

This is an electronic reprint of the original article.

This reprint *may differ* from the original in pagination and typographic detail.

Author(s): Pasi Talvitie, Aleksi Räsänen & Niko Silvan

Title: Häädetkeitaan ja Kauhanevan allikkorakenteen muutokset vuosina 1947–2017 kaukokartoituksen perusteella

Year: 2023

Version: Published version

Copyright: The Author(s) 2023

Rights: CC BY-SA 4.0

Rights url: <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

Please cite the original version:

Talvitie P., Räsänen A., Silvan N. (2023). Häädetkeitaan ja Kauhanevan allikkorakenteen muutokset vuosina 1947–2017 kaukokartoituksen perusteella. *Suo* 74(1-2): 71-96. Suoseura ry, Helsinki.

All material supplied via *Jukuri* is protected by copyright and other intellectual property rights. Duplication or sale, in electronic or print form, of any part of the repository collections is prohibited. Making electronic or print copies of the material is permitted only for your own personal use or for educational purposes. For other purposes, this article may be used in accordance with the publisher's terms. There may be differences between this version and the publisher's version. You are advised to cite the publisher's version.

↗ Häädetkeitaan ja Kauhanevan allikkorakenteen muutokset vuosina 1947–2017 kaukokartoituksen perusteella

Changes in the open water hollows in Häädetkeidas and Kauhaneva mires during 1947–2017 based on remote sensing

Pasi Talvitie, Alekski Räsänen & Niko Silvan

Pasi Talvitie, Lauhanvuori - Hämeenkanngas Unesco Global Geopark, Alpinkatu 2, 3700 Kankaanpää, e-mail: pasi.talvitie@lhgeopark.fi; Alekski Räsänen, Luonnonvarakeskus (Luke), Paavo Havaksen tie 3, 90570 Oulu, e-mail: aleksi.rasanen@luke.fi; Niko Silvan, Luonnonvarakeskus (Luke), Tekniikankatu 1, 33720 Tampere, e-mail: niko.silvan@luke.fi

Keidassuot ovat Etelä-Suomen yleisin suoyhdistymätyyppi. Ne saavat vetensä ja ravinteensa sateen mukana. Keidassoiden pintaa luonnehtivat kuivat harjanteet, kermi, ja mätät painanteet, kuljut. Ilmaston lämpeneminen vähentää talven lumisuutta ja lisää haihduntaa, minkä on arvioitu laskevan keidassoiden vedenpintaa. Tämä voi aiheuttaa muutoksia keidassoiden ekosysteemissä ja kiihdyttää ilmaston lämpenemistä paikallisesti. Keidassoilla tapahtuvia pitkäaikaismuutoksia on tutkittu kuitenkin verraten vähän.

Tässä työssä tarkastellaan vesipintaisten kuljujen eli allikoiden määrässä 70 vuoden aikana tapahtuneita muutoksia ilma- ja satelliittikuvien avulla. Tutkimuskohteina ovat kaksi Länsi-Suomessa sijaitsevaa keidassuota: Häädetkeidas ja Kauhaneva. Pitkän ajan muutosta seurataan ilmakuvien objektiperusteisen segmentoinnin ja ohjatun suurimman todennäköisyyden luokittelun avulla. Yksittäisen kasvukauden aikaista muutosta tarkastellaan satelliittikuvien ja ohjatun suurimman todennäköisyyden luokittelun avulla. Tuloksia verrataan tarkasteluajanjaksolta kerättyihin säätietoihin.

Tulosten perusteella allikoiden lukumäärä ja pinta-ala ovat vaihdelleen tarkastelujakson aikana. 1940-luvulta 1970-luvulle asti pinta-aloissa ja lukumäärissä on ollut kasvua, minkä jälkeen ne ovat vähentyneet. 1940-luvun tilanteeseen nähden allikoiden lukumäärä on Häädetkeitaalla vähentynyt 13,8 % ja pinta-ala on vähentynyt 14,8 %. Kauhanevalla lukumäärä on vähentynyt 5,3 % ja pinta-ala on vähentynyt 6,3 %. Alueen keskilämpötila on samaan aikaan noussut yli 1 °C. Satelliittikuva-analyysin perusteella vaihtelu voi yksittäisen kasvukauden aikana olla kuitenkin voimakasta, mikä aiheuttaa epävarmuutta pitkän ajan muutoksen tulkintaan.

Tulokset osoittavat, että keidassoilla tapahtuu kaukokartoitusmenetelmin havaittavia pintarakenteen muutoksia, joilla on todennäköisesti kytkös ilmasto-olosuhteiden muutokseen.

Avainsanat: geomorfologia, ilmakuvat, ilmastonmuutos, kaukokartoitus, keidassuot, maximum likelihood, ohjattu luokittelu, PlanetScope

Johdanto

Keidassuot ovat Etelä-Suomessa vallitseva suoyhdistymätyyppi, jonka esiintymisellä on vahva yhteys ilmasto-olosuhteisiin (Solantie 1986). Ruuhijärven (2018) mukaan ilmaston lämpeneminen voi siirtää suokasvillisuusvyöhykkeitä nykyistä pohjoisemmaksi (Kuva 1). Tähän vaikuttavat muun muassa talviaikaisen lumipeitteen väheneminen (Brown & Mote 2009) ja kesäaikaisten kuivuusjaksojen lisääntyminen (Ruuhijärvi 2018).

Keidassoiden eli kohosoiden keskiosa on korkeammalla kuin suon reuna. Aartolahden (1966) mukaan suon korkein kohta kohooa tyypillisesti 0,5–5 m sen alimman kohdan yläpuolelle. Tyypillisessä kohosuossa ombrotrofista keskuskohoumaa eli keskuslaakiota kiertää kalteva reunalujuus, joka on keidassuon kuivin osa (Aartolahti 1966). Se erottaa keidassuon kohollaan olevan osan suon reunaosassa olevasta laiteesta, joka on keidassuon runsasravinteisin osa ja edustaa yleensä lievää minerotrofiaa.

