibrointia varten.
- TIC- ja TOC-kiertoja tulisi yhdistää käyttämällä Vemalan järvien biogeokemiallista mallia vesiekosysteemien kokonaishiilitaseen mallintamiseksi. CO₂-päästöjen simulointi vaatii molempien komponenttien mukana olon mallissa.
- Pienillä valuma-alueilla tulisi tehdä yksityiskohtainen selvitys siitä, miten turvemaan ojitus ja kunnostusojitusalueet ovat muuttuneet 1990-luvulta lähtien. Tämä tutkimus auttaisi paremmin ymmärtämään, missä määrin turvemaiden hoidon muutokset vaikuttavat havaittuun trendiin. Muut tekijät, kuten kuivuminen ja lisääntynyt mineralisaatio, voivat asettaa haasteita kvantifiointiin.

4.7 Lähteet

- Jakkila, J., Vento, T., Rousi, T. & Vehviläinen, B. 2014. SMOS soil moisture data validation in the Aurajoki watershed, Finland. *Hydrology Research* 45(4–5): 684–702. <https://doi.org/10.2166/nh.2013.234>
- Futter, M., Butterfield, D., Cosby, B., Dillon, P. & Wade, A., 2007. Modeling the mechanisms that control in-stream dissolved organic carbon dynamics in upland and forested catchments. *Water Resources Research* 43(2). <https://doi.org/10.1029/2006WR004960>
- Huttunen, I., Huttunen, M., Piirainen, V., Korppoo, M., Lepistö, A., Räike, A., Tattari, S. & Vehviläinen, B. 2016. A national scale nutrient loading model for Finnish watersheds – VEMALA. *Environmental Modeling & Assessment*, 21(1): 83–109. <https://doi.org/10.1007/s10666-015-9470-6>
- Huttunen, I., Hyytiäinen, K., Huttunen, M., Sihvonen, M., Veijalainen, N., Korppoo, M., Heiskanen, A.-S., 2021. Agricultural nutrient loading under alternative climate, societal and manure recycling scenarios. *Science of the Total Environment* 783: 146871. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146871>
- Korppoo, M., Huttunen, M., Huttunen, I., Piirainen, V., Vehviläinen, B., 2017. Simulation of bioavailable phosphorus and nitrogen loading in an agricultural river basin in Finland using VEMALA v.3. *J. Hydrol.*, 549: 363–373.
- Laurén, A., Lappalainen, M., Kieloaho, A.-J., Karhu, K. & Palviainen, M. 2019. Temperature sensitivity patterns of carbon and nitrogen processes in decomposition of boreal organic soils – Quantification in different compounds and molecule sizes based on a multifactorial experiment. *PLoS ONE* 14(10): e0223446. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0223446>
- Liski, J., Palosuo, T., Peltoniemi, M. & Sievänen, R. 2005. Carbon and decomposition model Yasso for forest soils. *Ecological Modelling* 189: 168–182. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.005>
- Valentine, H. T. & Mäkelä, A. 2005. Bridging process-based and empirical approaches to modeling tree growth. *Tree Physiology* 25:769–779. <https://doi.org/10.1093/treephys/25.7.769>



Kuva: Laura Härkönen

5 Päätös- ja systeemianalyysin menetelmät valuma- aluesuunnittelussa ja ilmastovaikutusten arvioinnissa

**Jyri Mustajoki, Mika Marttunen, Ville Turunen,
Virpi Junttila ja Miika Kajanus**

5 Päätös- ja systeemianalyysin menetelmät valuma-aluesuunnittelussa ja ilmasto-vaikutusten arvioinnissa

Työpaketissa 4 (TP4) kehitimme ja hyödynsimme systeemianalyttisiä menetelmiä valuma-aluesuunnittelun ja kokonaisvaltaisten eri sidosryhmät osallistavien arviointien tukemiseen. Tapaustutkimukset liittyivät entisten turvetuotantoalueiden jatkokäyttövaihtoehtojen arviointiin, valuma-aluesuunnittelua tukevien paikkatietopohjaisten lähestymistapojen kehittämiseen sekä maakunnalliseen ilmastotiekarttatyöhön. Työpaketin tuloksena syntyi ohjeisto, joka tarjoaa tukea systeemianalyttisten menetelmien valintaan ja soveltamiseen.

5.1 Tausta ja tavoitteet

Systeemianalyttiset menetelmät tarjoavat järjestelmällisen lähestymistavan ongelman ja sen osa-alueiden tarkasteluun. Menetelmien avulla pyritään tunnistamaan ongelmaan liittyvät monimutkaiset syy–seuraus -suhteet, joita kokonaisvaltaisesti tarkastelemalla saadaan parempi ymmärrys ja jäsenely kokonaiskuva ongelmasta. Usein tavoitteena on tukea päätöksentekoa, jolloin voidaan puhua myös päätösanalyttisistä menetelmistä systeemianalyysin alalajina. Systeemianalyttisiä menetelmiä ovat muun muassa erityyppiset ongelmien jäsentelymenetelmät, monitavoitearviointi ja skenaario-analyysin menetelmät (kts. esim. Mustajoki ym. 2019).

Tavoitteemme oli kartoittaa ja arvioida systeemianalyttisten menetelmien soveltamismahdollisuuksia maankäyttösektorin toimenpiteiden ja ohjauskeinojen kokonaisvaltaisissa arvioinneissa. Lisäksi tavoitteenamme oli testata ja tukea menetelmien soveltamista hankkeen pilottikohteissa. Saatujen kokemusten perusteella loimme ohjeiston systeemianalyttisten menetelmien soveltamiselle. Ohjeisto tukee tarkasteluja muun muassa:

- toimenpiteiden kokonaiskestävyyden järjestelmällisessä arvioinnissa
- ilmastoon ja vesien tilaan liittyvien tavoitteiden yhteensovittamisessa ottaen huomioon myös muut ympäristölliset, sosiaaliset ja taloudelliset tekijät
- maankäyttö- ja ilmastoskenaarioiden vaikutusketjujen ymmärtämisessä
- kustannustehokkaiden toimenpideyhdistelmien valinnassa

5.2 Aineisto ja menetelmät

Aikaisempia soveltamiskokemuksia hyödyntäen tunnistimme aluksi mahdollisia menetelmiä, jotka voivat tukea erityyppisten suunnittelutilanteiden ratkaisua. Sen jälkeen testasimme näitä menetelmiä hankkeen pilottikohteissa. Lopuksi analysoimme menetelmien soveltamisesta saatuja kokemuksia. Toitimme työpaketin vuorovaikutteisesti muiden työpakettien kanssa. Työpakettien 1–3 (luvut 2–4) kanssa tutkimme, miten niissä sovelletuilla mallintamistyökaluilla saatuja tuloksia voidaan hyödyntää

kokonaisvaltaisissa arvioinneissa. Työpakettien 6 ja 7 (luvut 7 ja 8) kanssa tutkimme menetelmien soveltamismahdollisuuksia pilottikohteissa.

5.2.1 Tarkasteltavat menetelmät

Toteutimme menetelmien alustavan kartoituksen aiempien kokemusten ja hankkeen alussa tehdyn kirjallisuuskatsauksen avulla. Tunnistimme menetelmiä ja luokittelimme niitä soveltamiskohteen perusteella. Tarkasteltavina menetelmäryhminä olivat etenkin päätösanalyysiin keskittyvät menetelmät:

- **Arvoperustainen ajattelu (Value-Focused Thinking)** on ongelman jäsentelyä tukeva eri sidosryhmien tavoitteiden tunnistamiseen keskittyvä lähestymistapa, jossa lähtökohtana on ihmisten arvot (Keeney 1992). Arvoperustaisessa ajattelussa olennaista on jo varhaisessa vaiheessa tarkastella päätöksentekijöiden arvoja ja sitä, mitä päätöksentekijät oikeasti haluavat. Tämän perusteella pohditaan ratkaisuja, jotka voisivat täyttää päätöksentekijän tavoitteet. Lähestymistavan avulla voidaan usein löytää ja jopa luoda uusia parempia ratkaisuja kuin perinteisellä keinokeskeisellä ajattelulla, jossa lähdetään liikkeelle jo olemassa olevasta ratkaisujoukosta ja sen arvioinnista, mikä niistä on paras.
- **Ongelmien jäsentelymenetelmät (Problem Structuring Methods)** tarjoavat tukea päätös tilanteen järjestelmälliseen kehystämiseen sekä siihen liittyvien olennaisten tekijöiden ja näiden välisten riippuvuuksien tunnistamiseen ja havainnollistamiseen. Yksinkertaisimmillaan menetelmät voivat olla varmistuslistoja sille, että kaikki tekijät tulee otettua huomioon ongelman jäsentelyssä. Erilaisten taulukoiden, päätöspuiden ja kausaalimallien avulla voidaan puolestaan kuvata toimenpiteiden vaikutuksia eri tekijöihin ja esimerkiksi nuolien avulla sitä, miten eri komponentit vaikuttavat toisiinsa. Tavoitteena on saada havainnollinen ja jäsennelty kokonaiskuva monimutkaisesta ongelmasta.
- **Monitavoitearviointi (Multi-Criteria Decision Analysis)** on järjestelmällinen menetelmä, jonka avulla voidaan tukea ongelman jäsentelyä, tunnistaa päätöksentekijöille tärkeitä tavoitteita ja arvioida vaihtoehtoja eri näkökulmista (esim. Belton & Stewart 2002). Menetelmässä tunnistetaan aluksi eri osapuolten tavoitteet. Tämän jälkeen arvioidaan päätösvaihtoehtojen vaikutuksia eri tavoitteiden suhteen. Tavoitteita painotetaan päätöksentekijöiden arvostusten tai asiantuntijoiden näkemysten perusteella. Näiden perusteella lasketaan vaihtoehdoille kokonaishyvyysarvot kuvaamaan sitä, miten hyvin ne toteuttavat päätöksentekijöiden tavoitteet. Vertailemalla eri painotuksilla saatuja tuloksia voidaan tutkia vaihtoehtojen hyviä ja huonoja puolia eri näkökulmista katsottuna sekä tunnistaa, mitkä ovat olennaisimpia tekijöitä tuloksissa olevien erojen takana.
- **Portfoliopäätösanalyysi (Portfolio Decision Analysis)** on monitavoitearvioinnin laajennus, jossa yksittäisten toimenpiteiden vertailun sijasta pyritään löytämään paras toimenpideyhdistelmä annettujen resurssirajoitteiden puitteissa (esim. Salo ym. 2011). Toimenpiteiden arviointi perustuu monitavoitearvioinnin periaatteisiin. Lisäksi menetelmässä voidaan ottaa huomioon toimenpiteiden väliset synergiat ja toisiaan heikentävät vaikutukset.

5.2.2 Tapaustutkimukset

Tapaustutkimusten avulla saimme kokemuksia systeemianalyttisten menetelmien soveltuvuudesta erityyppisiin tarkasteluihin. Tarkasteltavina tapaustutkimuksina olivat:

- lin Komppasuon turvetuotantoalueen jatkokäyttövaihtoehtojen arviointi (yhteistyössä MERLIN-hankkeen kanssa; ks. luku 5.3.2)
- Oulun Miehonsuo-Turvesuon turvetuotantoalueen jatkokäyttövaihtoehtojen arviointi (kts. luku 5.3.3 ja Tietolaatikko 1)
- Maa- ja metsätalouden vesistö- ja ilmastovaikutusten arviointi Kiuruveden alueella (kts. luku 5.3.5)
- Vesistökuormituksen vähentämisen, monimuotoisuuden parantamisen sekä ilmastomuutoksen hillinnän ja sopeutumisen näkökulmista tärkeimpien osavaluma-alueiden tunnistaminen (ks. 5.3.6)
- Pohjois-Savon ilmastotiekartta (kts. 5.3.7)

5.3 Tulokset ja johtopäätökset

5.3.1 Ohjeisto systeemianalyttisten menetelmien tarkoituksenmukaiseen valintaan

Työpaketin tuloksena syntyi ohjeisto, joka tarjoaa tukea systeemianalyttisten menetelmien valintaan ja soveltamiseen (Mustajoki ym. 2023). Ohjeisto perustuu käyttäjän tarpeiden kartoittamiseen tarkasteltavassa tapaustutkimuksessa ja tarjoaa suositeltavia menetelmiä näiden tarpeiden pohjalta. Lisäksi ohjeisto esittelee pilottitutkimusesimerkit SysteemiHiili-hankkeesta kuvaten, miksi tietty menetelmä valittiin ja miten niitä hyödynnettiin (Mustajoki ym. 2023). Seuraavassa esittelemme tiivistettynä systeemianalyysin soveltamista pilottikohteissa.

5.3.2 Komppasuon turvetuotantoalueen jatkokäyttövaihtoehtojen arviointi

lin Komppasuon tapaustutkimus oli MERLIN-hankkeen pilottikohde. MERLIN-hanke oli arvioinut, millaiset turvetuotantoalueen jatkokäyttömuodot soveltuvat alueen eri osiin. Arviointi perustui paikkatietopohjaiseen tarkasteluun alueen ominaisuuksista. Tarkastelun kuluessa tuli kuitenkin tarve arvioida myös, miten jatkokäyttömuodot toteuttavat sidosryhmien tavoitteet. Tätä varten laadimme hierarkkisen arvopuun, jossa toimenpiteiden vaikutukset on jäsennelty kolmen pääkategorian alle: ympäristövaikutukset (ilmastonmuutoksen hillintä, luonnon monimuotoisuus, vesien tila), sosiaaliset vaikutukset (virkistyskäyttömahdollisuudet ml. keräily, metsästys, luontomatkailu, retkeily, luontokokemus) ja taloudelliset vaikutukset (elinkeinot, kustannukset, tuet). Sidosryhmätyöpajassa osallistujat arvioivat, mitä tavoitteita tulisi ottaa erityisesti huomioon Komppasuon jatkokäytön suunnittelussa. Lisäksi matriisimuotoisen vaikutustaulukon avulla esiteltiin suuntaa antavasti toimenpiteiden vaikutuksia eri tavoitteiden suhteen. Tämä auttoi tunnistamaan ja jäsentämään toimenpiteiden hyviä ja huonoja puolia.

5.3.3 Miehonsuo-Turvesuon jatkokäyttövaihtoehtojen monitavoitteinen arviointi

Miehonsuo-Turvesuolla arvioimme vastikään turvetuotannosta poistuneen alueen jatkokäyttövaihtoehtojen soveltuvuutta alueen eri osissa. Tavoitteenamme oli löytää järkevä yhdistelmä toimenpiteitä,



Kuva: Laura Härkönen

jotka monipuolisesti toteuttaisivat maanomistajan ja sidosryhmien tavoitteet. Tarkastelun alussa tunnistimme alueen pääasiallisen omistajan (Oulun kaupunki) ja eri sidosryhmien tavoitteita sekä mahdollisuuksia jatkokäytölle. Tässä osiossa hyödynsimme arvoperustaisen ajattelun periaatteita. Tunnistetut tavoitteet liittyivät niin virkistyskäyttöön, ympäristöön (vesistöt, monimuotoisuus, ilmasto) sekä toimenpiteiden kustannuksiin ja tuottoon. Jatkokäyttövaihtoehtojen arvioinnin toteutimme kevyenä monitavoitearviointina. Arvioimme taulukkotarkastelun avulla eri toimenpiteiden soveltuvuutta alueen eri osissa ja eri tavoitteiden suhteen.

Vaikka kyseessä oli parhaan toimenpideyhdistelmän valinta alueelle, emme nähneet tarvetta portfoliopäätösanalyysille, sillä suoraviivainen ”valitse paras toimenpide kuhunkin suon osaan” -tarkastelu tuotti jo monipuolisesti erityyppisiä toimenpiteitä alueen eri osiin.

5.3.4 Turve-Arvi-työkalu käytöstä poistuneiden turvetuotantoalueiden jatkokäyttövaihtoehtojen arviointiin

Komppasuon ja Turvesuo-Miehonsuo pilottikohteiden tarkasteluissa kävi ilmi, että turvetuotannon jatkokäytön suunnittelulle on yleisemminkin tarvetta, sillä turvetuotantoa ollaan monin paikoin lopettamassa. Pirstoutuneiden maanomistusolosuhteiden vuoksi turvetuotantoalueilla saattaa olla monia yksittäisiä maanomistajia, joilla ei välttämättä ole juurikaan tietoa turvetuotannon jatkokäytöstä, etenkin kun maat on usein vuokrattu turvetuottajalle.

Vastataksemme tähän yksittäisten maanomistajien tarpeeseen saada tukea jatkokäyttömuodon valintaan, tuotimme SysteemiHiili-hankkeessa Turve-Arvi-työkalun, jossa käyttäjä antaa tietoja turvetuotannosta poistuneen alueen ominaispiirteistä (esim. jäännösturpeen paksuus, pohjamaalaji, vettämis-mahdollisuudet, happamuus). Tietojen perusteella työkalu ehdottaa alueelle käypiä toimenpidevaihtoehtoja (esim. nurmiviljely, metsitys (eri puulajivaihtoehtoja), aurinkovoimapuisto). Työkalun monitavoitearviointiosion avulla käyttäjä voi vertailla toimenpiteiden vaikutuksia eri tavoitteisiin (esim. ilmastonmuutoksen hillintä, vesistövaikutusten pienentäminen, monimuotoisuuden lisääminen), joita hän voi halutessaan painottaa. Kunkin toimenpiteen kohdalla työkalu antaa myös sanalliset perustelut arvioille ja mahdollisia huomioon otettavia asioita, jos toimenpide päätetään toteuttaa.

Työkalun kehitystyötä ohjaavina tekijöinä olivat muun muassa helppokäyttöisyys ja havainnollisuus. Toteutimme työkalun nettiselainpohjaisena. Liitimme sen osaksi turvetuotannon jatkokäytön tarinakarttaa (kts. luku 7.1).

5.3.5 Kiuruveden vesienhallinta- ja ilmastonmuutostarkastelu

Laadimme aluksi kattavan katsauksen vesienhallinta- ja valuma-aluesuunnitteluun (Marttunen ym. 2023). Raportissa kuvataan valuma-aluesuunnittelun periaatteita, arvioidaan erilaisten paikkatietotuotteiden ja menetelmien käyttökelpoisuutta sekä kuvataan maa- ja metsätaloustoimenpiteiden kokonaisvaikutuksia hankkeessa laadittuja tietokortteja hyödyntäen.

Kiuruveden vesienhallinta- ja ilmastonmuutostarkasteluissa keskeisiksi tekijöiksi nousivat maa- ja metsätalouden toimenpiteet. Toimenpiteiden kohdentamista varten kehitimme kaksivaiheisen lähestymistavan vastaamaan kansainvälisiin, kansallisiin sekä alueellisiin ilmasto-, vesiensuojelu- ja luonnon monimuotoisuustavoitteisiin. Samalla haettiin ratkaisuja maa- ja metsätalouden toimintaedellytysten

parantamiseen, erityisesti ilmastonmuutoksesta aiheutuvaan vesiolosuhteiden äärevöitymiseen. Vesienhallinta- ja ilmastokestävyydestä tarkastelut muodostuvat kahdesta erilaisesta tarkastelusta, jotka eroavat toisistaan maantieteelliseltä laajuudeltaan ja päätavoitteeltaan.