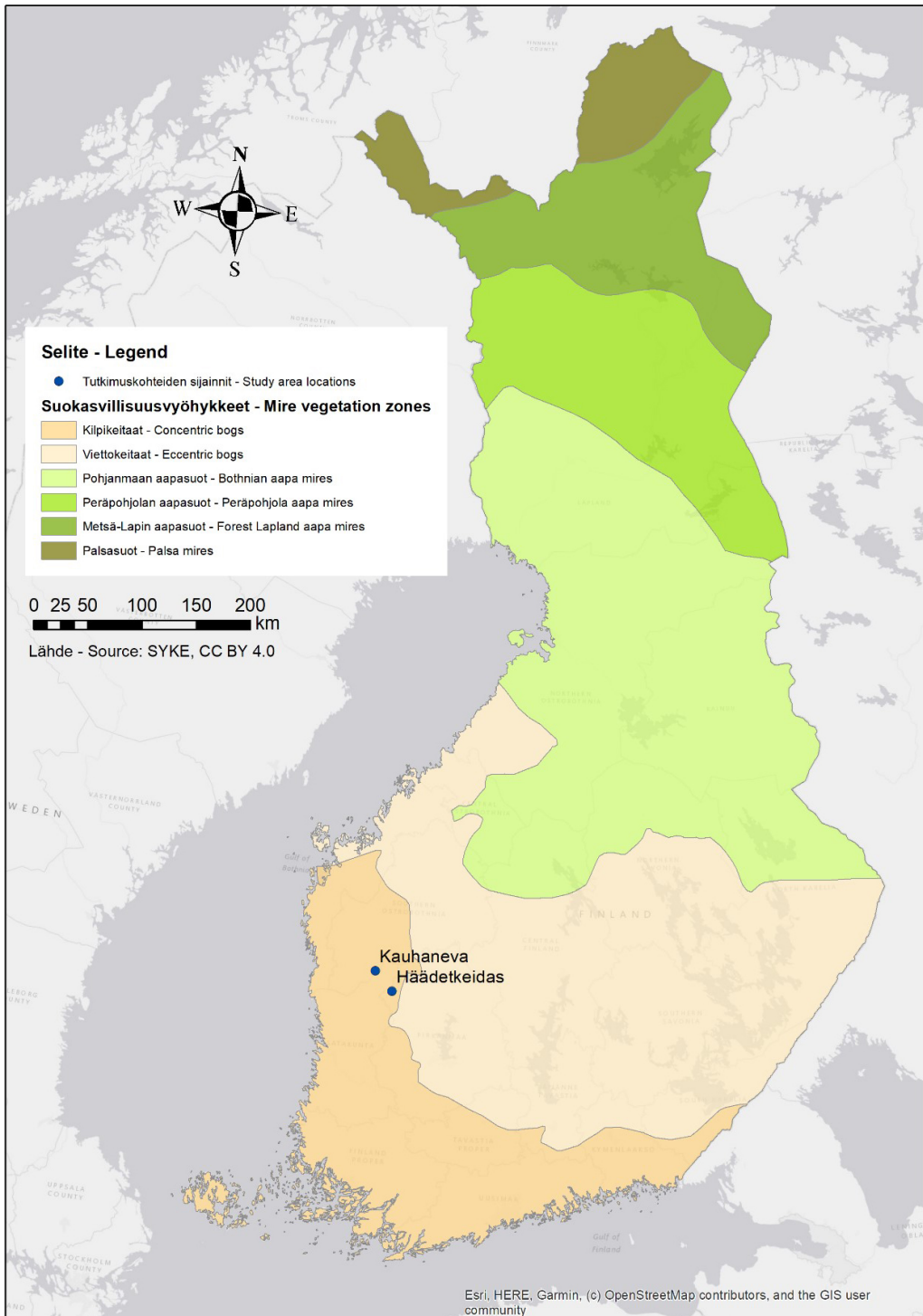
Keidassuon keskuslaakiolla esiintyy pienipiirteistä pinnanmuotojen vaihtelua. Suon keskimääräisestä pinnasta kohollaan olevia turvemättäitä kutsutaan kermeiksi ja vastaavasti sitä alempana olevia painanteita kuljuiksi. Kermi-kulju-mikrotopografia kehittyä selkeimmin soille, joissa pinnan kaltevuus mahdollistaa veden hitaan virtauksen (Rehell ym. 2012). Kermi- ja kuljut muodostuvat kohtisuoraan suon kaltevuutta vasten (Ruuhijärvi & Hosiasluoma 1980). Rakenteen kehittymistä edesauttaa talvella tapahtuva jäätyminen ja lumen ja roudan patoamien sulamisvesien kertyminen painanteisiin (Solantie 1986). Kuljuissa seisova vesi ruokkii välipintojen rakkasammalien kasvua ja samalla voimistaa keidassuon mikrotopografiaa. (Solantie 1986)

Kermien korkeus vaihtelee 15–100 cm välillä, hyvin kehittyneen kermin leveys vaihtelee 4–10 m välillä, ja kermien pituus voi olla jopa 100 m (Aartolahti 1966). Kuljut voivat olla kasvi- tai turvepintaisia. Niissä voi myös esiintyä vesipintaisia allikoita, joiden halkaisija on keskimäärin 20 m ja enimmillään jopa 200–300 m (Seppä 2002). Allikoiden syvyys vaihtelee sekundääristen allikoiden muutamasta kymmenestä sentistä primäärien allikoiden useisiin metreihin (Aario 1932; Seppä 2002).

Tahvanaisen (2011) mukaan suon vesitaseen muutokset voivat suhteellisen lyhyessä ajassa johtaa aapasuon rahkoittumiseen. Keidassoilla vastaava muutos voi olla kuljujen umpeenkasvu ja mätäspintojen määrän lisääntyminen (Solantie 1986; Ruuhijärvi 2018). Allikoiden vedenpinta edustaa keidassuon pohjaveden pinnan tasoa, jonka muutokset näkyvät allikoiden pinta-alan ja lukumäärän muutoksina. Muutokset näkyvät kuivumisena ja umpeenkasvuna sekä allikoiden levittäytymisenä sekundäärisiksi allikoiksi aiemmin kasvi- tai turvepintaisille alueille (Tolonen & Seppä 1994). Allikoiden pohjalla tapahtuvat kaasupurkaukset voivat nostaa turvemassaa allikon pinnalle, jolloin syntyy turvepintainen ruoppakulju. Ruoppakuljuihin voi sopivissa olosuhteissa kehittyä kasvillisuuspinna. Soiden vesipinnoilla tavataan myös vuodenaikaisvaihtelua (Solantie 1986).

Luonnontilaiselta keidassuolta vettä poistuu pääasiassa haihtumalla ja virtaamalla pintavaluntana (Tuominen & Aapala 2001). Keskikesän kuukausina haihdunnan merkitys vesitaseessa korostuu, keväisin ja syksyisin vettä poistuu lähinnä pintavaluntana (Tuominen & Aapala 2001). Roulet ym. (1992) mukaan ilmaston lämpeneminen voi laskea kasvukauden aikaista pohjaveden pintaa soilla. Tämä voisi näkyä avovesipintojen vähenemisenä, kuljujen umpeenkasvuna ja kermipintojen määrän osuuden kasvuna. Kuivuminen altistaa turvekerrostumat ilmalle, jolloin turpeen maatumisen saattaa voimistua (Seppä 2002). Keidassuot eivät ombrotrofisuudestaan johtuen ole aapasoiden tapaan herkkiä suoalueen ympäristössä tapahtuville maankäytön muutoksille, kuten ojituksille (ks. esim. Sallinen ym. 2019).

Soiden pitkäaikaismuutoksia on tutkittu kaukokartoitusmenetelmien avulla. Eri kaukokartoitusaineistoista ilmakuvilla on pisin ajallinen ulottuvuus, sillä systemaattinen maastokartojen tuotantoa varten tehty ilmakuvauus Suomessa aloitettiin jo 1940-luvulla (Maanmittauslaitos 2021). Ilmakuvilla päästään parhaimmillaan noin 0,3 m tarkkuuteen (Maanmittauslaitos 2021). Kuvauvuosien välillä on kuitenkin eroja kuvien laadussa ja ominaisuuksissa. Ilmakuvien kuvausajankohta suhteessa kasvukauden vaiheeseen myös vaihtelee, mikä heikentää kuvien välistä vertailukelpoisuutta (Räsänen 2022).



Kuva 1. Tutkimuskohteiden sijainti ja suokasvillisuusvyöhykkeet Suomessa (SYKE 2015).

Figure 1. The location of the study sites and the areas of mire vegetation zones in Finland (SYKE 2015).

Ilmakuvien lisäksi satelliittikuvat soveltuvat muutoksien seurantaan. Satelliittikuvat tarjoavat vanhoista, usein mustavalkoisista ilmakuvista poiketen mahdollisuuden tarkastella näkyvän valon aallonpituuksien lisäksi myös infrapuna-alueita. Satelliittikuvien ajallinen resoluutio on myös parempi, joten ne sopivat erinomaisesti kasvukauden aikaisten muutosten tulkintaan (Räsänen 2022). Vanhimmat systemaattisesti kerätyt satelliittikuvat ovat 1970-luvulta, jolloin aloitettu Landsat -ohjelma tarjoaa monipuolisen aineiston pitkän ajan muutoksen seurantaan (Wulder ym. 2019). Vanhempien satelliittikuvien spatiaalinen erotuskyky on kuitenkin heikko, joten ne eivät sovellu soiden pintarakenteiden muutosten suoraan havainnointiin. Landsat-satelliittien avulla voidaan kuitenkin tarkastella epäsuorasti soiden kosteusolosuhteiden muutoksia (Kolari ym. 2022; Räsänen ym. 2022). Korkean spatiaalisen tarkkuuden satelliittikuvaa on saatavilla vasta 2000-luvulta (Dissanska ym. 2009).

Soiden pitkäaikaismuutosten tutkimus kaukokartoituksen avulla on painottunut minerotrofisille aapasoille (Tahvanainen 2011; Ervasti 2021; Granlund ym. 2021; Kolari ym. 2022). Niiden ekosysteemi on keidassoita huomattavasti monimuotoisempi, ja ne ovat herkkiä sekä ilmastossa että maankäytössä tapahtuville muutoksille (Ruuhijärvi & Hosiasluoma 1980; Solantie 1986; Seppä 2002; Päivänen 2007). Aapasoilla on keidassoita suurempi muutospotentiaali erityisesti ombrotrofikaation kautta (Tahvanainen 2011; Kolari ym. 2021), kun keidassuota taas voidaan pitää eräänlaisena suon kehityksen kliimaksivaiheena (Seppä 1994). Aapasoiden vähittäisellä kehitymisellä keidassoiden suuntaan sekä keidassoiden mikrotopografian muutoksilla on kuitenkin vahva kytkös paikalliseen ilmastoon (Granlund ym. 2021; Kolari ym. 2021), joten keidassoiden muutoksilla voidaan olettaa olevan merkitystä ilmastossa tapahtuvan muutoksen havainnoinnissa.

Keidassoiden pitkän ajan muutosta on tutkittu ilmakuvien avulla suhteellisen vähän. Tuominen & Aapala (2001) tarkastelivat Hyvinkään Petkelsuon pintarakenteen muutoksia aikavälillä 1936–1997 ilmakuvien ja ohjatun luokittelun avulla. Tolonen & Suoknuuti (2023) puolestaan tutkivat Pyhtään Munasuon pintarakenteen ja kasvillisuuden muutoksia aikavälillä 1941–2022

hyödyntäen ilmakuvia ja maastohavaintoja. Molemmissa tutkimuksissa on havainnointu kermitä-kulju-rakenteessa tapahtuvia muutoksia sekä allikoiden määrän ja pinta-alan muutoksia. Nämä tutkimukset perustuvat kuitenkin visuaaliseen kuvatulkintaan, eivätkä varsinaiseen kvantitatiiviseen analyysiin. Lisäksi edellä mainittujen tutkimusten kohdealueet sijaitsivat tässä tutkimuksessa tarkasteltuja kohteita eteläisemmällä eteläboreaalialla kasvillisuusvyöhykkeellä. Vastaavasti Steenvoorden ym. (2022) tutkivat Irlannissa pitkän ajan muutosta keidassoilla kasvillisuuskarttojen ja dronekuvien perusteella hyödyntäen segmentointia ja random forest -luokittelua. Näissä tutkimuksissa ei kuitenkaan seurattu yhden kasvukauden aikaista muutosta, joka vaikuttaa pitkän ajan muutoksen tulkinnan arvioinnin luotettavuuteen. Lisäksi Tuominen & Aapala (2001) ja Tolonen & Suoknuuti (2023) keskittyivät vain yhteen suohon.