Ensimmäinen tarkastelutaso on valuma-alue-suunnittelun kannalta tärkeimpien alueellisten kohteiden tunnistaminen. Siinä kohdealue on suurehko, lähtökohtaisesti yli 1 000 km²:n laajuinen valuma-alue. Päätavoitteena on löytää alueen sisältä tärkeimmät osavaluma-alueet, joille kannattaa vaikuttavuuden näkökulmasta kohdentaa resursseja tarkempaan suunnitteluun ja toimenpiteisiin.

Toisella tarkastelutasolla tehdään toimintaehdotukset ja yleissuunnittelu tärkeimmäksi tunnistetulla osavaluma-alueella. Sopiva kohdealueen koko on alle 100 km², jotta tarkempi tarkastelu, maastotöiden suunnittelu ja maanomistajien sitouttaminen on mahdollista. Päätavoitteena on yleissuunnittelmatasoiset toimenpide-esitykset. Maanomistajien kanssa käytäviä keskusteluja tukemaan laadittiin yhteensä 18 kpl maa- ja metsätalouden toimenpiteiden kokonaisvaikutuksia kuvaavaa tietokorttia ja toimenpiteiden vertailutaulukot. Kortit löytyvät [vesi.fi-aineistopankista](https://vesi.fi/aineistopankista).

Molemmilla tasoilla tehdään monikriteerisiä tarkasteluja ja paikkatietoanalyyskejä, joiden avulla tarkastellaan muun muassa, missä on suurin tarve tai potentiaali vesiensuojelulle, ilmastopäästöjen vähentämiselle, ilmastonmuutokseen sopeutumiselle ja luonnon monimuotoisuuden heikkenemisen estämiselle. Nämä kokonaisvaltaiset tarkastelut auttavat jäsentämään tietoa ja hyödyntämään monipuolisesti nykyisiä paikkatietoaineistoja sekä tukevat monihyötyisten toimenpiteiden tunnistamista.

5.3.6 Monitavoitearviointiin, PREBAS-malliin ja paikkatietoaineistoon perustuva menetelmä metsänhoidon suunnitteluun ja sen soveltaminen Kiuruvedellä

Maataloustoimenpiteiden ohella Kiuruveden ilmastotarkasteluiden toinen keskeinen tekijä on metsätalouden toimenpiteet. Niiden tarkastelussa analyttisten menetelmien haasteena on hakkuiden vaikutusten muuttuminen ajan myötä. Tämän tarkastelemiseksi kehitimme puunkorjuun toteutuksen, ajoituksen ja sijaintien suunnitteluun hybridimenetelmän, joka hyödyntää monitavoitearviointia nykyhetken vaikutusten arviointiin ja TP1:ssä sovellettua PREBAS-mallia (luku 2.2) ajan myötä muuttuvien vaikutusten arviointiin. Teimme arvioinnin paikkatietopohjaisesti. Jaoimme alueen ensin 100 m × 100 m -kokoisiin ruutuihin, joissa arvioimme monitavoitearvioinnin avulla, kuinka vakavia vaikutuksia metsänhakuilla on virkistyskäytölle, vesistökuormitukselle ja monimuotoisuudelle. Haavoittuvimmiksi tunnistetut ruudut rajasimme hakkuiden ulkopuolelle. Jäljelle jääville alueille laskimme PREBAS-mallilla parhaan puunkorjuustrategian metsien hiilinielun maksimoimiseksi ja puunkorjuusta saatavan voiton optimoimiseksi tietyllä ajanjaksolle. Lopuksi tarkastelimme haavoittuviksi tunnistetuilla alueilla, olisiko jatkuva kasvatus mahdollinen toimenpide alueen ominaisuuksien (esim. metsän ikäjakauma, maaperä) perusteella. Tulosten avulla voidaan esimerkiksi havainnollistaa haavoittuvien alueiden sijoittumista ja hakkuiden vaikutuksia sekä tukea jatkuvan kasvatuksen suunnittelua.

5.3.7 Ilmastotiekartta

Pohjois-Savon ilmastotiekartta -hankkeessa luotiin suunnitelma kohti hiilineutraalia Pohjois-Savon aluetta vuoteen 2035 mennessä. Tavoitteeseen pääsyä edistämään tunnistettiin yli 100 mahdollista

toimenpidettä liittyen muun muassa maa- ja metsätalouteen, liikenteeseen ja energiantuotantoon. Toimenpiteiden priorisointia varten kehitimme Pohjois-Savon ilmastotiekartta -hankkeen sekä Systeemihii- ja Portright-hankkeiden yhteistyönä portfoliomallin, jonka avulla voidaan tunnistaa tehokas joukko toimenpiteitä siten, että toimenpiteiden väliset synergiat ja niiden toisiaan heikentävät vaikutukset tulee otettua huomioon suunnittelussa.

Yksi keskeisistä haasteista toimenpiteiden välisten vuorovaikutusten mallintamisessa on se, että mahdollisten vuorovaikutusten määrä kasvaa eksponentiaalisesti toimenpiteiden määrän kasvaessa. Esimerkiksi ilmastotiekartan yli sadan toimenpiteen välillä voidaan tunnistaa tuhansia mahdollisia kahdenkeskisiä vuorovaikutuksia, joiden kaikkien läpikäyminen on erittäin työlästä. Kehittämässämme portfoliomallissa valitaan pienempi osajoukko toimenpiteistä tiettyjen kriteerien perusteella. Keskittämällä vuorovaikutusten mallintaminen tähän toimenpidejoukkoon voidaan vähentää tarvittavaa työmäärää. Lähestymistapa mahdollistaa myös tavoitteiden linkittämisen esimerkiksi YK:n kestävän kehityksen tavoitteisiin. Tämän avulla voidaan varmistaa, että yhteiskunnan eri osa-alueilta tulevat toimenpiteet otetaan monipuolisesti huomioon kokonaisuuden suunnittelussa. Lähestymistapa auttaa ymmärtämään toimenpiteiden välillä olevia synergioita ja toteutuksen yhteydessä tarvittavia kompromisseja. Siten saadaan aikaan laadukkaampia ratkaisuja huoltovarmuuden ja ilmastomuutokseen sopeutumisen näkökulmasta, jotka ovat keskeisiä tavoitteita ilmastokarttatyössä.

5.4 Miten eri toimijat voivat hyödyntää tuloksia?

- Laadittua ohjeistoa systeemianalyttisten menetelmien soveltamisesta voidaan käyttää hyväksi tunnistettaessa mahdollisia menetelmiä erityyppisiin suunnittelutilanteisiin, joissa on tarvetta tukea moniarvoista ja kokonaisvaltaista suunnittelua. Ohjeistossa kuvataan erilaisia ilmastoviisaiden ratkaisujen hallintaa tukevia viitekehyksiä ja menetelmiä.
- Portfoliomenetelmää voidaan hyödyntää tehokkaan toimenpidejoukon löytämiseksi edistämään keskeisiä tavoitteita, esimerkiksi ilmastokarttatyössä huoltovarmuutta sekä ilmastomuutoksen hillintää ja siihen sopeutumista. Tapaustarkastelussa kehitetty menetelmä ottaa huomioon myös toimenpiteiden väliset synergiat ja toisiaan heikentävät vaikutukset ja hyödyntää muun muassa YK:n kestävän kehityksen tavoitteita varmistamaan, että eri sektorit ovat monipuolisesti edustettuina tarkasteluissa.
- Kiurujoen tarkastelua voi käyttää esimerkkinä muualla monitavoitearviointiin ja PREBAS-malliin perustuvan paikkatietopohjaisen lähestymistavan hyödyntämisestä hakuiden kohdentamisessa siten, että niistä olisi mahdollisimman vähän haitallisia vaikutuksia vesistöihin, monimuotoisuuteen, ilmastoon ja virkistyskäyttöön.

Turve-Arvi-työkalua voidaan käyttää käytöstä poistuneiden turvetuotantoalueiden jatkokäyttömuotojen soveltuvuuden arviointiin erityyppisille alueille sekä jatkokäyttömuotojen monitavoitteiseen vertailuun ja arviointiin.

5.5 Toimintasuosittukset

- Systeemianalyttisiä menetelmiä voidaan hyödyntää laajamittaisissa tarkasteluissa, joissa etsitään ratkaisuja, jotka ovat ympäristön, talouden ja sosiaalisten vaikutusten kannalta hyväksyttäviä. Soveltamista harkittaessa on keskeistä arvioida näiden menetelmien mahdollisia soveltamistapoja sekä niiden

tarjoamien hyötyjen ja tarvittavien resurssien suhdetta. Tämän perusteella voidaan valita optimaalisin menetelmä ja soveltamistapa.

- Eri sidosryhmien ottaminen mukaan tarkasteluihin on tärkeää eri näkökulmien esilletuomiseksi ja yhteensovittamiseksi sekä kokonaiskuvan saamiseksi. Suunnittelussa on tärkeää tunnistaa eri toimijoiden arvoja ja tavoitteita, koska arvot ohjaavat päätöksentekoa.
- Systeemianalyttisten menetelmien tehokas käyttö vaatii vankkaa asiantuntemusta. Kokeneiden analyytikoiden osallistuminen auttaa varmistamaan menetelmien oikean soveltamisen, mikä vähentää virheiden riskiä ja edistää vastuullista käyttöä.

5.6 Lähteet

- Belton, V. & Stewart, T. J. 2002. Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach. Kluwer Academic Publishers, Boston, U.S.A. 372 s.
- Keeney, R. L. 1992. Value-Focused Thinking – A Path to Creative Decision-Making. Harvard University Press, Cambridge, U.S.A. 432 s.
- Marttunen, M., Turunen, V., Kajanus, M., Rantala, T., Virkkumaa, S., Seppälä, P., Räsänen, A. 2023. Valuma-alue-tason vesienhallinta- ja ilmastokestävyystarkastelut -synteesi menetelmistä ja ehdotus toimintamalliksi. SysteemiHiili-hankkeen raportti.
- Mustajoki, J., Marttunen, M., Liesiö, J. & Lehtonen, E. 2019. Systeemianalyttisten menetelmien hyödyntäminen maatalouden ravinteiden kierrossa – Esiselvitys. Suomen ympäristökeskus, Helsinki. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 40/2019. <http://hdl.handle.net/10138/305776>
- Mustajoki, J., Marttunen, M., Ahopelto, L., Kajanus, M., 2023. Menetelmiä ja viitekehyksiä kokonaisvaltaisten ja ilmastonäkökohdat huomioonottavien arviointien tueksi. SysteemiHiili-hankkeen raportti.
- Salo, A., Keisler, J., & Morton, A. (toim.) 2011. Portfolio Decision Analysis: Improved Methods for Resource Allocation. International Series in Operations Research & Management Science 162. Springer, New York, U.S.A. 409 s.

6 Maa- ja metsätalouden ilmastotoimenpiteiden ja ohjauskeinojen hyväksyttävyys

Lasse Peltonen, Eerika Albrecht, Johanna Leino
ja Matias Sivonen

6 Maa- ja metsätalouden ilmastotoimenpiteiden ja ohjauskeinojen hyväksyttävyys

Työpaketissa 5 (TP5) tutkimme käytöstä poistuneiden turvetuotantoalueiden uusien maankäyttövaihtoehtojen ja niitä edistävien ohjauskeinojen sosiaalista hyväksyttävyyttä ja oikeudenmukaisuutta. Hyödynsimme haastattelu- ja kyselytutkimuksia, jotka kohdensimme maa- ja metsätilallisille sekä entisten turvetuotantoalueiden maanomistajille.

6.1 Tausta ja tavoitteet

Tutkimme ilmastotoimien ja niihin keskittyvien ohjauskeinojen sosiaalista hyväksyttävyyttä turvealalla sekä maa- ja metsätaloudessa. Tapaustutkimusten kohteena olivat turvemaiden jatkokäyttömuodot sekä maa- ja metsätalouden ilmastotoimenpiteet maanomistajien näkökulmasta. Sosiaalisella hyväksyttävyydellä kuvataan politiikkatoimien ja poliittisten päätösten ominaisuutta, joka syntyy suhteessa hyväksyjään ja ympäröivän yhteiskunnan olosuhteisiin (Busse & Siebert 2018). Sosiaalinen hyväksyttävyys on merkittävässä roolissa edistämässä politiikkatavoitteisiin pääsemistä. Mitä suurempaa esimerkiksi ohjauskeinoon hyväksyttävyys on, sitä tehokkaammin keinon voidaan odottaa vaikuttavan. Sosiaalisen hyväksyttävyyden tarkastelumme kattaa kolme tasoa: yhteiskunnallispoliittisen, paikallisen ja markkinoiden tason.

Lisäksi tarkastelimme turvesiirtymän koettua oikeudenmukaisuutta. Tarkastelumme lähtökohtana oli, että koettu oikeudenmukaisuus vaikuttaa sosiaaliseen hyväksyttävyyteen. Tarkastelumme keskittyi koetun oikeudenmukaisuuden eri puolia: distributiivista (hyötyjen ja haittojen jako) sekä proseduraalista (menettelytapojen, vuorovaikutuksen) ulottuvuutta (Schlosberg 2013; Peltonen ym. 2008). Tavoitteenamme oli samalla konkretisoida ns. reilun siirtymän (Heffron & McCauley 2018) edellytyksiä suomalaisessa kontekstissa.

6.2 Aineisto ja menetelmät

6.2.1 Haastattelututkimus turvetuotantoalueiden jatkokäyttövaihtoehtoista

Toteutimme joulukuussa 2021 ja tammikuussa 2022 puolistrukturoituja teemahaastatteluja turvetuotannon jatkokäyttöä toteuttavien etujärjestöjen, ympäristöhallinnon, ministeriöiden ja yritysten edustajien parissa. Haastatteluilla halusimme saada selville jatkokäyttömuotojen ohjauskeinovalikoimaa, sekä kuinka toimijat huomioivat sosiaalisen hyväksyttävyyden elementtejä ohjauskeinoja valitessaan tai suositellessaan. Halusimme myös selvittää, minkälaisia sosiaalisen hyväksyttävyyden haasteita jatkokäyttömuotojen ohjaukseen sisältyy.

6.2.2 Turpeennostosta luopuvien maanomistajien mielipiteet esiin kyselyllä

Vuoden 2022 keväällä toteutimme koko maan kattavan kyselytutkimuksen turvetuotantoalueiden jatkokäyttöä suunnitteleville tai toteuttaville maanomistajille. Kysely toteutettiin yhteistyössä seuraavien hankkeiden kanssa: Metsät turvemailla – ratkaisuja päästöjen hillintään ja hiilinielujen kasvattamiseen (Turnee), Turvetuotantoalueiden ilmastokestävät jatkokäyttömahdollisuudet (Tuija) ja Suonpohjien hiilineutraali uusiokäyttö: edellytykset ja toimenpiteet (Uusisuo). Tavoitteenamme oli selvittää maanomistajien mielipiteitä turvetuotantoalueiden jatkokäytöstä ja jatkokäyttömuodon valintaan vaikuttavista tekijöistä. Lisäksi tavoitteenamme oli tutkia, turvetuotantoalueiden jatkokäytön ohjauskeinoja ja kuinka niitä toteutetaan hyväksyttävästi ja oikeudenmukaisesti ilmastoviisaampaan suuntaan.

Laadimme kyselyn sähköisenä Webropol-kyselynä ja lähetimme kyselyn sähköpostitse 1 745 henkilölle. Kyselyn vastausprosentti oli 24 % ja vastaajista valtaosa (88 %) oli miehiä. Vastaajien keski-ikä oli 57 vuotta. Yli puolella vastaajista turvetuotantoalueen vuokrasopimus oli päättymässä 2022 tai sen jälkeen. Lisäksi noin puolet vastasi omistavansa pinta-alaltaan pienehkön turvetuotantoalueen, noin 10–50 hehtaaria. Vastaajien omistamat turvetuotantoalueet sijoituivat useimmiten Etelä-Pohjanmaalle. Kyselyn tulokset on julkaistu artikkelissa Laasasenaho ym. (2023).

6.2.3 Kiuruveden ja Pohjois-Savon maa- ja metsätilallisille suunnattu mielipidekysely

Vuoden 2022 joulukuussa ja 2023 tammikuussa toteutimme Kiuruveden ja Pohjois-Savon maa- ja metsätilallisten ilmastotoimiin suhtautumista kartoittavan kyselytutkimuksen. Kyselyn otanta perustuu Metsäkeskuksen metsänomistajatietokantaan. Otanta jakaantuu kahteen osaotokseen, joista Kiuruveden osaotoksen tavoitteena on tukea SysteemiHiili-hankkeen toteuttamaa Kiuruveden alueen pilottitarkastelua ja Pohjois-Savon kuntiin ja kaupunkeihin kohdistuvan osaotoksen tavoitteena on ulottaa tarkastelu koko maakuntaa kattavaksi. Noin puolet kyselylomakkeista lähetettiin Kiuruveden alueelle ja puolet muualle maakuntaan.

Toteutimme kyselyn sähköisenä Webropol -kyselynä, joka lähetettiin sähköpostitse. Kiuruveden osaotoksen kysely lähti 1 100 yhteystietonsa Metsäkeskuksen tietokantaan jättäneelle maa- ja metsänomistajalle ja Pohjois-Savon osaotos 1 330 maa- ja metsänomistajalle. Kyselyyn vastasi yhteensä 402 maanomistajaa, ja vastausprosentti oli 17 %. Vastaajista 91 % omistaa metsätaloutta harjoittavan tilan ja 19 % maataloustilan. Kyselyn tulokset on julkaistu raporttina Itä-Suomen yliopiston yhteiskuntatieteellisen tiedekunnan julkaisusarjassa (Sivonen ym. 2023).