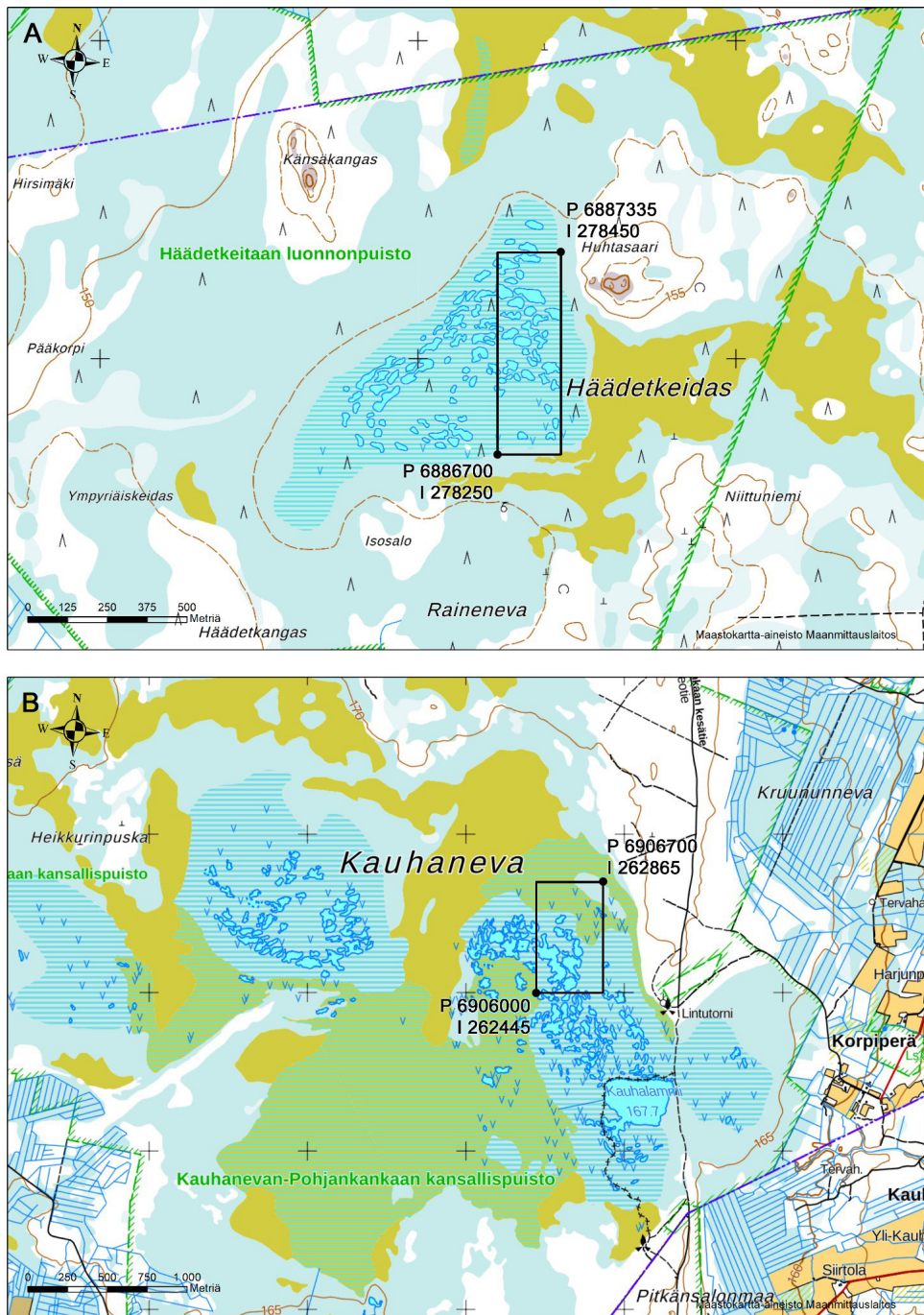
Tässä artikkelissa tarkastellaan kahden länsisuomalaisen keidassuon, Häädetkeitaan ja Kauhanevan, pintarakenteessa vuosina 1947–2020 tapahtuneita muutoksia kaukokartoitusmenetelmien, ilmakuvien ja PlanetScope-satelliittikuvien avulla ja pohditaan havaittujen muutosten yhteyttä ilmastomuutokseen. Tavoitteena on selvittää, (1) onko keidassoiden vesipintojen lukumäärässä ja pinta-alassa tapahtunut muutosta pitkällä aikavälillä, (2) tapahtuuko keidassoiden vesipintojen lukumäärässä ja pinta-alassa kasvukauden sisäisiä muutoksia, joilla voi olla vaikutusta pitkän ajan muutoksen tulkintaan ja (3) onko havaituilla muutoksilla yhteyttä ilmasto-olosuhteissa tapahtuneisiin muutoksiin.

Tämä artikkeli perustuu Aalto-yliopiston Geoinformatiikan maisteriohjelmassa tehtyyn opinnäytetyöhön (Talvitie 2022) ja on tehty yhteistyössä Lauhanvuori - Hämeen kangas UNESCO Global Geoparkin, Luonnonvarakeskuksen ja Metsähallituksen kanssa.

Aineisto ja menetelmät

Tutkimusalueet

Häädetkeidas on Pirkanmaan ja Satakunnan rajalla Karviassa ja Parkanossa sijaitseva noin 100 ha laaja kilpikaidassuo, joka on vuodesta 1956 asti



Kuva 2. A. Häädetkeitaan koealue merkitty suorakaiteella maastokartalle. B. Kauhanevan koealue merkitty suorakaiteella maastokartalle. Maastokartta Maanmittauslaitos, koealueiden minimi- ja maksimikoordinaatit ETRS-TM35FIN -koordinaatistossa.

Figure 2. A. Häädetkeidas mire study area marked with a rectangle on the topographic map. B. Kauhaneva mire study area marked with a rectangle on the topographic map. Map by the National Land Survey of Finland, minimum and maximum coordinates of test areas in the ETRS-TM35FIN coordinate system.

ollut suojeltu Häädetteitaan luonnonpuistona (Ymparisto.fi 2023A, 2023B). Häädetteitaan rakennetta, suotyyppejä ja kasvillisuutta ovat kuvanneet mm. Aario (1932), Paasio (1935), Kalpio (1996), Kärkkäinen & Siivonen (2003) ja Mäensivu (2017). Kauhaneva taas on Etelä-Pohjanmaan ja Satakunnan rajalla Kauhajoella ja Karviassa sijaitseva useasta keidassuosta ja aapasuosta koostuva 2506 ha laajuinen suokompleksi, joka on osa 1982 perustettua Kauhanevan-Pohjankankaan kansallispuistoa (Ymparisto.fi 2023B). Kauhanevan suotyyppejä, kasvillisuutta ja rakennetta ovat kuvanneet mm. Heikkilä ym. (2001) ja Häyrinen (1980). Kauhaneva on osa kansainvälistä Ramsar-kosteikko-ohjelmaa (RSIS 2022), ja molemmat tutkimuskohteet ovat osa Lauhanvuori - Hämeen kangas UNESCO Global Geopark -aluetta (Talvitie 2021).