6.3 Tulokset

6.3.1 Taloudellinen tuotto ja omistusoikeus tärkeitä

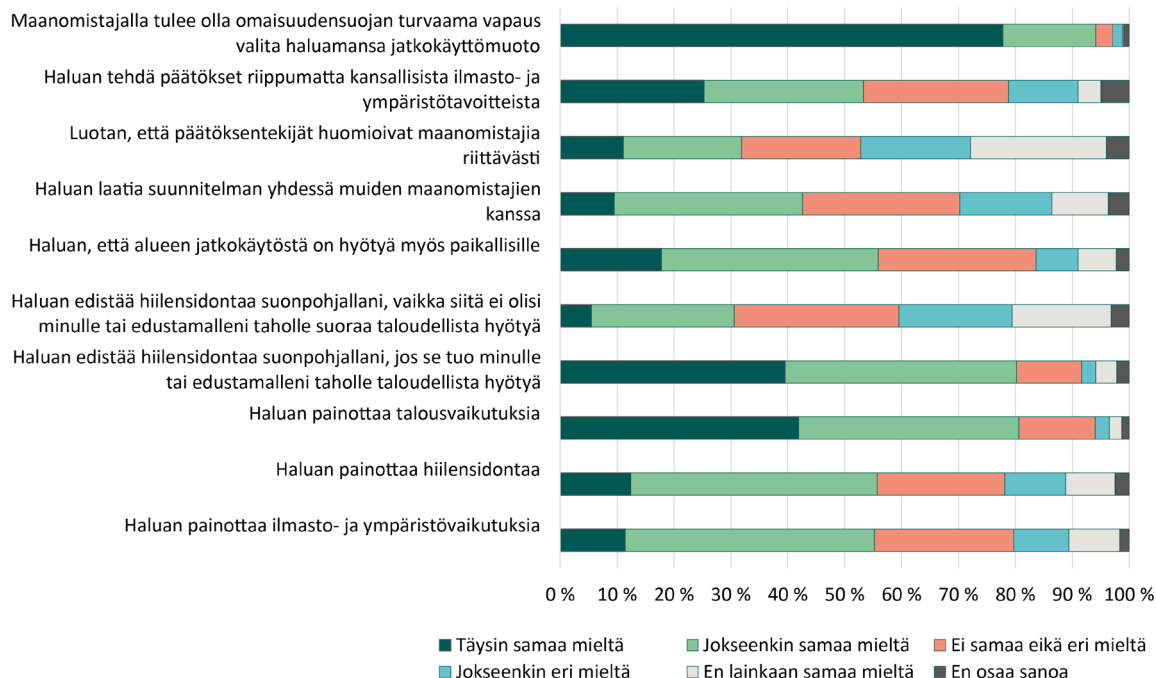
Hyväksyttävällä ja oikeudenmukaiseksi koetulla ohjauksella luodaan kestävä pohja ilmastotavoitteiden saavuttamiselle. Haastattelu- ja kyselytutkimuksen valossa taloudelliset tuet ovat merkittävän maanomistajien toimintaan vaikuttava ohjauskeino. Taloudellisilla tuilla on laaja hyväksyntä maaomistajien keskuudessa. Samalla varmistetaan ohjauskeinojen tehokkuus, sillä ympäristöohjauksen tehokkuus

riippuu aiempien tutkimusten mukaan hyväksyttävyydestä. Hyväksyttävyys onkin tärkeä näkökulma ohjauskeinojen suunnittelussa. Lisäksi riittävät korvaukset, taloudelliset kannustimet ja omaisuuden suojaan kajoamattomuus ovat keskeisiä asioita reiluuden kokemuksessa. Maanomistajille suunnatussa kyselyssä korostui maanomistajan omaisuudensuojan turvaaminen. Ohjauskeinonäkökulmasta tämä tarkoittaa maanomistajan valinnanvapauden rajoittamista sääntelyllä mahdollisimman vähän.

Metsitystuki on ollut merkittävin turvetuotantoalueiden jatkokäytön maankäyttömuodon valintaa ohjaava yksittäinen ohjauskeino. Jatkokäyttövaiheeseen siirtyvistä turpeennostoalueista noin 70 % metsitetään tai siirtyy muuten metsätalouskäyttöön. Metsitystuki on kuitenkin poistumassa 31.12.2023. Kysyimme maanomistajilta, minkä jatkokäyttömuodon he todennäköisimmin valitsevat. Suurin osa vastaajista (71 %) valitsi todennäköisimmin metsittämisen, 24 % maatalouskäytön, 22 % tuuli- ja aurinkovoimalan ja 18 % kosteikon rakentamisen. Noin joka kymmenes vastasi, ettei tee alueelle mitään toimenpiteitä.

Pyysimme maanomistajia arvioimaan, kuinka tärkeinä he pitävät hiilensidontaa, luonnon monimuotoisuuden edistämistä, metsästyksen ja muun virkistyskäytön kehittämistä, taloudellista tuottoa sekä vesiensuojelua. Yli puolet vastaajista piti taloudellista tuottoa erittäin tärkeänä tai tärkeänä tekijänä turvetuotantoalueen jatkokäytöstä päätettäessä. Lisäksi vesien suojelu, hiilensidonta ja luonnon monimuotoisuuden edistäminen koettiin vastausten perusteella joko tärkeäksi tai melko tärkeäksi.

Vastaajia pyydettiin myös arvioimaan jatkokäyttöä koskevia väittämiä. Vastaukset on esitetty kuvassa 10. Jatkokäytön valinnoissa painottui taloudellinen tuotto. Hiilensidonta sekä muut ympäristönäkökohdat painoutuivat jonkin verran vähemmän. Lisäksi suuri osa vastaajista oli samaa mieltä väittämän kanssa, että maanomistajalla tulee olla omaisuudensuojan turvaama oikeus päättää maankäytöstään. Maanomistajan omaisuudensuoja on Suomessa perinteisesti ollut vahva.



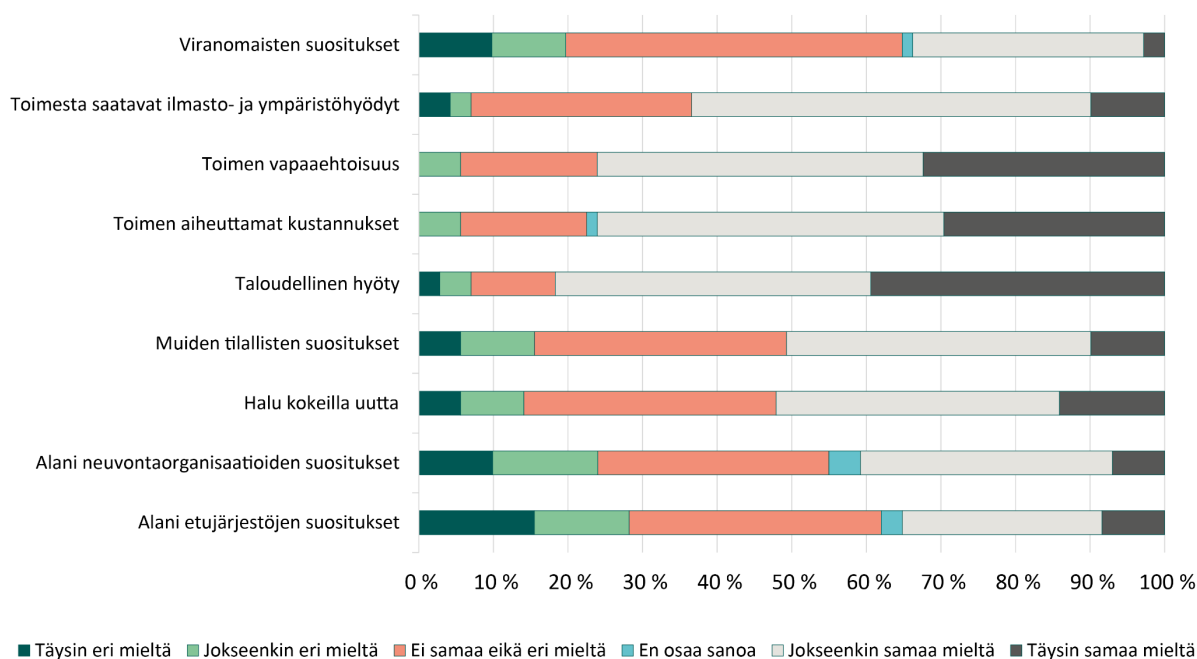
Kuva 10. Maanomistajien näkemyksiä jatkokäytön valintaan liittyvistä väittämistä (N = 398–405, vaihtelua väittämittäin).

6.3.2 Kiuruveden ja Pohjois-Savon maa- ja metsätilallisten suhtautuminen ilmasto- ja ympäristötoimenpiteisiin

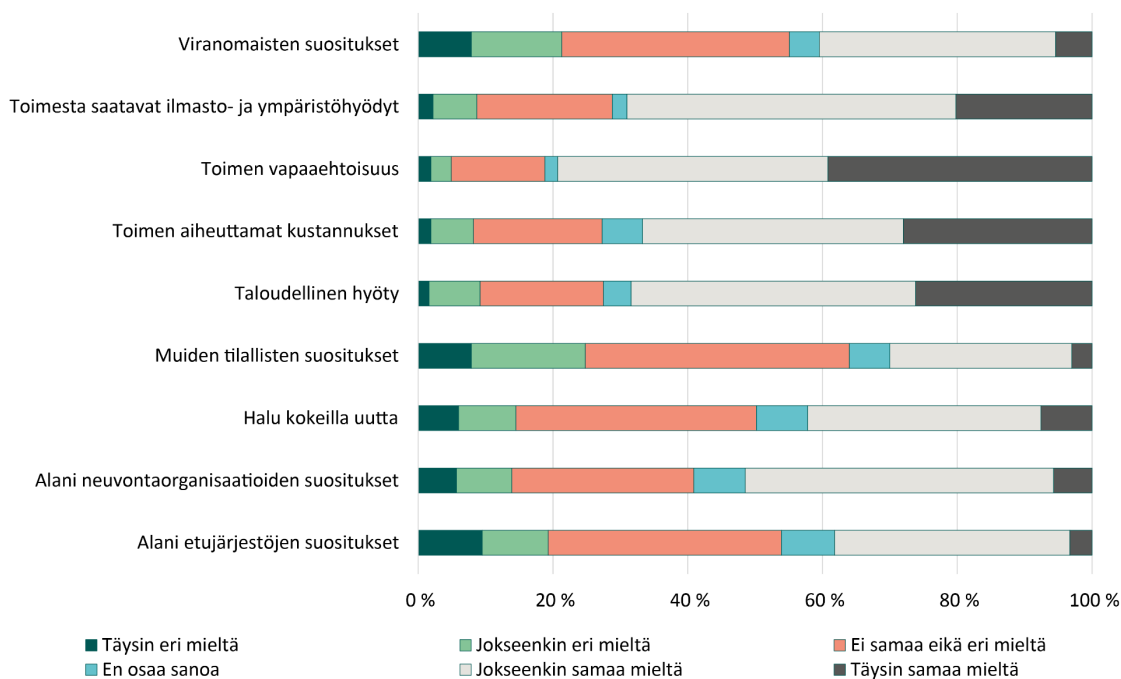
Maa- ja metsätalouden toimenpiteisiin kohdentuva ilmastopolitiikka vaatii tuekseen monihyötyisiä toimenpiteitä ja ohjauskeinoja. Nämä politiikkakeinot tulisi suunnitella siten, että ne suuntaavat toimialoja kohti vähähiilisyyttä, tukevat alojen kannattavuutta ja tulotasoa ja voimistavat tilallisten toimintamahdollisuuksia ja tulevaisuudennäkymiä. Kyselyn perusteella ilmastotavoitteisiin ja toimenpiteisiin ei pääasiassa suhtauduta suoraan kielteisesti, mutta muut huolenaiheet vievät tilaa ilmastotavoitteiden ja toimenpiteiden pohtimiselta, jolloin ne eivät ole päällimmäisenä mielessä. Tutkimuksen perusteella tilallisten luottamus päätöksentekijöihin vaatii parannusta. Onkin tärkeää vahvistaa tilallisten uskoa ja luottamusta päätöksentekijärjestelmää ja päätöksentekijöitä kohtaan suunnattaessa maa- ja metsätaloutta kohti vähähiilisyyttä.

Vastaajia pyydettiin arvioimaan tekijöitä ja tahoja, jotka vaikuttavat tilallisen päätöksentekoon ilmasto- ja ympäristötoimenpiteiden käyttöönotossa. Maatilallisten vastaukset on esitetty kuvassa 11 ja metsätilallisten kuvassa 12.

Maatilallisille toimenpiteen käyttöönottoon vaikutti eniten taloudellinen hyöty. Metsätilallisille puolestaan toimen vapaaehtoisuus oli tärkeää. Molemmat vastaajajoukot painottivat myös ilmasto- ja ympäristöhyötyjä sekä toimen aiheuttamia kustannuksia. Metsätilalliset pitivät muiden tilallisten suosituksia tärkeämpänä kuin maatilalliset. Noin kolmannes (30 %) maatilallisista ja 20 % metsätilallisista ei pitänyt oman alan etujärjestön suosituksia tärkeinä.



Kuva 11. Maatilojen omistajien näkemykset ilmasto- ja ympäristötoimenpiteiden käyttöönottamiseen vaikuttavista tekijöistä (vastaajina maatilalliset, N = 71).



Kuva 12. Metsätilojen omistajien näkemykset ilmasto- ja ympäristötoimenpiteiden käyttöön ottamiseen vaikuttavista tekijöistä (vastaajina metsätilalliset, N = 367).

6.4 Johtopäätökset

Maa- ja metsätalouden ilmastotoimien ja niihin kannustavien ohjauskeinojen hyväksyttävyyden on tärkeä osa ohjauskeinojen toimivuutta. Maa- ja metsätilallisten ja turvetuotantoalueiden maanomistajien luottamus päätöksentekijöitä kohtaan ja politiikkatoimien koettu hyväksyttävyyden vaikuttavat selvästi siihen, miten innokkaasti ja millaisia ilmastotoimia ollaan valmiita tekemään – ja miten erilaisiin ohjauskeinoihin suhtaudutaan. Poliittinen päätöksenteko ja neuvontaorganisaatioiden suositukset koetaan poukkoilevina ja epävarmoina, mikä on ristiriidassa tilallisten ylisukupolvisen ajattelun ja investointien aikajänneiden kanssa.

Työpakettien osatutkimuksissa havaittiin, että maanomistajat ovat kiinnostuneita edistämään ilmastotoimia, mutta eivät hinnalla millä hyvänsä. Toimenpiteiden mielekkyyttä arvioidaan ensisijaisesti niiden tuomien taloudellisten hyötyjen näkökulmasta. Tämä korostuu erityisesti monilla tiloilla ajankohtaisten talousvaikeuksien takia. Turvealan alasajon kaltaiset nopeat ja osin ennakoimattomat siirtymät voivat vaikuttaa seuraavien maankäyttömuotojen koskevien toimien ja ohjauskeinojen hyväksyttävyyteen. Myös tällöin jatkokäyttömuotojen taloudelliset hyödyt ja niiden merkitys korostuvat, sillä turpeentuotannon loppuessa maanomistajat kärsivät välittömiä tai välillisiä taloudellisia tappioita. Hiilensidonnain mahdollistamat ansaintamahdollisuudet kiinnostavat. Samalla konkreettiset ympäristöhyödyt, kuten vesien tilan parantaminen voivat olla maa- ja metsätilallisille merkittäviä. Sen sijaan ilmastomuutoksen hillintä sinänsä ja luonnon monimuotoisuus jäävät etäisemmiksi eivätkä motivoi niin vahvasti. Maanomistajien valinnanvapaus ja omaisuudensuoja sekä mahdollisuus huomioida paikalliset olosuhteet korostuivat hyväksyttävyyttä lisäävänä tekijänä – näitä periaatteita rajoittavia ohjauskeinoja ei nähty hyväksyttävänä.

6.5 Miten eri toimijat voivat hyödyntää tuloksia?

- Tulokset voivat kasvattaa poliittisten päättäjien tietoisuutta siitä, että maanomistajien luottamus ja taloudelliset tekijät ovat ratkaisevan tärkeitä ilmastotoimien hyväksyttävyyden kannalta. Tämä tietoisuus voi puolestaan auttaa päättäjiä ottamaan nämä seikat huomioon toimenpiteitä ja ohjauskeinoja suunniteltaessa.
- Neuvontaorganisaatiot voivat hyödyntää tuloksia ohjatessaan maa- ja metsätalallisia ilmastotoimien toteuttamisessa.
- Tutkijat voivat hyödyntää tuloksia jatkotutkimuksissa ja syventävissä analyyseissä.

6.6 Toimintasuositukset

- Maa- ja metsätilojen ilmasto- ja ympäristötoimenpiteiden edistämiseksi tarvitaan taloudellisia kannustimia – joko rahallisina säästöinä, tuloina tai maksettuina tukina.
- Ilmastotoimenpiteiden suunnittelussa ja niiden rahoituksessa kannattaa suosia toimenpiteitä, joilla on osoitettavissa olevia taloudellisia hyötyjä ja selviä paikallisia vaikutuksia esimerkiksi vesistöjen tilaan.
- Ilmastotoimien, niiden ohjauskeinojen ja rahoituksen sekä neuvonnan suunnittelussa tulisi parantaa ennakoitavuutta, toimien johdonmukaisuutta ja oikea-aikaisuutta.

6.7 Lähteet

- Busse, M. & Siebert, R., 2018. Acceptance studies in the field of land use—A critical and systematic review to advance the conceptualization of acceptance and acceptability. *Land Use Policy* 76: 235-245. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.05.016>
- Laasasenaho, K., Siira, O. P. J., Ekman, E. I., Vasander, H., Ojanen, P., Minkkinen, K., Lohila, A. K., Lauhanen, R., Räsänen, A., Palomäki, A., Viholainen, I., Markkanen, T., Aalto, T., Jokelainen, L. M., Marttila, H., Pääkkilä, L., Albrecht, E., Kuittinen, S., Pappinen, A., Kübert, A., Lampimäki, M., Lampilahti, J., Shahriyer, A. H., Tyystjärvi, V., Tuunainen, A-M., Leino, J., Ronkainen, T., Peltonen, L., Petäjä, T. & Kulmala, M. 2023. After-use of cutover peatland from the perspective of landowners: Future effects on the national greenhouse gas budget in Finland. *Land Use Policy* 134: 106926. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2023.106926>
- McCauley, D., & Heffron, R. 2018. Just transition: Integrating climate, energy and environmental justice. *Energy policy*, 119, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.04.014>
- Peltonen, L., Tuomisaari, J., & Kanninen, V., 2008. Kaavavalitukset ja koettu oikeudenmukaisuus. *Yhdyskuntasuunnittelu*, 46(3), 11-34
- Schlosberg, D., 2023. Theorising environmental justice: the expanding sphere of a discourse. *Environmental Politics* 22: 37-55. <https://doi.org/10.1080/09644016.2013.755387>
- Sivonen, M., Albrecht, E., Leino, J. & Peltonen, L. 2023. Ilmastomuutoksen hillintä ja siihen sopeutuminen maanomistajien näkökulmasta – kyselytutkimus Pohjois-Savon maa- ja metsätalanoimistajille. Publications of the University of Eastern Finland. Reports and Studies in Social Sciences and Business Studies. <https://erepo.uef.fi/handle/123456789/29895>

7 Turvetuotantoalueiden jatkokäyttövaihtoehtojen kokonaisarviointi

**Aleksi Räsänen, Lasse Aro, Oili Tarvainen, Anne Tolvanen,
Mari Annala, Teemu Ulvi, Jyri Mustajoki, Mika Marttunen
ja Lauri Rantala**

7 Turvetuotantoalueiden jatkokäyttövaihtoehtojen kokonaisarviointi

Tarkastelimme työpaketissa 6 (TP6) turvetuotantoalueiden jatkokäyttövaihtoehtojen kokonaisvaikutuksia. Laadimme laajan kirjallisuuskatsauksen eri jatkokäyttömuotojen vaikutuksista ympäristöön ja yhteiskuntaan. Tuotimme myös tietoaaineistoa maanomistajille ja muille toimijoille yhteistyössä työpaketin 4 ja 6 sekä muiden turvetuotantoalueisiin keskittyvien Hiilestä kiinni -hankkeiden kanssa.