Molemmat tutkimussuot sijaitsevat kasvi-maantieteellisesti etelä- ja keskiboreaalisen vyöhykkeen rajalla (Kuva 1). Alueen vallitseva suoyhdistymätyyppi on kilpikoidassuot (SYKE 2015).

Häädetteidas ja Kauhaneva valikoituivat tutkimusalueiksi edustavuutensa ja pitkän seuranta-historiansa vuoksi. Molemmat suot ovat hyvin kehittyneitä kliimaksivaiheen keidassoita, joilla on hyvin kehittynyt pintarakenne ja joiden keskusaakiolla esiintyy runsaasti avovesiallikoita. Laajoina ja pitkään suojeltuina suokokonaisuuksina ympäröivän maankäytön aiheuttamat muutokset alueiden hydrologiaan ovat olleet pieniä, jolloin pitkän aikavälin hydrologiamuutosten voidaan katsoa peilaavan lähinnä ilmastossa tapahtuneita muutoksia. Kauhanevan hydrologiaan saattaa tosin vaikuttaa pohjaveden pumppaus läheisellä Pohjankankaalla. Tarkastelualueiksi valittiin suhteellisen vähäpuustoiset ja kasvillisuustyypeiltään homogeeniset alueet, joissa allikoita on runsaasti näkyvillä ja joissa visuaalisen tarkastelun perusteella oli havaittavissa allikoiden pinta-aloihin ja lukumääriin liittyvää vaihtelua eri vuosien välillä. Silmämääräisesti tarkasteltuna alueet edustavat tutkittavaa suota hyvin. Tutkimusaluearajauksella pyrittiin myös välttämään osassa ilmakuvia ilmenneet aallokon ja auringon heijastumien aiheuttamat virheet. Suon puustoisimmat osat rajattiin tarkastelun ulkopuolelle, sillä puiden aiheuttamat varjot

voivat luokitteluvaiheessa sekoittaa pieniin allikoihin.

Häädetteitaalla valittiin suorakulmainen, 200 × 635 m kokoinen alue keidassuon keskusaakion itäreunassa (Kuva 2 A). Koealue kattaa noin neljäsosan Häädetteitaan varsinaisen keidassuon pinta-alasta. Kauhanevalla valittiin suorakulmainen 420 × 700 m kokoinen alue keidassuon itäosassa (Kuva 2 B). Koealue kattaa noin viidesosan Kauhanevan itäisen keidassuon pinta-alasta.

Ilmakuvat

Pitkän ajan muutoksen tarkastelun aineistona käytettiin Maanmittauslaitokselta hankittuja ilmakuvia, jotka kattavat noin 70 vuoden mittaisen ajanjakson. Kuvien ajankohdat valittiin noin 10 vuoden välein. Vanhimmat kuvat ovat 1940-luvun lopulta, tuoreimmat vuodelta 2017. Referenssinä käytettiin molemmilla kohteilla lisäksi vuoden 2020 ilmakuvaa. Ilmakuvien kuvausajankohdat vaihtelivat huhtikuun lopulta elokuun loppuun (26.4.–22.8.) (Taulukko 1). Ilmakuvat vuosilta 1947–2008 ovat pankromaattiselle filmille kuvattuja mustavalkokuvia. Vuosien 2014–2020 kuvat on kuvattu digitaalisesti. Ilmakuvat ovat pääasiassa Maanmittauslaitoksen ja Puolustusvoimien kuvaamia. Uusimmat kuvat ovat SKM Gisair Oy:n ja Terratec Oy:n kuvaamia.

Suon mikrotopografian korkeussuhteiden visuaalisen tarkastelun referenssiaineistona käytettiin Maanmittauslaitoksen laserkeilausaineistosta tehtyä 2 m korkeusmallia ja rinnevarjostuskuvaa vuodelta 2021, joista kermien ja kuljujen korkeussuhteet erottuvat selvästi. Georeferoinnissa käytettiin referenssinä Maanmittauslaitoksen vuoden 2020 ilmakuvia.

Satelliittikuvat

Kasvukauden aikaisen muutoksen havainnointiin käytettiin yhden kasvukauden aikana kuvattuja PlanetScope-satelliittikuvia (Planet Labs Inc. 2020), joiden spatiaalinen resoluutio on noin 3 × 3 metriä. Satelliitit kuvaavat maan pintaa sinisen, vihreän, punaisen ja lähi-infrapunan aallonpituudella.

PlanetScope -kuvista valittiin kustakin tutkimuskohteesta kaksi kuvaa vuodelta 2021:

Taulukko 1. Ilmakuvien kuvausajankohdat ja mittakaavat tai pikselikokoot.

Table 1. Aerial photograph acquisition times and scales or pixel sizes.

Kohde / Site	Vuosi / Year	Päivämäärä / Date	Kellonaika / Time	Mitta-kaava 1: / Scale 1:	Pikseli-koko cm / Pixel size cm
Häädetkeidas	1948	8.6.	14:20 - 15:50	20000	-
Häädetkeidas	1954	22.8.	8:20 - 11:30	20000	-
Häädetkeidas	1967	28.5.	-	60000	-
Häädetkeidas	1978	25.5.	9:01 - 10:17	31000	-
Häädetkeidas	1989	15.5.	15:30 - 16:43	31000	-
Häädetkeidas	1998	16.5.	14:55 - 16:43	16000	-
Häädetkeidas	2008	5.7.	7:35 - 9:17	60000	-
Häädetkeidas	2017	5.5.	15:04 - 16:19	-	39
Kauhaneva	1947	20.7.	8:45 - 9:25	20000	-
Kauhaneva	1955	11.7.	7:20 - 10:10	20000	-
Kauhaneva	1964	19.5.	9:33 - 10:42	30000	-
Kauhaneva	1978	12.5.	12:18 - 13:29	31000	-
Kauhaneva	1989	25.5.	10:21 - 11:12	31000	-
Kauhaneva	1994	8.5.	10:30 - 16:29	16000	-
Kauhaneva	2008	24.5.	10:10 - 12:24	20000	-
Kauhaneva	2014	26.4.	9:49 - 12:04	-	25
Kauhaneva	2017	5.5.	15:04 - 16:19	-	39
Referenssi	2020	9.6.	8:11 - 10:32	-	30

toukokuun alkupuolella ja heinäkuun lopulla kuvatut. 2021 valittiin tarkasteluvuodeksi, koska sademäärän keskiarvo 53,3 mm Karvian mittaus- asemalla vuonna 2021 vastasi aseman pitkän ajan (1946–2021) keskiarvoa 50,1 mm; (Ilmatieteen laitos 2022). Toukokuun alkupuolen kuvat edustavat lumen sulamisen jälkeistä tilannetta, jolloin sulamisvedet ovat suurelta osin vielä suoalueella. Heinäkuun lopun kuvat edustavat tilannetta, jossa suon kasvillisuus on saavuttanut täyden mittansa ja kesän kuivattava vaikutus on näkyvillä, ennen syyskesän sateita.