7.1 Tausta ja tavoitteet

Turvetuotanto on vähentynyt Suomessa nopeasti, koska fossiilisena polttoaineena turpeen poltto lämmittää voimakkaasti ilmakehää. Turvetuotannon nopean alasajon vuoksi arviolta kymmeniä tuhansia hehtaareita entisiä turvetuotantoalueita on vapautumassa uuteen maankäyttöön. Perinteisesti suosituin jatkokäyttömuoto on ollut metsitys, kun taas muita laajasti käytössä olleita vaihtoehtoja ovat maatalouskäyttö ja kosteikoksi muuttaminen (Aro ym. 2023).

Turvetuotanto on luvanvaraista toimintaa, mutta tuotannon päättyessä ympäristöluvanvaraisuus lakkaa. Maanomistaja päättää käytöstä poistuneiden tuotantoalueiden jatkokäytöstä harvoja poikkeuksia lukuun ottamatta. Turvetuotantoalueiden jatkokäyttömuotojen valintaan tarvitaan tietoa eri jatkokäyttömuotojen vaikutuksista sekä toimintamalleja, jotka auttavat maanomistajia päätöksenteossa niin, että ympäristö- ja yhteiskunnalliset näkökohdat tulisivat paremmin otetuksi huomioon jatkokäyttömuodon valinnassa.

Tämän työn tavoitteena oli arvioida turvetuotantoalueiden jatkokäyttömuotoja ympäristönäkökulmasta ja tuottaa toimintamalli jatkokäytön suunnitteluun. Osana työpakettia teimme tieteellisen kirjallisuuskatsauksen (Räsänen ym. 2023a) turvetuotannon jatkokäyttömuotojen vaikutuksista ja kehitimme menetelmän ohjaamaan jatkokäyttömuotojen valintaa. Turvetuotannon jatkokäyttöön liittyvää tutkimusta tehtiin samanaikaisesti useissa muissa hankkeissa. Tämän vuoksi teimme hankkeiden välillä yhteistyötä ja suunnittelimme yhdessä tarinakartan turvetuotannon jatkokäytön suunnittelua ohjaamaan (tarinakartta julkaistaan Geologian tutkimuslaitoksen GTK:n toimesta loppuvuonna 2023).

7.2 Aineisto ja menetelmät

Systemaattinen kirjallisuuskatsauksemme kattoi kaikki 356 löytämäämme turvetuotannon jatkokäyttöä käsitellyttä vertaisarvioitua tieteellistä artikkelia. Jaoimme artikkelit niiden käsittelemän pääjatkokäyttömuodon perusteella kolmeen ryhmään: artikkelit, jotka tutkivat (1) hylättyjä turvetuotantoalueita, joille ei ole tehty aktiivisia jatkokäyttötoimia, (2) aktiivisin, esimerkiksi hydrologisin tai kasvillisuuden siirtoistutusmenetelmin, ennallistettuja turvetuotantoalueita ja (3) muuhun maankäyttöön otettuja, eli pääosin metsitettyjä, maatalouskäyttöön ja kosteikoksi rakennettuja turvetuotantoalueita. Tarkastelimme jokaisen artikkelin osalta, mitä vaikutuksia niissä oli tutkittu ja millä tavalla. Vaikutukset ja oimme seuraaviin kategorioihin: biodiversiteetti, ilmasto, hydrologia, muut ekosysteemipalvelut ja yhteiskunnalliset vaikutukset.

Kehitimme turvetuotannon jatkokäytön ohjaamiseen asiantuntijatyönä tavoitelähtöisen toimintamallin, joka hahmottaa suunnittelutyön keskeisiä vaiheita. Lisäksi tuotimme arviointikriteeristöt, joilla pystyimme tarkastelemaan, miten turvetuotantoalueen ominaispiirteet rajoittavat jatkokäyttömuotojen valintaa ja millaisia ovat eri jatkokäyttömuotojen ympäristö- ja yhteiskunnalliset vaikutukset. Hi-
oimme sekä toimintamallia että arviointikriteeristöjä yhteistyössä muiden hankkeiden asiantuntijoiden kanssa. Lisäksi kehitimme yhdessä työpaketin 4 kanssa Turve-Arvi-työkalun, joka ohjaa jatkokäyttömuotojen valintaa kohteen ominaispiirteiden avulla ja joka vertailee jatkokäyttömuotojen vaikutuksia (ks. luku 5). Testasimme toimintamallia työpajojen ja haastattelujen avulla. Teimme pienemmän testauksen [MERLIN-hankkeen](#) kanssa yhteisessä työpajassa Iin Komppasuolla. Laajemman testauksen teimme Oulun Turvesuo-Miehonsuolla kolmen työpajan sarjan ja asiantuntijahaastatteluiden avulla (Tietolaatikko 1).

7.3 Tulokset ja johtopäätökset

Vaikka turvetuotannon jatkokäyttötutkimusta on tehty yhteensä 23 maassa, tutkimukset painottuivat voimakkaasti seuraaviin maihin: Kanada (38 % tutkimuksista), Suomi (16 %), Viro (11 %) ja Irlanti (8 %). Tutkituimmat jatkokäyttömuodot olivat ennallistaminen ja hylkääminen (Taulukko 4). Pohjois-Amerikassa tutkimus on keskittynyt lähes pelkästään hylätyille ja ennallistetuille kohteille, kun taas Euroopassa on tutkittu suhteellisesti enemmän muita jatkokäyttömuotoja. Vastaavasti vaikutuksista tutkimus on painottunut biodiversiteetti-, ilmasto- ja hydrologisiin vaikutuksiin (Taulukko 5). Uusista jatkokäyttömuodoista, kuten aurinko- ja tuulivoiman tuotannosta turvetuotantoalueilla ei ole julkaistu tieteellisiä tutkimuksia.

Taulukko 4. Tutkituimmat turvetuotantoalueiden jatkokäyttömuodot systemaattisen kirjallisuuskatsauksen perusteella (Räsänen ym. 2023a)

Ensisijainen tutkittu jatkokäyttömuoto	Tutkimukset (kpl)
Hylkäämisen jälkeinen kasvittuminen	72
Ennallistaminen	162
Korvaaminen (metsitys, maatalous, kosteikko)	94 (46, 34, 14)
Muut tutkimukset	28

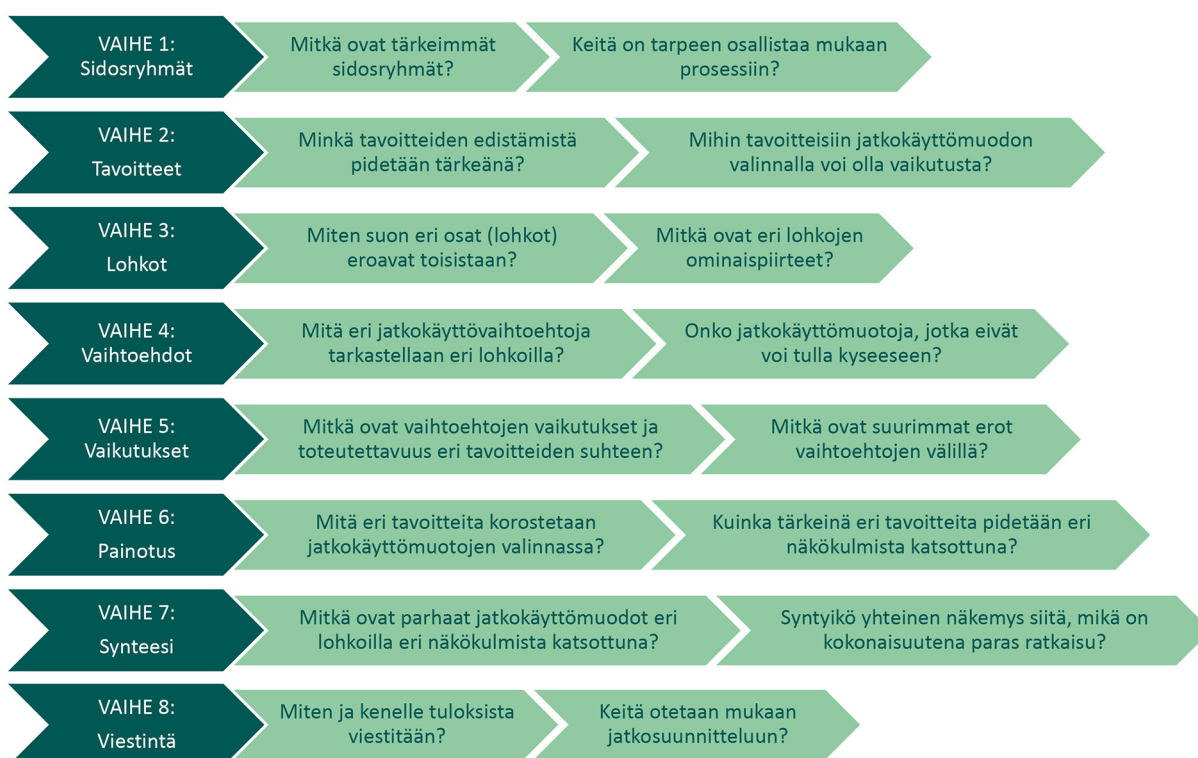
Taulukko 5. Turvetuotannon jatkokäytön tutkituimmat vaikutukset systemaattisen kirjallisuuskatsauksen perusteella (Räsänen ym. 2023a)

Vaikutus	% tutkimuksista
Biodiversiteetti	62
Ilmasto	33
Hydrologia	36
Muut ekosysteemipalvelut	17
Yhteiskunta	6

Artikkeleiden perusteella aktiiviset ennallistamistoimet nopeuttavat alueiden kasvittumista sekä vähentävät kasvihuonekaasupäästöjä ja negatiivisia vaikutuksia alapuolisiin vesistöihin. Tutkimusten perusteella emme kuitenkaan voineet tehdä vertailuja eri jatkokäyttömuotojen vaikutuksista, sillä vertailtavaa tutkimusta jatkokäyttömuotojen välillä ei ole tehty. Lisäksi vaikutustutkimukset olivat

puutteellisia sosiaalisten vaikutusten, alapuolisten vesistöjen hydrologian ja pitkäaikaisten kasvihuonekaasupäästöjen osalta.

Hankkeessa kehitetty jatkokäyttömuotojen valintaa koskeva toimintamalli jakautuu seitsemään vaiheeseen (Kuva 13). Toimintamallin pilotointi on esitetty Tietolaatikossa 1 ja kuvattu tarkemmin julkaisussa Räsänen ym. (2023b). Keskeistä toimintamallissa on tavoitelähtöisyys, keskusteleavuus ja monitaivoitteisuus. Jatkokäytössä on keskeistä tunnistaa kunkin turvetuotantoalueen keskeiset sidosryhmät, maanomistajan tavoitteet jatkokäytölle sekä jatkokäytölle reunaehdoja määrittävät alueen ominaispiirteet. Lisäksi suunnittelu on hyvä tehdä yhdessä alueen muiden maanomistajien ja sidosryhmien kanssa. Hankkeen oman toimintamallin lisäksi usean hankkeen yhteistyönä on julkaistu tarinakartta ohjaamaan turvetuotantoalueiden jatkokäytön suunnittelua (tulossa 2023, GTK). Tarinakarttaan on koottu monipuolisesti ja seikkaperäisesti tietoa turvetuotantoalueista ja niiden jatkokäytön suunnittelusta.



Kuva 13. Turvetuotantoalueen jatkokäytön suunnittelun ehdotetut vaiheet (Räsänen ym. 2023b).

Kehittämämme Turve-Arvi-työkalu (ks. luku 5) ja arviointikriteeristö syntetisoivat, millaiset jatkokäyttömuodot ovat mahdollisia eri turvetuotantoalueilla sekä millaisia ympäristö- ja yhteiskuntavaikutuksia eri jatkokäyttömuodoilla on (Taulukko 6 ja 7).

Tietolaatikko 1. Turvetuotannon jatkokäytön toimintamallin kokeilu Oulun Miehonsuo-Turvesuolla

Turvetuotannon jälkeisen vaiheen ohjaamiseen tarvitaan yhteissuunnittelua ja jatkokäyttömuotojen kokonaisvaltaista arviointia hyödyntäviä menetelmiä. Kehitimme monitavoitearviointia hyödyntävän menetelmän, joka sisältää seitsemän vaihetta (Kuva 13 päätekstissä). Pilotimme menetelmän käyttöä 210 hehtaarin Miehonsuo-Turvesuon alueella Oulussa (Kuva T1). Eri osapuolten näkemyksiä keräsimme kolmen osallistavan työpajan ja asiantuntijahaastatteluiden avulla (yhteensä 17 osallistujaa tai haastateltavaa).



Kuva T1. Turvesuo-Miehonsuon sijainti merkittynä punaisella Maanmittauslaitoksen taustakartalle.

Ensimmäisessä työpajassa keskusteltiin alueen kehittämisen tavoitteista, joista tärkeimmiksi nousivat vesistökuormituksen vähentäminen, luonnon monimuotoisuuden lisääminen, ilmastomuutoksen hillintä ja uusiutuvan energiatuotannon edistäminen. Toisessa työpajassa keskusteltiin mahdollisista jatkokäyttömuodoista sekä Miehonsuo-Turvesuon ominaispiirteiden asettamista reunaehdoista jatkokäytölle. Jaoimme tutkijatyönä alueen osa-alueisiin seuraavien ominaispiirteiden perusteella: happamuusriski, turpeen paksuus, alueen vettymisherkkyys ja pohjamaalaji. Työpajassa valitut ja alueella mahdolliset jatkokäyttömuodot olivat vetäminen (vedenpinnan tason nostaminen; sisältää sekä ennallistamisen että kosteikot), luontainen kasvittuminen ja metsittäminen. Kolmannessa työpajassa ehdotimme, miten jatkokäyttömuodot voisivat sijoittua eri osa-alueille. Ennen ehdotuksen läpikäyntiä esitimme, millaisia vaikutuksia toimenpiteillä on (Taulukko 5 päätekstissä). Havaitimme, että sama jatkokäyttömuotojen yhdistelmä oli optimaalinen kaikkien tavoitteiden suhteen, osin koska priorisoidut tavoitteet olivat positiivisia ympäristövaikutuksia korostavia.

Pilotoimamme lähestymistapa soveltuu etenkin yksityiskohtaista jatkokäytön suunnittelua edeltävään vaiheeseen, jossa kartoitetaan ja vertaillaan jatkokäyttövaihtoehtoja, ja turvetuotantoalueille, joilla on useita maanomistajia. Lähestymistapaan sisältyvät keskustelut mahdollistavat keskeisten toimijoiden välisen sosiaalisen oppimisen.

Toimintamalli ja sen pilotointi on esitelty tarkemmin julkaisussa Räsänen ym. (2023b).

Taulukko 6. Turvetuotantoalueiden jatkokäytön ympäristö- ja yhteiskuntavaikutukset lyhyellä (0–5 vuotta) aikavälillä (Räsänen ym. 2023b). Vaikutukset: + toimenpide edistää tavoitetta, ++ toimenpide edistää tavoitetta merkittävästi, –toimenpide heikentää tavoitetta, 0 toimenpiteellä ei ole juurikaan vaikutuksia tavoitteeseen.

Jatkokäyttö ja kustannusarvio	Vettäminen 0–10 000 €/ha	Luontainen kasvittuminen 500 €/ha	Metsittäminen 500–2 000 €/ha
Ilmastonmuutoksen hillintä	0	0	0
Monimuotoisuuden edistäminen	0	+	0
Vesistökuormituksen vähentäminen	–	+	–
Virkistysmahdollisuuksien parantaminen	+	+	0

Taulukko 7. Turvetuotantoalueiden jatkokäytön ympäristö- ja yhteiskuntavaikutukset keskipitkällä (6–25 vuotta) aikavälillä (Räsänen ym. 2023b). Vaikutukset: + toimenpide edistää tavoitetta, ++ toimenpide edistää tavoitetta merkittävästi, –toimenpide heikentää tavoitetta, 0 toimenpiteellä ei ole juurikaan vaikutuksia tavoitteeseen.

Jatkokäyttö ja kustannusarvio	Vettäminen 0–10 000 €/ha	Luontainen kasvittuminen 500 €/ha	Metsittäminen 500–2 000 €/ha
Ilmastonmuutoksen hillintä	+	+	+
Monimuotoisuuden edistäminen	++	+	+
Vesistökuormituksen vähentäminen	+	+	+
Virkistysmahdollisuuksien parantaminen	++	+	+

7.4 Miten eri toimijat voivat hyödyntää tuloksia?

- Maanomistajat ja suunnittelijat voivat hyödyntää työpaketin 4 kanssa kehittämäämme työkalua turvetuotannosta poistuvien alueiden jatkokäytön suunnittelussa ja tunnistaa sen avulla erityyppisille alueille niiden ominaispiirteiden perusteella soveliaimpia jatkokäyttömuotoja.
- Kansainvälistä kirjallisuustutkimustamme voidaan hyödyntää jatkokäyttömuotojen vaikutusten ja niihin liittyvien epävarmuuksien arvioinnissa.
- Yhdessä sisarushankkeiden kanssa laadittu tarinakartta tukee maanomistajia, kun he pohtivat entisen turvetuotantoalueen jatkokäyttövaihtoehtoja (tulossa 2023, GTK).

7.5 Suositukset

7.5.1 Toimintasuositukset

- Turvetuotantoalueiden jatkokäytön suunnittelu tulee integroida muuhun valuma-alue suunnitteluun. Vaikka turvetuotantoalueet ovat usein pieniä, niiden merkitys valuma-alueen kasvihuonekaasupäästöjen ja ravinnekuormituksen kannalta voi olla suuri. Kohderyhmä: Maankäytön suunnittelijat, viranomaiset, neuvontajärjestöt.

- Tausta: Systemaattisessa kirjallisuuskatsauksessa havaittiin, että on vain vähän tutkimusta, jossa turvetuotantoalueiden jatkokäyttöä käsitellään laajemmassa alueellisessa asiayhteydessä. Lisäksi toimintamallin pilotoinnin yhteydessä havaittiin, että valuma-alueelähtöinen lähestymistapa jatkokäytön suunnittelussa auttaa esimerkiksi vesistökuormituksen hallinnassa ja turvetuotantoalueiden ennallistamisessa ja vettämisessä.
- Turvetuotannon jatkokäytössä tulee suosia toimenpiteitä, jotka minimoivat negatiiviset ympäristövaikutukset. Suositeltavia jatkokäyttömuotoja ovat etenkin ennallistaminen suoksi, kosteikkojen rakentaminen ja kuivemmillä alueilla metsitys. Lisäksi aurinko- ja tuulivoiman tuotanto ovat mahdollisia jatkokäyttömuotoja, jos alueen annetaan samalla kasvittaa ja vettyä. Kohderyhmä: Maanomistajat, viranomaiset, neuvontajärjestöt.
 - Tausta: Tutkimuksemme osoitti, että eri jatkokäyttömuodoilla voi olla hyvinkin erilaiset ympäristövaikutukset.
- Turvetuotannon ja jälkihoidon aikaiset vesiensuojelurakenteet on tarpeen säilyttää jatkokäyttövaiheen alkuun asti. Tällöin turvataan jouston mahdollisuus jatkokäyttömuodoissa ja vähennetään jatkokäytön alkuvaiheen mahdollisesta maanmuokkauksesta aiheutuvaa vesistökuormitusta. Kohderyhmä: Lupaviranomaiset, lainsäätäjät.
 - Tausta: Turvesuo-Miehonsuon tapaustarkastelussamme selvisi, että turvetuotannon jälkihoitovaiheen ja jatkokäytön taitekohta on lupakäsittelyn ja ympäristönsuojelun kannalta hankala, sillä lupaviranomainen haluaa tiedon jatkokäytöstä jo jälkihoitoluvan hakuvaiheessa. Vesiensuojelurakenteet poistetaan usein jälkihoitovaiheessa.

7.5.2 Tutkimussuosituksia

- Tarvitaan tutkimusta, joka vertailee turvetuotantoalueiden eri jatkokäyttömuotojen ympäristö- ja yhteiskunnallisia vaikutuksia.
- Tarvitaan tutkimusta aurinko- ja tuulivoiman tuotannon vaikutuksista entisillä turvetuotantoalueilla.

7.6 Lähteet

- Aro, L., Jylhä, P., Järvenranta, K., Matila, A., Ramstadius, U., Ronkainen, T., Räsänen, A., Silvan, N., Silvenius, F., Virkajärvi, P., Wall, A. & Tolvanen, A. 2023. Turvetuotannosta poistuvien alueiden jatkokäytön vaihtoehtot sekä arvio niiden ympäristö- ja talousvaikutuksista Suomessa. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus -sarjaan. Luonnonvarakeskus, Helsinki. Käsikirjoitus: julkaistaan 2023.
- Räsänen, A., Albrecht, E., Annala, M., Aro, L., Laine, A. M., Maanavilja, L., Mustajoki, J., Ronkanen, A.-K., Silvan, N., Tarvainen, O. & Tolvanen, A. 2023a. After-use of peat extraction sites – A systematic review of biodiversity, climate, hydrological and social impacts. *Science of the Total Environment*: 163583. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163583>
- Räsänen, A., Mustajoki J., Aro, L., Ulvi, T., Annala, M. & Marttunen, M. 2023b. Turvetuotantoalueiden jatkokäytön tavoitelähtöinen ja moniarvoinen suunnittelu. *Suo* 74: 3–26. ISSN 0039-5471

8 Maa- ja metsätalouden vesienhallinta- ja ilmastokestävyys – Tapaustarkastelut Pohjois-Savossa

**Tuomo Eskelinen, Miika Kajanus, Kai Kärkkäinen, Teija Rantala,
Mika Marttunen ja Ville Turunen**

8 Maa- ja metsätalouden vesienhallinta- ja ilmastokestävyys

- Tapaustarkastelut Pohjois-Savossa

Testasimme ja kehitimme maankäytön muutosskenaarioita ja ohjauskeinoja työpaketissa 7 (TP7). Käytimme sektorirajat ylittäviä menetelmiä hankkeen pilotti-alueella Pohjois-Savossa. Samalla edistimme valtakunnallisten ilmastotavoitteiden saavuttamista maakunnan alueellisessa ilmastotyössä.

8.1 Tausta ja tavoitteet

Ilmastokestävät maankäyttöratkaisut ovat keskeinen haaste Pohjois-Savossa. Ilmastotiekartan seurantaraportin mukaan maataloussektori on Pohjois-Savon merkittävin päästölähde 34 prosentin osuudella kokonaispäästöistä. Pintavesistä 25 % ei yllä hyvään ekologiseen tilaan, lisäksi vesien jatkuva tummuminen huolettaa. Luontoarvoiltaan arvokkaiden maatalousalueiden pinta-ala putosi kolmanneksella tarkkailujaksona 2007–2021. Tulvat ja kuivuus aiheuttavat maataloudelle toistuvasti paikallista haittaa.

Ilmastokestävien maankäyttöratkaisujen löytyminen ja toteuttaminen edellyttävät vuoropuhelua maanomistajien, viranomaisten, sidosryhmien ja tutkijoiden kesken. Tarvitaan menetelmiä ja tukea monihyötyisten ratkaisuvaihtoehtojen tunnistamiseen ja kokonaisvaltaiseen arviointiin. Työpaketin tavoitteena oli rikastaa alueen hiilineutraaliustiekarttatyötä, alueellisen turvallisuuden tilannekuvaa sekä innovaatiotoimintaa. Työpaketissa tavoittelimme kuvan 14 mukaisia vaikuttavuuspolkuja.

TOIMINNOT	TUOTOKSET	TULOKSET	VAIKUTUKSET	VAIKUTTAVUUS
Tiedon yhteiskehittäminen Nexus-työpajoissa	Tietotuotteet - Ehdotukset P-S:n ilmastotiekarttaan - Ehdotukset P-S:n alueellisen turvallisuuden tilannekuvaan	Aluepolitiikan muutokset Aluepolitiikan ohjauskeinot - Rahoitus - Kaavoitus - Omistajaohjaus	Fossiilisten polttoaineiden korvaaminen uusiutuvilla	Päästöjen väheneminen
Tiedon vieminen sidosryhmien konteksteihin viestinnällä ja vaikuttamistyöllä	Verkostot - Syvenevät kumppanuudet - Jatkohankkeet	Maankäytön uudet tavat: pelto, metsä, turvemaa	Maaperän päästöt: pelto, metsä, turvemaa	Nielujen kasvaminen
	Konseptit Nexus-toimintamalli	Mahdollistavat uudet teknologiset ratkaisut	Ruokajärjestelmän päästöt	Kokonaiskestävyysvahvistuminen
		Mahdollistavat uudet liiketoimintamallit	Maaperän nielut: pelto, metsä, turvemaa	
		Mahdollistavat ihmisten käyttäytymismuutokset	Puutuotteiden nielut	
		Mahdollistavat organisaatioiden toimintatavat	Monimuotoisuus: pelto, metsä, turvemaa	

Kuva 14. Pohjois-Savossa tavoiteltuja vaikuttavuuspolkuja.

8.2 Aineisto ja menetelmät

Testasimme ja kehitimme sektorirajat ylittäviä menetelmiä, jotka liittyivät maankäytön muutoksiin ja ohjauskeinoiniin alueellisen kokonaiskestävyyden vahvistamiseksi. Lähestymistapaamme sisältyi kokonaisvaltainen tarkastelu Kiuruveden valuma-alueelle ja sen kytkeytymisestä Pohjois-Savon ilmastotiekarttatyöhön. Lähestymistapa perustui sektorirajat ylittävään sidosryhmäyhteistyöhön ja keskinäisriippuvuudet huomioivaan systeemianalyttiseen tarkasteluun.

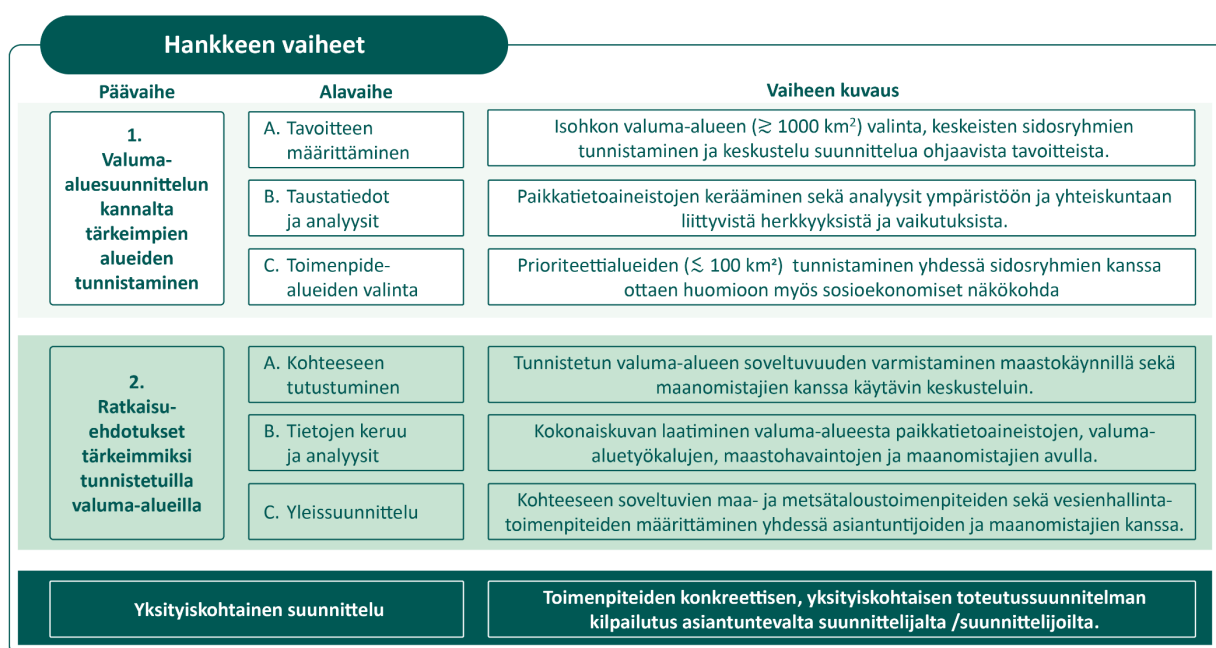
Järjestimme maanomistajille työpajoja Kiuruvedellä, asiantuntijatyöpajoja sidosryhmien sekä tutkijoiden kesken sekä ilmastotiekarttatyöpajoja maakuntatasolla. Lisäksi haastattelimme maanomistajia osavalmu-alueen maankäytön ilmastotoimien sekä maatalouden varautumisen näkökulmista. Testasimme myös uusia menetelmiä innovaatiotoiminnan tueksi. Tuotteistimme vesien hallintaan liittyvän tietotuotteen laajempaa käyttöä varten.

Ilmastonmuutokseen sopeutumisessa teimme alueellista yhteistyötä Ilmastoturvallisuuden liiketoimintaverkostot -hankkeen kanssa. Hankkeen tavoitteena oli lisätä Pohjois-Savon maa- ja metsätalouden varautumista ja sopeutumista sään ääri-ilmiöihin.

8.3 Tulokset ja johtopäätökset

8.3.1 Valuma-aluekohtaiset tarkastelut vesienhallinnan ja ilmastonmuutoksen haasteista sekä niiden ratkaisuksista

Kehitimme lähestymistavan maa- ja metsätalouden yleissuunnitelmatasoiseen vesienhallinta- ja ilmastokestävyydeltä tarkasteluun. Se muodostuu kahdesta tarkastelutasosta, jotka eroavat toisistaan maantieteelliseltä laajuudeltaan ja päätavoitteeltaan (Kuva 15).



Kuva 15. Kaksivaiheinen lähestymistapa valuma-alueen vesienhallinta- ja ilmastonmuutostarkasteluihin.

Ensimmäinen tarkastelutaso on suurehko, lähtökohtaisesti yli 1 000 km²:n laajuinen valuma-alue. Pää-tavoitteena on löytää alueen sisältä tärkeimmät osavaluma-alueet, joille kannattaa vaikuttavuuden nä-kökulmasta kohdentaa resursseja tarkempaan suunnitteluun ja toimenpiteisiin.

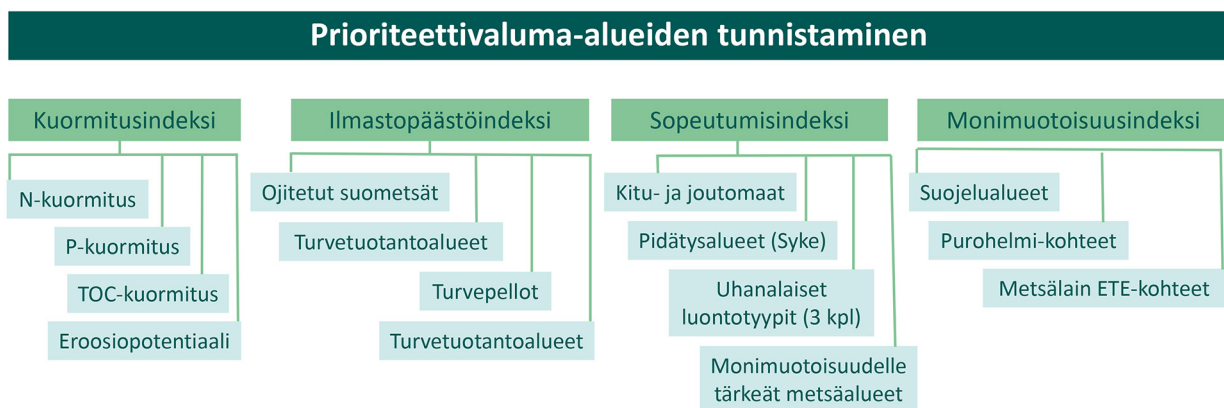
Toisella tarkastelutasolla tehdään toimintaehdotukset ja yleissuunnittelu tärkeimmäksi tunnistetulla osavaluma-alueella tiiviissä yhteistyössä maanomistajien ja sidosryhmien kanssa. Sopiva kohdealueen koko on alle 100 km², jotta tarkempi tarkastelu, maastotöiden suunnittelu ja maanomistajien sitoutta-minen on mahdollista. Pää tavoitteena on yleissuunnitelmatasoiset toimenpide-esitykset.

Molemmilla tasoilla tehdään paikkatietotarkasteluja, joiden avulla tarkastellaan muun muassa, missä on suurin tarve tai potentiaali vesiensuojelulle, ilmastopäästöjen vähentämiselle, ilmastonmuu-tokseen sopeutumiselle ja luonnon monimuotoisuuden heikkenemisen estämiselle. Tarkastelut autta-vat jäsentämään tietoa, hyödyntämään monipuolisesti nykyisiä paikkatietoaineistoja, tukevat moni-hyötyisten toimenpiteiden tunnistamista ja tarjoavat kiinnostavia avauksia ja näkökulmia maanomistajien kanssa käytäviin keskusteluihin.

8.3.2 Valuma-alue suunnittelun kannalta tärkeimpien alueiden tunnistaminen Kiurujoella

Tarkasteltava Kiurujoen valuma-alue jaoteltiin yhteensä 106 osavaluma-alueeseen. Osavaluma-aluei-den erilaisia ominaisuuksia kuvattiin neljällä indeksillä, joista kukin koostuu 3–5 indikaattorista (Kuva 16). Indeksit kuvaavat:

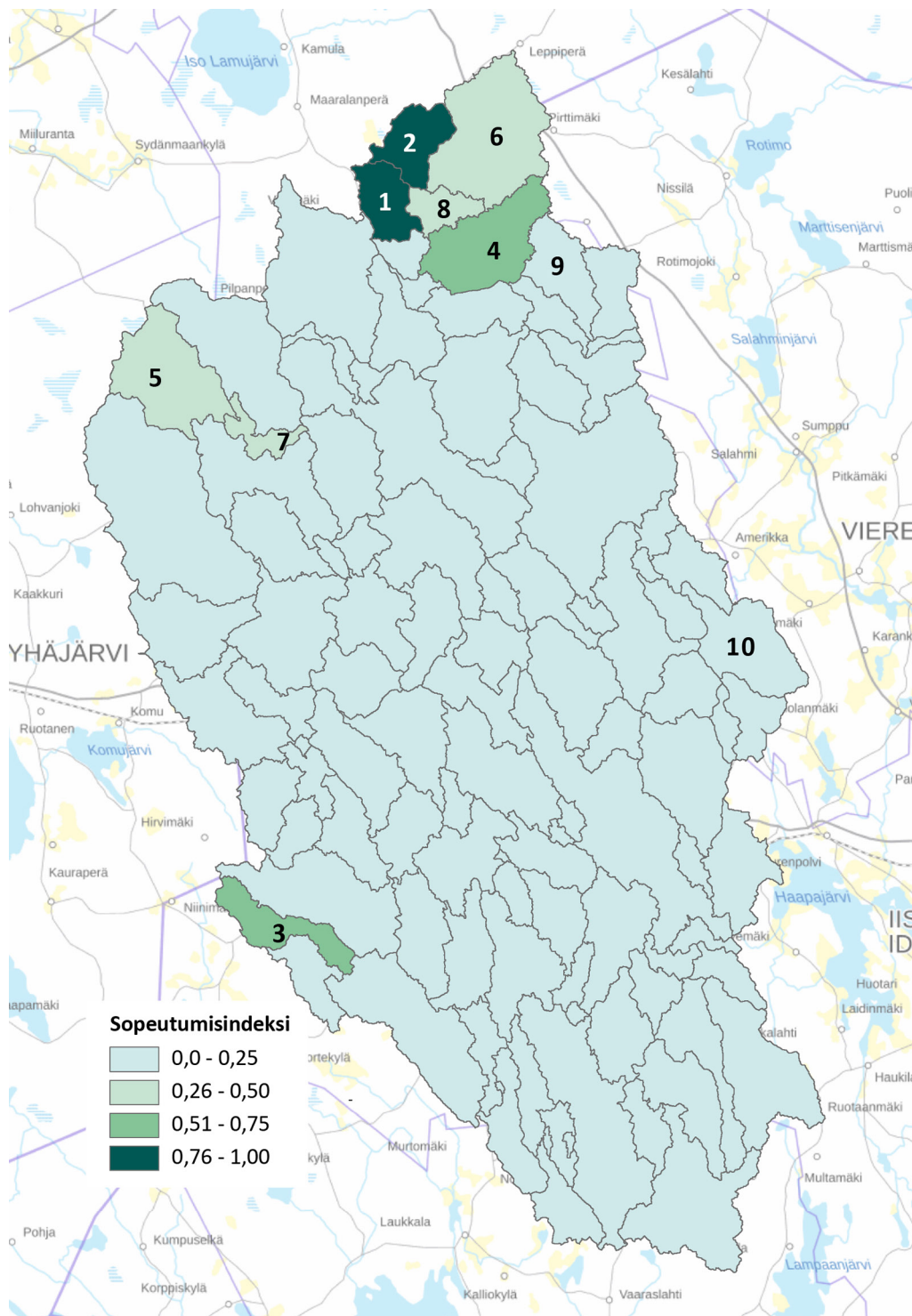
- vesistökuormituksen suuruutta (kuormitusindeksi)
- maankäyttösektorin kasvihuonekaasupäästöjen vähentämispotentiaalia (ilmastopäästöindeksi)
- potentiaalia ilmastonmuutoksen sopeutumiseen, erityisesti kasvaviin tulvariskeihin (sopeutumisindeksi)
- monimuotoisuuden kannalta arvokkaita alueita (monimuotoisuusindeksi).