Säätiiedot

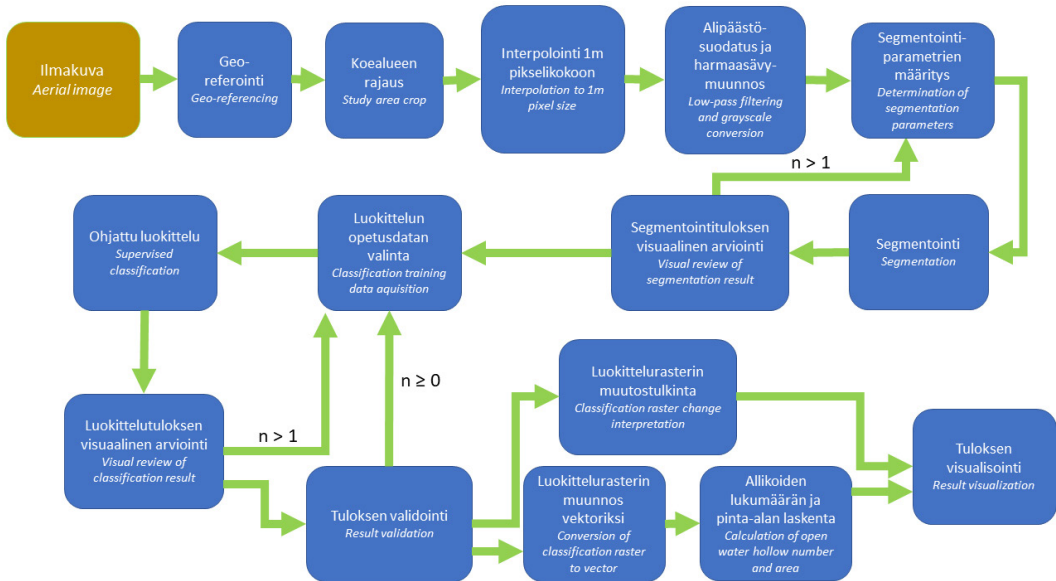
Tutkimuskohteille haettiin kuukauden keskilämpötilat tammikuusta 1946 alkaen Ilmatieteen laitoksen ilmastopalvelusta. Lämpötilat on laskettu Ilmatieteen laitoksen 10 × 10 km hila-aineistosta (Ilmatieteen laitos 2022). Kohteille on valittu lämpötila-arvot niiden hilaruudulta. Sademäärä saatiin lähimmiltä tutkittavan ajanjakson aikana toimineilta havaintoasemilta Karvian kirkonkylältä (1946–2008) ja Alkkiasta (2009–2017). Aineistossa olevat aukot on täytetty hila-aineiston avulla, paitsi vuoden 1960 osalta, jolta tietoa ei ole saatavilla.

Menetelmät

Alueet luokiteltiin allikoihin ja ei-allikoihin ohjatun luokittelun avulla (Richards 2022). Ilmakuvien luokittelutarkkuutta parannettiin hyödyntämällä objektiperusteista segmentointia luokittelun esikäsitelyssä (Dronova 2015). Luokittelun tulosten perusteella tehtiin muutostulkinta laskemalla allikoiden lukumäärän ja pinta-alan muutos tarkasteluajanjaksolla. Ilmakuvien käsittelyn työnkulku on esitetty vuokaaviona kuvassa (3) ja satelliittikuvien käsittelyn työnkulku kuvassa (4).

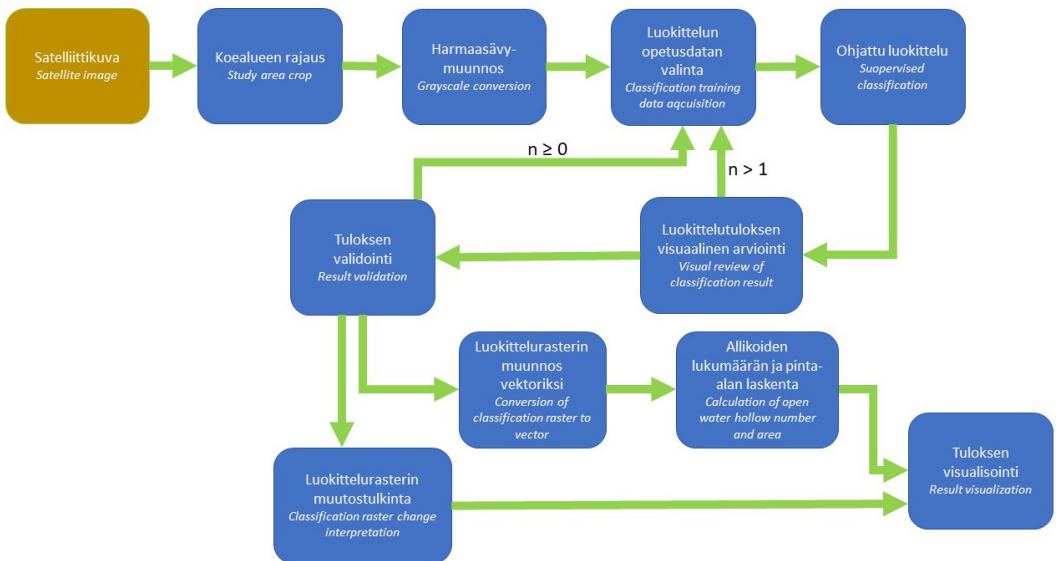
Aineiston esikäsitely

Ilmakuvat toimitettiin digitaalisina tif-tiedostoina ilman paikkatietoa. Ne georeferoitiin ETRS-TM-35FIN-koordinaatistoon toisen asteen polynomimuunnoksella. Georeferoinnin virheen neliöllinen keskiarvo eli residuaalivirhe (RMSE, root mean square error) vaihteli välillä 0,11–0,19 m (keskiarvo 0,15 m). Georeferoitujen ilmakuvien pikselikoko vaihteli välillä 0,24–0,98 m. Koaluekuvat saatettiin keskenään vertailukelpoisiksi interpoloimalla ne 1 m pikselikokoon käyttäen bilineaarista interpolointia. 1 m pikselikokoon ku-



Kuva 3. Ilmakuvien käsittelyn vaiheet kaaviona. Segmentointi ja luokittelu sisälsivät useampia iteraatiokierroksia, validointivaiheessa luokittelua muutettiin vain yksittäisten kuvien kohdalla.