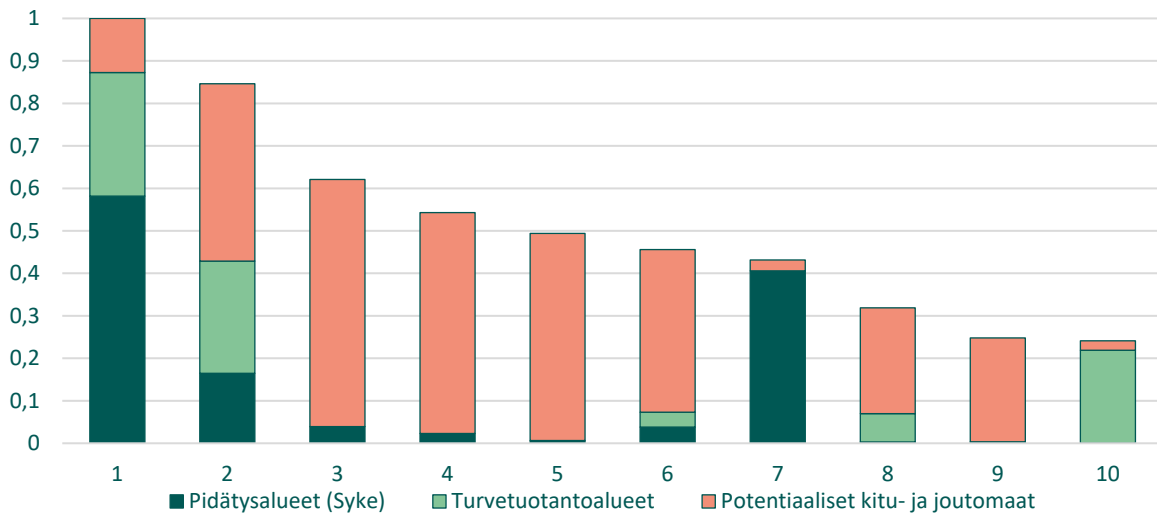
Kuva 16. Muodostetut indeksit ja niiden laskennassa hyödynnetyt indikaattorit. ETE-kohteet tarkoittavat metsälain erityisen tärkeitä elinympäristöjä. Purohelmi-kohteet viittaavat Sykessä mallinnettuun [pienenvirtavesien valtakunnalliseen tilanarviointiin](#).

Indeksikohtaiset tulokset on esitetty erilaisilla värikoodeilla karttapohjilla (Kuva 17). Lisäksi kunkin in-deksin kohdalla tarkasteltiin yksityiskohtaisemmin suurimman arvon saaneita (10 kpl) osavaluma-alu-eita pylväskuvaajina, joista käy ilmi eri indikaattorien osuus indeksin kokonaisarvossa (Kuva 18). Esi-merkkinä on tässä esitetty sopeutumisindeksin tulokset. Sopeutumisindeksissä suurin painoarvo oli

alueella sijaitsevilla potentiaalisilla vedenpidätysalueilla ja vesienpalautukseen sopivilla kitu- ja joutomailla. Top 10 -osavaluma-alueilla indeksin arvoissa oli todella suuria eroja ylimpien ja alimpien arvojen välillä (10. osavaluma-alue sai arvon n. 0,2 ja 1. osavaluma-alue arvon 1). Suurimman sopeutumisindeksin arvon saaneella osavaluma-alueella korkeaan indeksiarvoon vaikuttivat eniten alueella sijaitsevat Sykessä kehitetyllä tulvan pidätysalueiden tunnistusmenetelmällä arvioitujen potentiaalisten pidätysalueiden suuri määrä.



Kuva 17. Sopeutumisindeksin arvot Kiurujoen valuma-alueella. Mitä suurempi arvo, sitä suurempi sopeutumispotentiaali vesienhallinnan näkökulmasta. Kymmenen suurimman arvon saaneet osavaluma-alueet on numeroitu. Suurimman arvon saanut osavaluma-alue on saanut numeron 1 ja kymmeneksi suurimman arvon saanut alue arvon 10.



Kuva 18. Eri indikaattorien vaikutus sopeutumisindeksin arvon muodostumiseen Top 10 -osavaluma-alueilla.

Tarkastelut auttavat jäsentämään tietoa, hyödyntämään monipuolisesti nykyisiä paikkatietoaineistoja, tukevat monihyötyisten toimenpiteiden tunnistamista ja tarjoavat kiinnostavia avauksia ja näkökulmia maanomistajien ja sidosryhmien kanssa käytäviin keskusteluihin.

8.3.3 Pohjois-Savon ilmastotiekarttatyössä kehitetty lähestymistapa toimenpiteiden valintaan

Osana Pohjois-Savon ilmastotiekarttatyötä ja Suomen Akatemian Portright-hanketta kehitimme lähestymistavan, joka tukee toteutettavien toimenpiteiden valintaa, kun näiden väliset keskinäisriippuvuudet eli synergiat ja mahdolliset toisiaan heikentävät vaikutukset halutaan ottaa huomioon. Haasteena näiden mallintamisessa on riippuvuuksien suuri määrä erityisesti ilmastoasioissa, jossa ongelmien ratkaisut sisältävät tyypillisesti kymmeniä mahdollisia toimenpiteitä, jolloin näiden välillä voi olla satoja mahdollisia erilaisia riippuvuuksia. Vuorovaikutusten arviointi jääkin usein tekemättä sen vaatiman suuren työmäärän ja epävarmuuksien takia. Kehittämämme menetelmä mahdollistaa keskinäisriippuvuuksien analyttisen arvioinnin kohtuullisella työmäärällä.

Testasimme lähestymistapaa Pohjois-Savon ilmastotiekarttatyössä. Ilmastotiekartassa oli jo aiemmin tunnistettu 101 toimenpidettä eri teema-alueilta. Kuusi asiantuntijaa arvioi kaikki 101 toimenpidettä INTO-työkalulla, minkä perusteella 20 näistä valittiin tarkempaan tarkasteluun. Valintakriteereinä olivat vaikutukset ilmastomuutoksen hillintään sekä sopeutumiseen ja varautumiseen. Lisäksi valinnassa huomioitiin, että ilmastotiekartan jokainen teema-alue ja kaikki mukana olevat YK:n kestävän kehityksen tavoitteet tulevat katetuiksi.

Keskinäisriippuvuuksien arviointiin osallistui yhteensä 26 asiantuntijaa kymmenestä eri organisaatiosta. He arvioivat ensin toimenpiteet edellä mainittujen valintakriteerien perusteella. Keskinäisriippuvuudet arvioitiin seuraavasti: ensin arvioitiin kunkin yksittäisen toimenpiteen positiivisten ja negatiivisten vuorovaikutusten suuruus erikseen; seuraavaksi kohdennettiin toimenpiteiden väliset sekä positiiviset että negatiiviset vuorovaikutukset. Näin kerätty data muutettiin portfoliolaskennan edellyttämän vuorovaikutusmatriisin muotoon kuhunkin matriisin soluun liittyvien vuorovaikutusten suuruuksien ja kohdentumisten mukaisesti. Menettelytapa voi lisätä mallin tulosten epätarkkuutta, siksi toteutimme vuorovaikutusten voimakkuuden herkkyysanalyysin.

Hyödynsimme laskennassa portfolio päätösanalyysiä. Sen avulla laskettiin tehokkaita portfolioita, eli toimenpiteiden yhdistelmiä, olettaen, että vain tietty määrä toimenpiteitä voidaan toteuttaa, esimerkiksi kymmenen toimenpidettä kahdestakymmenestä. Valintakriteerien lisäksi portfolioon sisältyvien toimenpiteiden väliset vuorovaikutukset otettiin huomioon portfolion tehokkuudessa. Tuloksena oli tieto siitä, mitkä toimenpiteet sisältyvät useimmin tehokkaaseen portfolioon erilaisilla kriteerien painoarvoilla. Teimme tarkastelun eri toimenpidemäärille (5, 10, 15) sekä vaihtelemalla intensiteettiä, jolla keskinäisriippuvuudet otetaan huomioon. Tarkastelu havainnollisti sitä, millä toimenpiteistä on eniten synergioita ja toisiaan heikentäviä vaikutuksia muiden toimenpiteiden kanssa.

Kävimme tuloksista laajan keskustelun ilmastotiekarttatyön ohjausryhmän kanssa. Tärkeimmät ilmastotiekarttaa koskevat havainnot päättäjien keskuudessa olivat seuraavat: Ensinnäkin tuoreiden tutkimustulosten hyödyntäminen toimenpiteitä toteutettaessa parantaa tuloksellisuutta; toiseksi ilmastomuutoksen hillintään tähtääviä toimia toteutettaessa tulee ottaa huomioon myös ilmastomuutokseen sopeutumisen ja varautumisen toimenpiteitä sekä niiden välisiä synergioita; kolmanneksi negatiivisten vaikutusten vähentämiseksi on tärkeää tunnistaa sekä muille toimenpiteille että muille ihmisryhmille mahdollisesti kohdistuvia haittoja.

Palautteen perusteella totesimme tarkastelun tuoneen lisäarvoa ilmastotiekarttatyöhön. Tarkastelu auttoi ymmärtämään toimenpiteiden välisiä synergioita ja myös mahdollisia haittoja, joita toimenpiteet voivat aiheuttaa toisilleen. Tämän odotetaan parantavan ilmastotiekartan toteutusvaiheen vaikuttavuutta. Haasteena toimenpiteiden vaikutusten arvioinnissa oli kuitenkin ilmastotiekartan toimenpiteiden laaja-alaisuus ja epämääräisyys; osa toimenpiteistä on pikemminkin yleisluontoisia tavoitteita kuin konkreettisia toimenpiteitä.

Liitteessä 2 on lisätietoa Pohjois-Savon alueellisen ilmastoturvallisuuden tilannekuvasta.



Kuva: Mika Marttunen

8.4 Miten eri toimijat voivat hyödyntää tuloksia?

- Kehittämämme lähestymistapaa hyödyntämällä voidaan edistää ilmastotiekarttatyön keskinäisriippuvuuksien määrittämistä ja arviointia kokonaiskestävyyden parantamiseksi.

- Kaksivaiheista lähestymistapaa ja tietokortteja voidaan hyödyntää valuma-aluesuunnittelussa erilaisten maa- ja metsätalouden kokonaiskestävyyttä parantavien toimenpiteiden tunnistamisessa ja alueellisessa kohdentamisessa.
- Julkaisemiamme tietotuotteita, kuten ilmastoturvallisuus-osaajakoulutus, maaperä ilmastomuutokseen sopeutumisessa ja metsätalouden varautuminen ilmastoriskeihin -opas, voidaan hyödyntää ilmastoriskeihin varautumisessa.

8.5 Toimintasuositukset

- Suunnittelussa kannattaa etsiä toimenpiteitä, jotka edistävät samanaikaisesti sekä ilmastomuutokseen sopeutumista että hillintää ja/tai maa- että metsätalouden kokonaiskestävyyttä.
- Valuma-aluesuunnittelun tueksi on viime vuosina tuotettu valtavasti erilaista paikkatietoa, työkaluja ja laskureita. Aihepiiriin liittyykin merkittävää koulutustarvetta, jonka kohderyhminä ovat mm. maa- ja metsätalouden etu- ja neuvontajärjestöt, suunnitteluorganisaatiot, ojitussyhteisöt, ojitusisännät ja opiskelijat ammatillisissa oppilaitoksissa ja korkeakouluissa. Tulisikin huolehtia, että koulutustarjontaa on riittävästi ja kattavasti saatavilla.
- On tärkeää, että uudet suunnitteluvälineet integroituvat ja täydentävät jo olemassa olevia suunnitteluvälineitä. Tulevaisuudessa on erityisen tärkeää varmistaa, että ehdotettu lähestymistapa tukee parhaalla mahdollisella tavalla metkan suometsien hoitosuunnitelmien laadintaa ja CAP27:n mukaista tilakohtaista toimenpiteiden suunnittelua.
- Ilmastotiekarttatyössä kannattaa panostaa myös keskinäisriippuvuuksien määrittämiseen ja arviointiin. Kehittämämme lähestymistapa tarjoaa siihen toteutettavissa olevan menettelytavan.
- Ilmastomuutoksen hillinnän ja sopeutumisen toimenpiteitä kannattaa tarkastella yhdessä sidosryhmien kanssa. Tuoreen tutkimustiedon hyödyntäminen toimenpiteitä toteutettaessa lisää myönteisiä vaikutuksia.
- Negatiivisia vaikutuksia arvioitaessa kannattaa huomioida erikseen muille toimenpiteille aiheutettu haitta ("Do not harm"-periaate) ja muille ihmisryhmille aiheutettu haitta ("No one is left behind"-periaate).
- Perimmäiset tavoitteet eivät yksistään ole riittävä tieto innovointityön pohjaksi. Hankkeessa testatut menetelmät auttoivat määrittämään menestystekijöitä ja jopa tuoteominaisuuksia, mutta tarvitaan tarkemmin määritelty konteksti. Tuotespesifikaatioiden innovointi edellyttää monialaisen asiantuntijatiimin osallistumista.

9 Yhteenveto

Mika Marttunen

9 Yhteenveto

Tuimme SysteemiHiili-hankkeessa maankäyttösektorin kasvihuonekaasupäästöjen vähentämistä ja hiilinielujen ja -varastojen vahvistamista tuottamalla uutta tietoa ja työkaluja eri tasojen ilmastotyön tueksi. Maankäytön vesistö- ja ilmastovaikutuksia hillitsevät toimenpiteet olivat työmme keskiössä, mutta lähestymistapamme huomioivat kokonaiskestävyyden. Samalla edistimme vaikuttavaa vuoropuhelua tutkijoiden ja sidosryhmien välillä.

9.1 Hiilitasetarkastelut maa-alueilla ja vesistöissä

SysteemiHiili-hankkeen tuloksia voidaan hyödyntää valuma-alue-, maakunta- ja valtakunnallisen tason kokonaiskestävässä maankäytön suunnittelussa (Kuva 19). Tuotimme ilmastosuunnittelutyön tueksi tietoa eri maankäyttöluokkien kasvihuonekaasutaseiden nykytilasta maakunnittain. Tulokset osoittavat, että metsät ovat ainoa merkittävä ilmakehän hiilidioksidin sitoja, mutta niiden merkitys on heikentynyt viimeaikaisten hakkuiden vuoksi. Metsien käsittelyssä on otettava huomioon hiilivarastojen ja hiilensidonnan säilyttäminen varovaisuusperiaatetta noudattaen, koska tulevaisuuden ennusteissa on epävarmuutta. Vanhojen metsien hiilitaselaskelmat hyödyttävät suojelualueiden samanaikaisessa luonto- ja ilmastohyötyjen arvioinnissa. Kehitimme myös paikkatietoperustaisen lähestymistavan alueellisen metsäsuunnittelun tueksi. Se auttaa metsähakkuiden kohdentamisessa siten, että niillä olisi mahdollisimman vähän haitallisia vaikutuksia vesistöihin, monimuotoisuuteen, ilmastoon ja vesistöjen virkistyskäyttöön.



Kuva 19. SysteemiHiili-hankkeen suunnittelutasot (laatikot vasemmalla) ja keskeiset tulokset (laatikot oikealla).

Arvioimme Suomen pintavesien, purojen, jokien, järvien ja rannikkovesien, tummumiskehitystä tilastollisilla menetelmillä hyödyntäen kaikkea käyttökelpoista havaintoaineistoa. Tulosten perusteella orgaanisen hiilen pitoisuus vesistöissä kasvoi Lappia lukuun ottamatta jaksolla 1990–2020 lähes 70 %:ssa kohteissa. Eniten pitoisuuksien kasvuun vaikuttivat ilmastonmuutos (mitattu lämpötilan ja valunnan nousu), ojitusten osuus sekä metsien ja turvemaiden osuus valuma-alueilla.

Hankkeessa kehitetyllä VemalaTOC -mallilla ja PREBAS-mallilla tehdyt maankäyttö- ja ilmastoskenaariotarkastelut Kiurujoen valuma-alueella viittaavat siihen, että pintavesien tummumiskehitys jatkuu tulevaisuudessa, ellei orgaanisen hiilen (TOC) kuormitusta turvemailta saada alennettua merkittävästi. Tulosten perusteella ilmastonmuutos (lämpötilan muutos, sademäärä) lisää orgaanisen hiilen kuormitusta maaperästä. Myös puiden kasvun lisääntyminen ja neulasten putoaminen maaperään vaikuttaa hieman orgaanisen hiilen kuormitukseen. Suurin vaikutus orgaanisen hiilen kuormitukseen on ojitetun turvemaan hoidon muutoksilla.

Tulostemme perusteella hiilen virroilla vesistössä on merkittävä vaikutus kansallisessa hiilitaseessa. Maa- ja vesialueiden sekä ilmaston väliset hiilikierrot tulisikin ottaa entistä paremmin huomioon tarkasteluissa. Tätä voidaan edesauttaa jatkamalla VEMALA-TOC mallin kehitystyötä siten, että mallilla voidaan kuvata myös epäorgaanisen hiilen prosesseja niin valuma-alueilla kuin vesistöissä.

Mallinnuksen, uusien aineistojen ja olemassa olevan tiedon koonnin pohjalta saimme vahvistusta sille, että turvemaiden metsien hoidossa on tarvetta systeemiselle kokonaisvaltaiselle muutokselle niin vesistö- kuin ilmastohaittojen hillitsemiseksi. Samat toimenpiteet auttavat maa- ja metsätalouden sopeutumisessa ilmastonmuutokseen, esimerkiksi tulviin, kuivuuteen, huoltovarmuuteen ja monimuotoisuuteen liittyvissä haasteissa.

9.2 Turvetuotantoalueiden jatkokäyttöä koskevat arvioinnit

Teimme tieteelliseen kirjallisuuteen pohjautuvan maailmalaajuisesti ensimmäisen katsauksen entisten turvetuotantoalueiden jatkokäyttömuotojen vaikutuksista. Tutkimus osoitti, että tieto turvetuotannon jatkokäyttömuotojen pitkäaikaisista vaikutuksista on monin tavoin puutteellista.