Figure 3. The processing stages of aerial images as a diagram. Segmentation and classification included several iterations, in the validation phase the classification was changed only for certain individual images.



Kuva 4. Satelliittikuvien käsittelyn vaiheet kaaviona. Luokitteluvaihe sisälsi useita iteraatiokierroksia. Validointivaiheessa luokittelu uusittiin vain tarvittaessa.

Figure 4. The processing stages of satellite images as a diagram. The classification phase included several iterations. During the validation phase, the classification was renewed only if necessary.

viin tehtiin lisäksi alipäästösuodatus (low pass filter) kohinan (mm. naarmut, pölyhiukkaset) vaikutusten minimoimiseksi käyttäen 3×3 pikselin liikkuvaa ikkunaa.

Satelliittikuvat hankittiin ilmakehäkorjattuina (SR, Surface reflectance), ortorektifoituina ja georeferoituina tif-tiedostoina. Jotta kuvat olisivat vertailukelpoisia mustavalkoisten ilmakuvien kanssa, ne muutettiin pankromaattisiksi harmaasävykuviksi. Näkyvän valon lisäksi harmaasävykuvaan sisällytettiin lähi-infrapunakaista, jonka oletetaan voimistavan vesialueiden erottuvuutta kasvillisuudesta.

Ilmakuvien segmentointi

Ilmakuvat segmentoitiin ArcMapin Segment Mean Shift -työkalulla, joka toteuttaa objekti-perusteisen kuva-analyysin periaatteita (Blaschke ym. 2014). Ilman segmentointia esimerkiksi puiden varjot aiheuttavat korkean spatiaalisen resoluution ilmakuvissa pikselipohjaisia luokittelumenetelmiä käytettäessä luokittelutulokseen virhettä, joka segmentoinnilla pystytään välttämään. Satelliittikuvien ilmakuvia karkeampi pikselikoko riittää eliminoimaan kohinaa ja esimerkiksi puiden varjoista johtuvia virheitä, joten ilmakuvista poiketen kuville ei tehty objekti-perusteista segmentointia.

Segment Mean Shift on ei-parametrinen menetelmä, jolla kuvan sisältö klusteroidaan ominaisuuksiensa mukaan segmenteiksi (Comaniciu & Meer 2002). Työkalu perustuu analysoitavan kuvan läpi liikuteltavaan ”ikkunaan”, jolle lasketaan pikseleiden arvojen keskiarvo, jonka perusteella kukin pikseli sijoitetaan osaksi vierekkäin olevista pikseleistä muodostuvaa pikseliryhmää eli segmenttiä. Menetelmässä segmenttien kokoa ja muotoa säädellään seuraavien parametrien avulla: spektraalinen yksityiskohtaisuus (spectral detail), spatiaalinen yksityiskohtaisuus (spatial detail) ja segmentin minimikoko (minimum segment size).

Segmentointiparametrit valittiin visuaalisen tarkastelun perusteella, sillä sen on todettu useimmiten antavan riittävän hyvän tuloksen luokittelua varten (Räsänen ym. 2013). Segmentoinnin tavoitteena oli saada kuvasta tunnistettua vesipinta-aiset allikot, jotka mustavalkoisissa ilmakuvissa näyttäytyvät lähes mustina alhaisen heijastavuus-

den alueina. Osassa kuvia vedenpinnassa esiintyy aallokkoa, joka nostaa veden heijastavuutta. Yksittäisissä kuvissa tavattiin lisäksi voimakkaita auringon heijastumia. Allikoiden heijastavuus oli pääasiassa kuitenkin suolla ilmeneviä muita piirteitä huomattavasti alhaisempi. Segmentoinnin hyvyden arvioinnissa hyödynnettiin ilmakuvien käsittelyn aikana tehtyjä havaintoja suon kasvillisuudesta erityisesti puuston osalta. Etenkin korkean erotustarkkuuden ilmakuvista puusto oli helppo tunnistaa. Siten mahdolliset virheet segmentoinnissa olivat tunnistettavissa.

Spektraalisen yksityiskohtaisuuden arvoksi valittiin kuhunkin kuvaan sopiva arvo sen perusteella, miten allikot kussakin ilmakuvassa erottuvat. 1947–1964 kuvissa käytettiin arvoa 2, myöhemmissä 15 tai 10. Tavoitteena oli segmentoida allikot erilleen ympäristöstään. Allikoiden rantavyöhykkeestä tavataan kuitenkin paikoin matalavetisiä turverantoja tai välipintamaisia kasvillisuusalueita, joissa veden ja kuivan maan raja on häilyvä. Nämä pyrittiin huomioimaan.

Spatiaalisen yksityiskohtaisuuden osalta käytettiin suhteellisen alhaista arvoa 4, sillä tavoiteltavat segmentit allikoiden osalta olivat suuri-kokoisia eivätkä olleet kovin tiiviisti kasautuneet.

Segmentin minimikooksi valittiin 9 pikseliä eli yhdeksän neliometriä. Minimikoko valittiin siten, että sillä voidaan erottaa pienimmät allikot puiden aiheuttamista tummista varjoista.