Kehitimme ja sovelsimme menetelmiä turvetuotantoalueiden jatkokäyttömuotojen valinnan ja kokonaiskestävyyden arvioinnin tueksi kahdessa pilottikohteessa. Tavoitelähtöinen ja moniarvoinen lähestymistapamme tarjoaa järjestelmällisen ja sidosryhmien välistä vuoropuhelua edistävän lähestymistavan erityisesti vaativimpiin suunnittelukohteisiin. Kehittämällämme nettipohjaisella päätöstukityökalulla voidaan tukea erityyppisille alueille parhaiten soveltuvien jatkokäyttömuotojen valintaa.

Turvetuotantoalueiden aktiiviset ennallistamistoimet nopeuttavat alueiden kasvittumista sekä vähentävät kasvihuonekaasupäästöjä ja negatiivisia vaikutuksia alapuolisiin vesistöihin. Lisäksi aurinko- ja tuulivoiman tuotanto ovat mahdollisia jatkokäyttömuotoja, jos alueen annetaan samalla kasvittua ja vettyä. Vesiensuojelurakenteet turvetuotannon ja jatkokäytön aikana tulisi pitää ennallaan jatkokäytön alkuvaiheeseen saakka. Tämä antaa mahdollisuuden joustavaan päätöksentekoon jatkokäytön suhteen ja samalla vähentää vesistön kuormitusta jatkokäytön alkuvaiheessa, jolloin mahdollisesti tarvitaan maanmuokkausta.

9.3 Maankäyttösektorin ilmastotoimenpiteiden hyväksyttävyys

Tutkimme ilmastotoimien ja niihin keskittyvien ohjauskeinojen sosiaalista hyväksyttävyyttä turvealalla sekä maa- ja metsätaloudessa menetelminä teemahaastattelut ja kaksi nettikyselyä. Tapaustudkimusten kohteena olivat turvemaiden jatkokäyttömuodot sekä maa- ja metsätalouden ilmastotoimenpiteet maanomistajien näkökulmasta.

Tulostemme perusteella maa- ja metsätilalliset ovat kiinnostuneita edistämään ilmastotoimia, mutta eivät hinnalla millä hyvänsä. Maanomistajat arvioivat toimenpiteiden mielekkyyttä etupäässä niiden tuomien taloudellisten hyötyjen näkökulmasta. Haastattelu- ja kyselytutkimuksen valossa taloudelliset tuet ovat merkittävien maanomistajien toimintaan vaikuttava ohjauskeino. Kysely- ja haastattelututkimuksemme osoittaa, että maa- ja metsätilallisille tulisi tarjota tiedon lisäksi taloudellisia kannustimia maankäytön sopeuttamiseksi hiilineutraalius-, vesistö- ja monimuotoisuustavoitteisiin. Maankäyttöä koskevassa politiikassa tulee tähdätä ennakoitavuuteen, johdonmukaisuuteen ja toimien oikea-aikaisuuteen.

Ohjauskeinojen suunnittelussa on olennaista huomioida niiden hyväksyttävyys. Lisäksi on tärkeää ottaa huomioon riittävät korvaukset, taloudelliset kannustimet ja omaisuuden suojan kunnioittaminen. Maanomistajien kyselyssä korostui erityisesti omaisuuden suojan tärkeys, mikä tarkoittaa, että ohjauskeinot olisi pyrittävä suunnittelemaan niin, että ne rajoittavat maanomistajan valinnanvapautta mahdollisimman vähän.

9.4 Lähestymistavat valuma-alue suunnittelun ja ilmastokarttatyön tueksi

Kehitimme kaksivaiheisen ja monipuolisiin paikkatietoaineistoihin pohjautuvan järjestelmällisen lähestymistavan vesienhallinta- ja ilmastokestävyydestä tarkasteluihin. Ensimmäisessä vaiheessa tunnistetaan tarkasteltavalla laajalla valuma-alueella ne osavaluma-alueet, joilla vesistökuormitus, kasvihuonekaasujen vähentämispotentiaali, ilmastomuutokseen sopeutumisen potentiaali ja luonnon monimuotoisuus ovat suurimmat. Seuraavassa vaiheessa valitulla osavaluma-alueella tiiviissä vuoropuhelussa maanomistajien kanssa etsitään keinoja ilmasto- ja kestävyyshaasteiden ratkaisemiseksi hyödyntäen paikkatietotarkasteluja ja erilaisia laskentatyökaluja. Lähestymistapa pyrkii tukemaan tila- ja sektorirajat ylittävää yleissuunnittelutasoista valuma-alue suunnittelua sekä tuottamaan tietoa metsätalouden kannustejärjestelmän (metka) ja Euroopan unionin yhteisen maatalouspolitiikan (CAP27) mukaisten toimenpiteiden suunnitteluun. Lähestymistavan kehittämistä on tarkoitus jatkaa muissa hankkeissa.

Osana Pohjois-Savon ilmastotiekarttatyötä ja Suomen Akatemian Portright-hanketta kehitettiin lähestymistapa, joka tukee toteutettavien toimenpiteiden valintaa, kun näiden väliset keskinäisriippuvuudet eli synergiat ja mahdolliset toisiaan heikentävät vaikutukset halutaan ottaa huomioon. Haasteena näiden mallintamisessa on riippuvuuksien suuri määrä erityisesti ilmastoasioissa, jossa ongelmien ratkaisut sisältävät tyypillisesti kymmeniä mahdollisia toimenpiteitä, jolloin näiden välillä voi olla satoja mahdollisia erilaisia riippuvuuksia. Kehittämämme menetelmä mahdollistaa keskinäisriippuvuuksien analyyttisen arvioinnin kohtuullisella työmäärällä.

9.5 Jatkotutkimusta ja valuma-aluesuunnittelun kehittämistä koskevat suositukset

SysteemiHiili-hanke oli laaja-alainen ja moniulotteinen hanke, joka tuotti merkittävän määrän uutta tutkimustietoa, parannettuja laskentamalleja ja innovatiivisia lähestymistapoja maankäyttösektorin toimenpiteiden kokonaiskestävyyden arviointiin. Samanaikaisesti hankkeessa tunnistettiin tietopuutteita ja menetelmien kehittämistarpeita, joihin tulevissa hankkeissa tulisi paneutua. Tärkeimmät suosituksemme jatkotyötä varten ovat seuraavat:

- Vanhojen metsien hiilenkierron tutkimusta ja suojelusuunnitelmien ilmastohyötyjen arviointia tulisi jatkaa.
- Kansallisen hiilitasetarkastelun tarkentaminen ja luotettavuuden parantaminen tutkimalla tarkemmin vesistöihin päätyvän hiilen määrää sekä sen sedimentoitumista, vapautumista ilmakehään ja kulkeutumista alapuolisiin vesistöihin.
- Viestintää mallinnetun ja mitatun tiedon epävarmuudesta tulisi kehittää – kuinka tutkijat ja päätöksentekijät ymmärtävät sen ja mikä on hyvä tapa viestiä epävarmuudesta osana luotettavaa ja laadukasta tutkimusta.
- Alueellisen kokonaiskestävän metsäsuunnittelun tueksi tulisi selvittää hankkeessa kehitetyn monitavoitearvioinnin ja PREBAS-mallin yhdistävän lähestymistavan soveltuminen alueelliseen suunnitteluun. Monitavoitearvioinnilla tunnistettiin herkäät kohteet valuma-alueella ja sen jälkeen PREBAS-mallilla laskettiin erilaisia hakkuumäärävaihtoehtoja siten, että niillä olisi mahdollisimman vähän haitallisia vaikutuksia vesistöihin, monimuotoisuuteen, ilmastoon ja virkistyskäyttöön.
- VEMALA-TOC- mallin kehitystyön yhteydessä tunnistetut kehittämistarpeet:
 - Epäorgaanisen hiilen (TIC) kuormituslaskennan lisääminen malliin sekä järvien TIC- ja TOC-prosessien kytkeminen järvien CO₂-päästösimulaatioita varten. Ilman tätä kehitystyötä järvistä vapautuvan hiilidioksidin määrää ei voida mallintaa luotettavasti.
 - Pohjavedenpinnan tarkempi mallintaminen turvealueilla. Pohjavedentasolla on ratkaiseva merkitys TOC:n huuhtoutumiseen sekä turvemaiden kasvihuonekaasupäästöihin.
- VEMALA-TOC-mallia kannattaisi soveltaa kaikilla Suomen vesistöalueilla, sillä se auttaisi hahmottamaan TOC-kuormituksen lähteiden alueellisen jakautumisen ja mahdollisesti soveltuisi yhdistettyyn skenaarioanalyysiin.
- Turvemaiden metsätalouden vaikutuksia maa- ja vesielinympäristöjen monimuotoisuuteen, hiilitaseeseen ja ekosysteemipalveluihin tulisi seurata kokonaisvaltaisesti vesistö- ja valuma-alueilla.
- Valuma-alueen vesienhallinta- ja ilmastotarkastelut -lähestymistavan testaaminen sekä laajoilla valuma-alueilla että suppeammilla osavaluma-alueilla sidosryhmäkeskustelujen ja maanomistajien kanssa käytävien keskustelujen tukena. Lähestymistavan jatkokehitetään palautteen perusteella.
- Hankkeessa kehitettyjen systeemianalyttisten menetelmien hyödyntäminen laajoissa ja monimutkaisissa valuma-alue-tarkasteluissa etsittäessä ratkaisuja, jotka ovat ympäristön, talouden ja sosiaalisten vaikutusten kannalta hyväksyttäviä.

9.6 Toimintasuositukset

Hankkeessa tunnistettiin yli 30 kappaletta toimintasuosituksia, jotka kohdentuvat viranomaisille (ministeriöt, ELY-keskukset, maakunnat ja kunnat), etu- ja neuvontajärjestöille, suunnittelijoille, maanomistajille, oppilaitoksille ja tutkimuslaitoksille. Yhteenveto keskeisistä toimintasuosituksista on taulukossa 8.

Hankkeen tulosten vaikuttavuus riippuu lopulta sitä, kuinka hyvin hankkeessa tuotettu tieto tavoittaa kohderyhmät ja missä määrin hankkeessa kehitettyjä menetelmiä otetaan käyttöön. SysteemiHiili-hankkeen tuloksista on viestitty monilla kanavilla hankkeen aikana ja viestintä jatkuu tehostetusti jatkohankkeessa HiiliVie. Uskomme, että hankkeen tulokset ja kehitetyt työkalut sekä toimintatavat auttavat hiilineutraaliustavoitteiden saavuttamisessa niin kansallisella kuin paikallisella tasolla.

Taulukko 8. Hankkeen keskeiset toimentasuositukset ja vastuutahot

Aihepiiri	Toimentasuositus	Ministeriöt	Maa- kuntien liitot	ELY- keskukset	Suunnittelu- organisaat iot	Neu- vonta- järjestöt	Maan- omistajat	Oppi- laitokset	Tutkimus
Hiilivirrat maaeko- systeemeissä	Valtion hiilineutraaliustavoitteen saavuttaminen edellyttäisi hakkuiden vähentämistä nykytasosta. Metsien suojelutasoa tulisi nostaa kansallisen Luontopaneelin asettaman tavoitteen mukaisesti 10 prosenttia maakunnallisesti.	x	x	x			x		
	Metsien kasvihuonekaasutasearvioiden epävarmuudet tulee huomioida metsiin liittyviä päätöksiä tehtäessä.	x	x	x					
	Metsien käsittelyssä on huomioitava metsien hiilivarastojen ja hiilensidonnän säilyminen riittävänä varovaisuusperiaatteen mukaisesti huomioiden tiedon ja ennusteiden epävarmuus.				x	x	x		
	Maa- ja metsätalouden valuma-alueitasoista vesi- ja ilmastotarkastelutapaa tulisi kehittää edelleen sekä soveltaa erilaisissa toimintaympäristöissä.		x	x	x				
Vesien tummuminen	Kansallisissa hiilitasetarkasteluissa tulisi ottaa huomioon pintavesien merkittävä rooli hiilinieluina ja hiilen lähteinä ilmakehään.	x							x
	Suometsien hoidossa on tarvetta systeemisellemuutokselle. Tavoitteena tulee olla ennaltaehkäistä kuorituksen syntymistä jo valuma-alueiden latvoilla, ennen kuorituksen päätymistä alapuolisiin vesistöihin ja edelleen rannikkovesiin asti.	x		x	x	x	x	x	x
	Vesien tummuminen tulisi ottaa paremmin huomioon vesien ekologisen tilan arvioinnissa.	x		x					x
	Lisätään ojitusten tarveharkintaa ja vähennetään ojitussyvyys.				x	x	x	x	
	Siirrytään jatkuvapeitteiseen metsänkasvatukseen kohteissa, missä se on mahdollista.				x	x	x		
	Varmistetaan riittävät ja optimoidut suoja- vyöhykkeet vesien varsilla.				x	x	x	x	

Aihepiiri	Toimintasuositus	Ministeriöt	Maa- kuntien liitot	ELY- keskukset	Suunnittelu- organisaat- iot	Neu- vonta- järjestöt	Maan- omistajat	Oppi- laitokset	Tutkimus
	Parannetaan valuma-alueiden vedenpidätys- kykyä ennallistamalla ojitettuja soita ja patoamalla ojia.				x	x	x		
	Edistetään toimenpiteitä, jotka samanaikaisesti tukevat ilmastonmuutokseen sopeutumista ja sen hillintää sekä maatalouden ja metsä- talouden kokonaiskestävyyttä.	x	x	x	x	x	x	x	x
Valuma- alue- suunnittelun uudet menetelmät	Hyödynnetään hankkeessa kehitettyjä systeemi- analyttisiä menetelmiä ja päätöstukityökaluja valuma-aluesuunnittelussa ja turvetuotanto- alueiden jatkokäytön suunnittelussa. Menetelmillä edistetään kokonaisvaltaisia vaikutustarkasteluja ja monihyötyisten toimenpiteiden tunnistamista yhteistyössä sidosryhmien kanssa.		x	x					x
	Järjestetään koulutustilaisuuksia maa- ja metsä- talouden ammattilaisille. Esitellään tutkimus- tuloksia toimenpiteiden kokonaisvaikutuksista ja valuma-alueiden suunnittelumenetelmistä. Tarjotaan opetusaineistoa korkeakouluille ja ammattillisille oppilaitoksille.					x		x	x
	Kehitetään vesienhallinta- ja ilmastotarkasteluja tukemaan metsätalouden kannustejärjestelmän (metka) suometsien hoitosuunnitelmien laatimista ja EU:n yhteisen maatalouspolitiikan mukaista tilakohtaista toimenpiteiden suunnittelua.			x		x			x
	Sidosryhmien osallistuminen suunnitteluun on keskeistä monipuolisten näkökulmien ja paikallistiedon keräämiseksi. Eri toimijoiden tavoitteiden tunnistaminen on tärkeää, sillä ne ohjaavat päätöksentekoa.			x	x				

Aihepiiri	Toimintasuositus	Ministeriöt	Maa- kuntien liitot	ELY- keskukset	Suunnittelu- organisaat- iot	Neu- vonta-jär- jestöt	Maan- omistajat	Oppi- laitokset	Tutkimus
Turve- tuotanto- alueiden jatkokäyttö	Turvetuotantoalueiden jatkokäytön suunnittelu tulee integroida muuhun valuma-alue-suunnitteluun.	x	x	x	x	x	x		
	Turvetuotannon jatkokäytössä suositeltavia jatkokäyttömuotoja ovat etenkin ennallistaminen suoksi, kosteikkojen rakentaminen ja kuivemmillä alueilla metsitys.	x	x	x	x	x	x		
	Turvetuotannon ja jälkihoidon aikaiset vesiensuojelurakenteet on tarpeen säilyttää jatkokäyttövaiheen alkuun asti.	x		x		x	x		
Alueellinen ilmasto- toimen- piteiden kokonais- suunnittelu	Edistetään alueellista yhteistyötä maankäytön suunnittelussa ilmasto- ja vesiensuojelutavoitteiden saavuttamiseksi.		x	x	x				
	Huomioidaan ilmastotiekarttojen suunnittelussa toimenpiteiden keskinäisriippuvuudet.		x	x	x				
	Tarkastellaan ilmastotiekartan suunnittelussa ilmastonmuutoksen hillintää ja sopeutumista, huoltovarmuutta sekä kokonaiskestävyyttä.		x	x	x				
	Huomioidaan negatiivisia vaikutuksia arvioitaessa muille tavoitteille ja toimenpiteille aiheutettu haitta sekä muille ihmisryhmille aiheutettu haitta.		x	x	x				
Politiikka- suositukset maan- käyttö- sektorille	On välttämätöntä, että maa- ja metsätilat saavat ilmasto- ja ympäristötoimenpiteistä taloudellista hyötyä säästöinä, tuloina tai tukina.	x		x	x	x	x		
	Suositaan ilmastotoimenpiteiden suunnittelussa ja niiden rahoituksessa toimenpiteitä, joilla on taloudellisia hyötyjä ja paikallisia vaikutuksia esimerkiksi vesistöjen tilaan.	x		x	x	x	x		
	Parannetaan ennakoitavuutta, johdonmukaisuutta ja oikea-aikaisuutta ilmasto-toimien, ohjauskeinojen, rahoituksen ja neuvonnan suunnittelussa.	x		x		x			

9.7 SysteemiHiili-hankkeen julkaisut

Tieteelliset julkaisut:

- Albrecht, E., Hannonen, O., Palacín-Lizarbe, C., Suni, J., Härkönen, L. H., Soininen, N., Kukkonen, J. & Vainikka, A. 2023. Browning of boreal lakes: Do public perceptions and governance align with the biological foundations? *Ecological Applications* 33: e2856. <https://doi.org/10.1002/eap.2856>
- Forsius, M., Holmberg, M., Junttila, V., Kujala, H., Schulz, T., Paunu, V.-V., Savolahti, M., Minunno, F., Akujärvi, A., Bäck, J., Grönroos, J., Heikkinen, R. K., Karvosenoja, N., Mäkelä, A., Mikkonen, N., Pekkonen, M., Rankinen, K. & Virkkala, R. 2023. Modelling the regional potential for reaching carbon neutrality in Finland: Sustainable forestry, energy use and biodiversity protection. *Ambio* 52: 1757–1776. <https://doi.org/10.1007/s13280-023-01860-1>
- Holmberg, M., Junttila, V., Schulz, T., Grönroos, J., Paunu, V.-V., Savolahti, M., Minunno, F., Ojanen, P., Akujärvi, A., Karvosenoja, N., Kortelainen, P., Mäkelä, A., Peltoniemi, M., Petäjä, J., Vanhala, P. & Forsius, M. 2023a. Role of land cover in Finland's greenhouse gas emissions. *Ambio* 52: 1697–1751. <https://doi.org/10.1007/s13280-023-01910-8>
- Härkönen, L. H., Lepistö, A., Sarkkola, S., Kortelainen, P. & Räike. 2023. Reviewing peatland forestry: Implications and mitigation measures for freshwater ecosystem browning. *Forest Ecology and Management* 531: 120776. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.120776>
- Junttila, V., Minunno, F., Peltoniemi, M., Forsius, M., Akujärvi, A., Ojanen, P. & Mäkelä, A. 2023. Quantification of forest carbon flux and stock uncertainties under climate change and their use in regionally explicit decision making: Case study in Finland. *Ambio* 52: 1716–1733. <https://doi.org/10.1007/s13280-023-01906-4>
- Laasasenaho, K., Lauhanen, R., Räsänen, A., Palomäki, A., Viholainen, I., Markkanen, T., Aalto, T., Ojanen, P., Minkkinen, K., Jokelainen, L., Lohila, A., Siira, O.-P., Marttila, H., Pääkkilä, L., Albrecht, E., Kuittinen, S., Pappinen, A., Ekman, E., Kübert, A., Lampimäki, M., Lampilahti, J., Shahriyer, A. H., Tyystjärvi, V., Tuunainen, A.-M., Leino, J., Ronkainen, T., Peltonen, L., Vasander, H., Petäjä, T., Kulmala, M. 2023. After-use of cutover peatland from the perspective of landowners: Future effects on the national greenhouse gas budget in Finland. *Land Use Policy*: 134. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2023.106926>
- Lepistö, A., Räike, A., Sallantausta, T. & Finér, L. 2021. Increases in organic carbon and nitrogen concentrations in boreal forested catchments — Changes driven by climate and deposition. *Science of The Total Environment* 780: 146627. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146627>
- Mustajoki, J., Liesjö, J., Kajanus, M., Eskelinen, T., Karkulahti, S., Kee, T., Kesänen, A., Kettunen, T., Wuorisalo, J., Marttunen, M. (2023). A portfolio decision analysis approach for selecting a subset of interdependent actions: The case of a regional climate roadmap in Finland. Submitted manuscript.
- Mustajoki, J., Turunen, V., Junttila, V., Marttunen, M., Geneletti, D. (2023). Combining Multi-Criteria Decision Analysis, forest growth model and GIS: Case of Forest Planning in Finland. Manuscript.
- Rankinen, K., Junttila, V., Futter, M., Cano Bernal, J. E., Butterfield, D. & Holmberg, M. 2023. Quantification of the effect of environmental changes on the brownification of Lake Kukia in southern Finland. *Ambio* 52: 1834–1846. <https://doi.org/10.1007/s13280-023-01911-7>
- Räsänen, A., Albrecht, E., Annala, M., Aro, L., Laine, A. M., Maanavilja, L., Mustajoki, J., Ronkanen, A.-K., Silvan, N., Tarvainen, O. & Tolvanen, A. 2023a. After-use of peat extraction sites – A systematic review of biodiversity, climate, hydrological and social impacts. *Science of the Total Environment*: 163583. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163583>

Raportit:

- Marttunen, M., Turunen, V., Kajanus, M., Rantala, T., Virkkumaa, S., Seppälä, P., Räsänen, A. 2023. Valuma-alue-tason vesienhallinta- ja ilmastokestävyystarkastelut -synteesi menetelmistä ja ehdotus toimintamalliksi. SysteemiHiili-hankkeen raportti.

Mustajoki, J., Marttunen, M. & Ahopelto, L. 2022. Kirjallisuuskatsaus viitekehyksistä kokonaisvaltaisten ja ilmastoviiisaiden arviointien tekemiseksi. SysteemiHiili-hanke – Työpaketti 4. <https://www.syke.fi/download/name/%7B6262E5D1-99D2-4227-A58F-1C1AB8CFC47D%7D/178008>

Sivonen, M., Albrecht, E., Leino, J. & Peltonen, L. 2023. Ilmastomuutoksen hillintä ja siihen sopeutuminen maanomistajien näkökulmasta – kyselytutkimus Pohjois-Savon maa- ja metsätilanomistajille. Publications of the University of Eastern Finland Reports and Studies in Social Sciences and Business Studies 19. ISBN: 978–952-61-4907-3

Muut julkaisut:

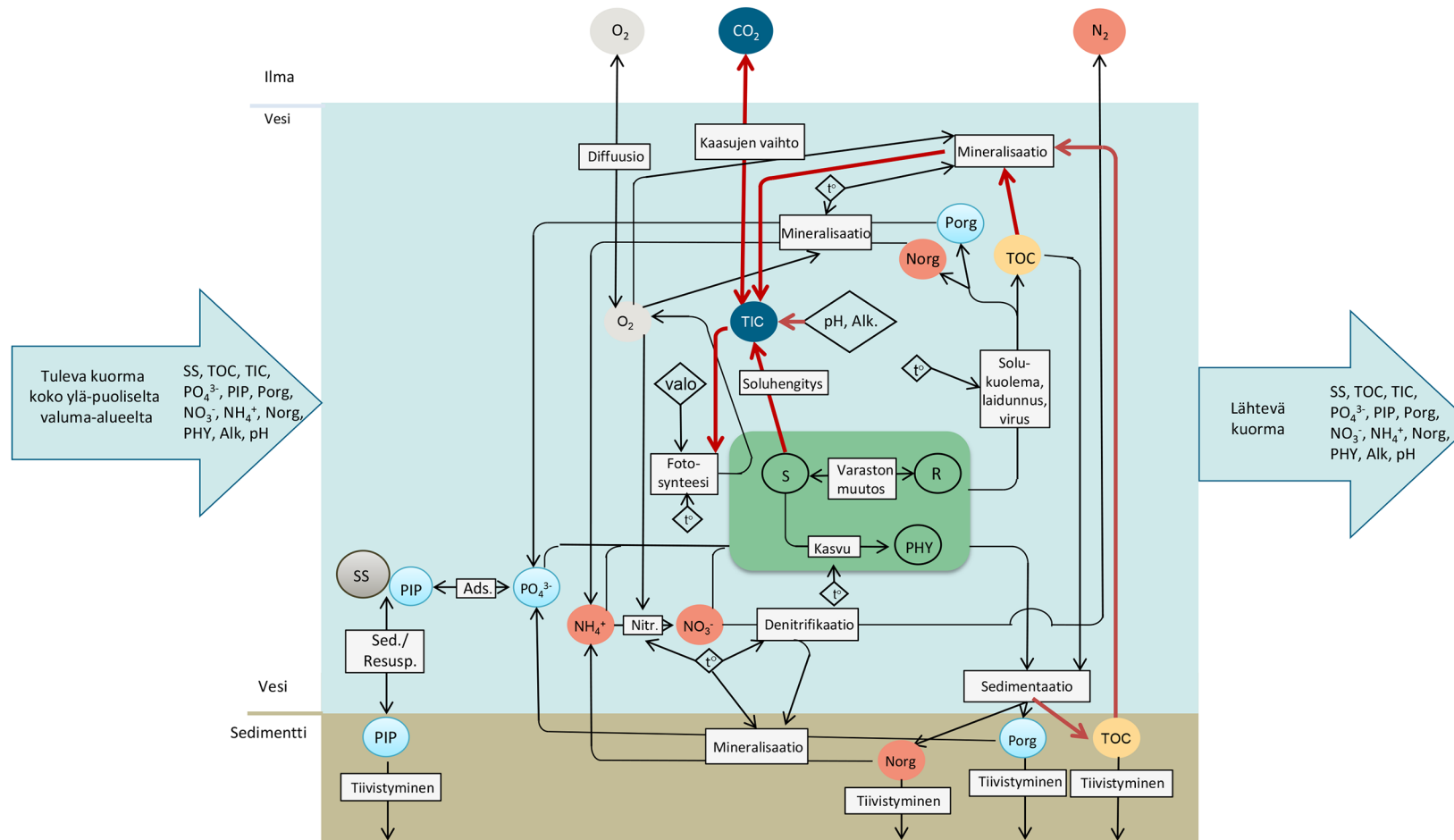
Tietokortit kestävän maa- ja metsätalouden toimenpiteistä vesien suojelemiseksi. <https://vesi.fi/aineistopankki/tietokortit-kestavan-maa-ja-metsatalouden-toimenpiteista-vesien-suojelemiseksi/>

Vesitalous-lehden teemanumero: Hiili vesistöissä (14.10.2022, maksullinen). Sisältää kolme SysteemiHiili-hankkeen tutkijoiden tuottamaa juttua mm. vesistöjen tummumisesta. <https://vesitalous.fi/2022/10/vesitalous-5-2022-on-ilmestynyt/>

Maria Holmberg ja Virpi Junttila: IBC-Carbon -hankkeen, FEO-hankkeen ja SysteemiHiili-hankkeen yhteistyössä tuotettu tietokortti hiilitaseesta. Toukokuu 2022. [https://www.ibccarbon.fi/fi-FI/Tuloksia/Hiilitase_summaa_ilmastovaikutuksia\(63054\)](https://www.ibccarbon.fi/fi-FI/Tuloksia/Hiilitase_summaa_ilmastovaikutuksia(63054))

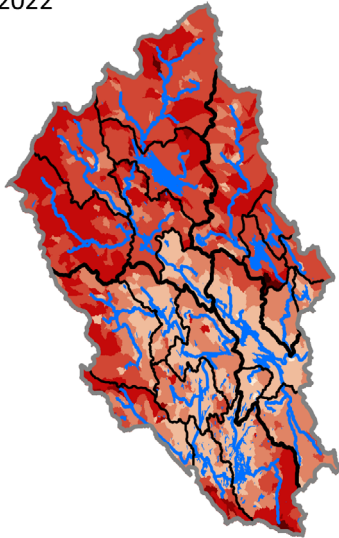
Räsänen, A., Mustajoki, J., Aro, L., Ulvi, T., Annala, M. & Marttunen, M., 2023. Turvetuotantoalueiden jatkokäytön tavoitelähtöinen ja moniarvoinen suunnittelu. Suo 74: 3-26. ISSN 0039-5471

Liite 1. Vemalan biogeokemiallinen mallikaavio ja Kiuruveden valuma-alueen TOC-ominaiskuormitus

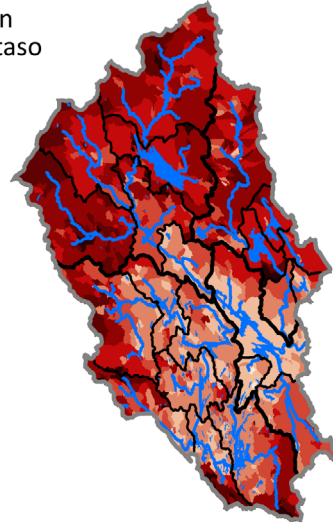


Kuva L1. Vemalan uusi biogeokemiallinen mallikaavio, joka sisältää uutena epäorgaaniset hiiliprosessit. Lyhenteiden selitteet ovat: O_2 = happi, CO_2 = hiilidioksidi, N_2 = typpi, SS = kiintoaine, TOC = orgaaninen kokonaishiili, TIC = epäorgaaninen kokonaishiili, PO_4^{3-} = fosfaatti, PIP = kiinteä epäorgaaninen fosfori, Porg = orgaaninen fosfori, NO_3^- = nitraatti, NH_4^+ = ammonium, Norg = orgaaninen typpi, PHY = kasviplankton, Alk = alkaliniteetti, Ads. = adsorptio, Sed./Resusp. = sedimentaatio/resuspensio, Nitr. = nitrifikaatio, t° = lämpötila.

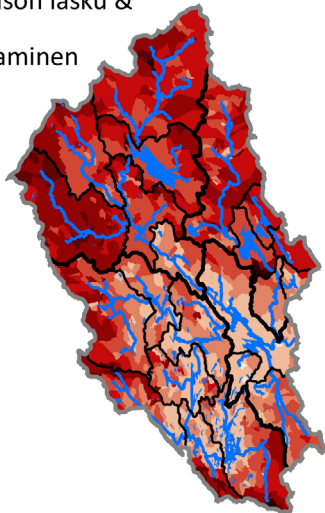
1990 - 2022



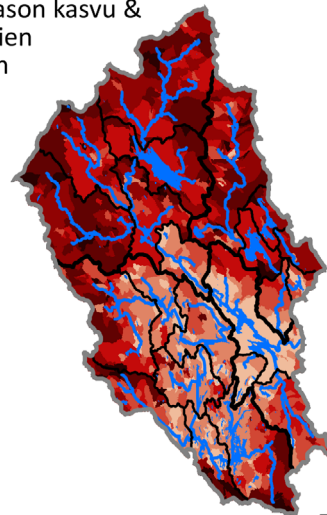
2023 - 2052
nykyinen
hakkuutaso



2023 - 2052
hakkuutason lasku &
soiden
ennallistaminen



2023 - 2052
hakkuutason kasvu &
suometsien
käsittelyn
kasvu

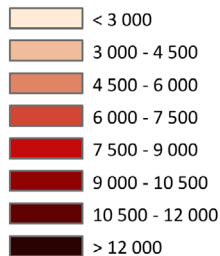


10

Km

Orgaanisen hiilen (TOC) ominaiskuormitus Kiuruveden alueella metsien hakkuun ja soiden ennallistamisen skenaarioissa

TOC ominaiskuormitus (g/km²/v)



Kiuruveden valuma-alue

2. jakovaiheen valuma-alueet

3. jakovaiheen valuma-alueet

järvet

joet

Ilmastoskenaario (kohtalainen):
RCP 4.5 MOHC-HadGEM2-ES
Skenaarioidistelmänä hakkuutaso (nykytila,
lasku, kasvu) ja soiden käsittely (soiden
ennallistaminen, suometsien käsittelyn kasvu)

Tulostettu: 17.11.2023, Maiju Narikka



Kuva L2. TOC ominaiskuormitus Kiuruveden valuma alueella eri skenaarioissa.

Liite 2. Lisätietoja Pohjois-Savon alueellisen turvallisuuden tilannekuvasta

SysteemiHiili-hanke osallistui seuraavien Ilmastoturvallisuuden liiketoimintaverkostot -hankkeen tuotoksiin:

- [Ilmastoturvallisuus-osajakoulutus](#) on tarkoitettu kaikille ilmastomuutokseen varautumisesta ja sopeutumisesta kiinnostuneille, jotka ovat suorittaneet vähintään ammattikorkeakoulutasoisen tutkinnon.
- Savonia ammattikorkeakoulun on julkaissut [Maaperä ilmastomuutokseen sopeutumisessa](#) -oppaan. Sään ääri-ilmiöiden lisäksi suuri merkitys Suomen maataloudelle on myös vähittäisillä muutoksilla, kuten sateiden epätasaisen jakautuminen. Vähittäiset muutokset koskettavat kaikkia maataloja ja toistuvat tiheämpään, ja vaikka satoa ei niissä menetetä kokonaan, voi satotaso jäädä toistuvasti odotuksia pienemmäksi.
- [Metsätalouden varautuminen ilmastoriskeihin](#) -oppaan tarkoituksena on vahvistaa varautumista ja sopeutumista metsätalouden ilmastoriskeihin, erityisesti sään ääri-ilmiöistä johtuviin metsätuhoihin. Oppaassa käsitellään tärkeimpiä toimenpidesuosituksia metsätalouden ilmastoriskien vähentämiseksi sekä luodaan tulevaisuusnäkymiä siitä, miten metsätaloutta on kehitettävä ilmastomuutoksen edetessä.
- Testasimme ja kehitimme innovaatiotoimintaa ja liiketoiminnan spesifikaatioita.
- Suomen ympäristökeskuksen [Vihma-työkalulla](#) arvioidaan pelloilta tuleva ympäristökuormitus. Vihmaa on kehitetty ja päivitetty yli kymmenen vuotta, joten siihen on kertynyt suuri määrä tutkimustietoa. SysteemiHiili-hankkeessa Excel-työkalusta kehitettiin viljelyneuvonnan tarpeisiin soveltuvan web-sovelluksen ensimmäinen versio, joka on vielä testausvaiheessa.
- Savonia Konealan TKI on kehittänyt koneenrakennukseen soveltuvia **tuotekonseptoinnin prosesseja ja menetelmiä** yhteistyössä alueen yritysten kanssa. Konseptointiprosessissa on keskitytty erityisesti asiakastarpeen ymmärtämiseen ja tämän ymmärryksen pohjalta tuot ominaisuuksien määrittelyyn. SysteemiHiili-hankkeessa konseptoinnin lähtötietoina käytettiin kestävään kehitykseen liittyviä strategisia ja fundamenttitason tavoitteita ja arvioidaan konseptointiprosessin toimivuutta.
- Testasimme hankkeessa myös **Kokonaisvaltainen menestystekijäanalyysi -menetelmän** (Comprehensive Success Factor Analysis, CSFA) kokonaiskuvaa laajentavaa ominaisuutta sekä elementtien käyttöä. Kokeen ”Suureksi haasteeksi” valittiin ympäristöystävälliset maanmuokkausmenetelmät. Vaikka CSFA-menetelmää ei käytetty koko laajuudessaan, oli menetelmän avulla mahdollista määritellä merkittävä määrä menestystekijöitä jatkotyöstämistä varten. Lisätietoa menetelmästä on saatavilla julkaisussa Sinfield ym. (2020).

Lähteet

Sinfield, J. V., Ananya S. & Romika, R. K. 2020. Framing the Intractable: Comprehensive Success Factor Analysis for Grand Challenges. Sustainable Futures 2: 100037. <https://doi.org/10.1016/j.sfr.2020.100037>

Valuma-aluesuunnittelulla kohti hiilineutraalia maankäyttöä

SysteemiHiili-hankkeen tulokset

SysteemiHiili-hankkeessa tutkittiin maankäytön hiilipäästöjen vähentämistä ilmakehään ja vesistöihin sekä arvioitiin maa- ja metsätalouden toimenpiteiden ja turvetuotantoalueiden jatkokäyttömuotojen kokonaiskestävyyttä ja hyväksyttävyyttä.

Hankkeen tulokset tarjoavat uutta tietoa Suomen vesien tummumisesta, hiilivirroista maa- ja vesiekosysteemeissä sekä maanomistajien suhtautumisesta ilmastotoimenpiteisiin. Lisäksi hankkeessa kehitetyt mallit ja menetelmät sekä tuotetut aineistot tarjoavat uusia mahdollisuuksia kokonaisvaltaisiin valuma-alue-tarkasteluihin.

Hankkeessa laadittiin 25 toimintasuositusta. Ne koskevat kaikkia maa- ja metsätalouden toimijoita: ministeriöitä, maakuntien liittoja, elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskuksia, neuvontajärjestöjä, suunnitteluorganisaatioita, tutkimuslaitoksia ja maanomistajia.



Suomen ympäristökeskus
Finlands miljöcentral
Finnish Environment Institute

Teemme tiedolla toivoa.

ISBN 978-952-11-5618-2 (PDF)
ISSN 1796-1726 (verkkokj.)