Luokittelu

Esikäsitellyt kuvat luokiteltiin kahteen luokkaan: Allikko ja Ei-allikko. Luokittelijana käytettiin suurimman todennäköisyyden (Maximum Likelihood) luokittelijaa, jota on käytetty jo pitkään kaukokartoitusaineistojen käsittelyssä (Chasmer ym. 2020). Opetusaineistona käytettiin luokiteltavalta koelalalta valittua otosta, joka rajattiin monikulmioilla. Monikulmioiden sisään rajattiin allikko ja ei-allikko -luokista edustavat otokset. Kunkin vuoden opetusaineisto rajattiin kunkin vuoden ilmakuvaan sopivaksi. Luokittelun onnistumista arvioitiin aluksi silmämääräisesti ja opetusaineistoa muokkaamalla haettiin parhaiten toimiva luokitus. Opetusaineiston koot vaihtelivat välillä noin 1200–2500 pikseliin Allikko-luokalle ja noin 5400–7400 pikseliä Ei-allikko -luokalle.

Luokittelun tuloksena saatiin kahteen luokkaan jaettu rasteri.

Luokittelutarkkuutta arvioitiin käyttämällä riippumatonta validointiaineistoa, jonka teossa ositetulla otannalla (stratified random) luotiin satunnaisesti 100 pistettä suhteuttaen luokkakoh-tainen pistemäärä luokan pinta-alaan. Pisteiden luokka määritettiin alkuperäisistä georeferoiduis-ta ilmakuvista visuaalisen tarkastelun perusteella. Ohjattua luokittelua ja visuaalista luokittelua verrattiin ristiintaulukoinnilla. Luokittelulle laskettiin sekaannusmatriisi ja allikkoluokan F1-tarkkuus Kaavan 1 mukaan:

$$F_1 = \frac{2}{\text{recall}^{-1} + \text{precision}^{-1}} = 2 \frac{\text{precision} \cdot \text{recall}}{\text{precision} + \text{recall}} = \frac{tp}{tp + \frac{1}{2}(fp + fn)} \quad (1)$$

Kaavassa 1 tp = todellinen positiivinen (true positive), fp = väärä positiivinen (false positive) ja fn = väärä negatiivinen (false negative), recall = herkkyys, precision = sisäinen tarkkuus.

Luokitellut rasterit muunnettiin pinta-alalaskentaa ja muutoksen visualisointia varten monikulmiovektoreiksi.

Muutostulkinta

Allikoiden määrän muutosta tarkasteltiin laske-malla allikoiden lukumäärät ja pinta-alat sekä niiden muutokset.

Spatiaalisen muutoksen visualisointia varten tehtiin muutostulkinta vertaamalla perättäisten vuosien luokiteltuja pikselikarttoja toisiinsa. Vuosien väliset luokitteluerot näkyvät tuloksessa allikko-luokkaan kuuluvien pikselien vähennyksenä, lisääksenä tai muuttumattomuutena.

Säätiedoista laskettiin vuoden keskilämpötila tutkimuskohteilla sekä vuosittainen sadesumma Karviassa ajanjaksolla 1946–2021. Säätietoja tarkasteltiin yleistasolla, sillä käytetyn säätietoi-aineiston tarkkuus ei riittänyt kuvausajankohtien lämpösumman tai tarkan sadesumman laskemi-seen.

Vuotuisten keskilämpötilojen, sademäärien sekä allikoiden lukumäärän ja pinta-alan pitkä-aikaistrendin monotonisuuden tilastollista mer-

kitsevyyttä tutkittiin Mann-Kendall-testin (Mann 1945; Kendall 1975) avulla. Lisäksi vuotuisen keskilämpötilan sekä vuoden sisäisen kuvaus-ajankohdan yhteyttä kyseisen vuoden allikoiden lukumäärään ja pinta-alaan tutkittiin Pearsonin korrelaatiokertoimen avulla.

Tulokset

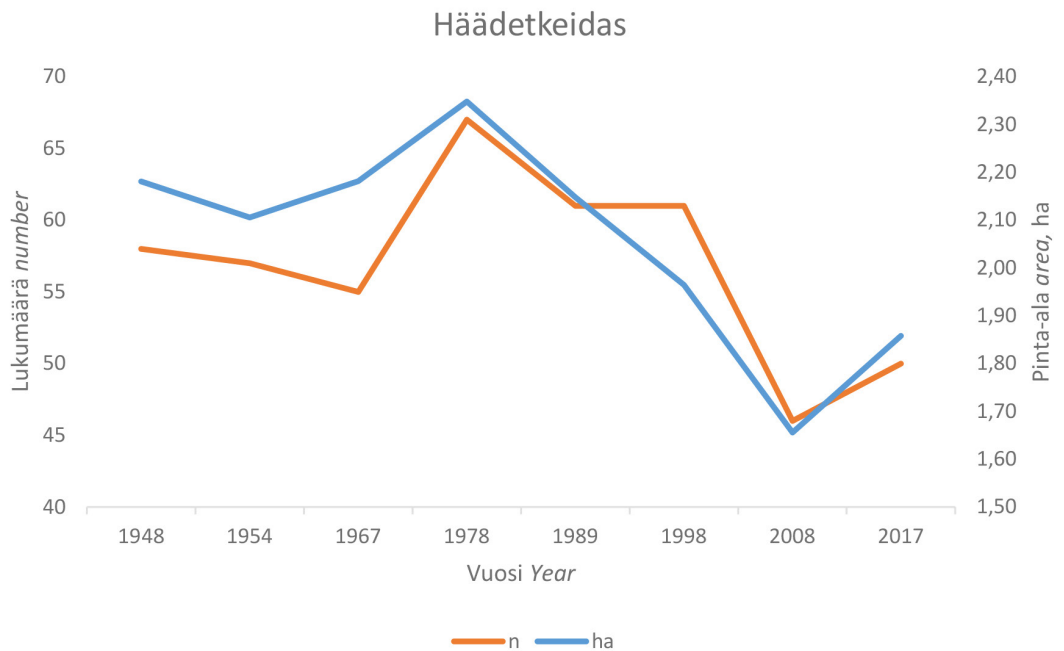
Pitkän aikavälin muutos

Häädetkeitaan ilmakuvasarjasta tehdyn allikko-mallin perusteella (Kuvat 5, 7 ja 9) suon avovesipintojen lukumäärä koealueella on vähentynyt aikavälillä 1948–2017 noin 13,8 % ja pinta-ala 14,8 %. Lasku ei kuitenkaan ole ollut tasaista, vaan lukumäärässä ja pinta-aloissa on ajoit-tain ollut myös kasvua. Allikoiden lukumäärä vaihtelee koealueella välillä 46–67 ja pinta-ala välillä 1,66–2,35 ha. Suurimmillaan pinta-ala ja lukumäärä ovat vuoden 1978 kuvalla.

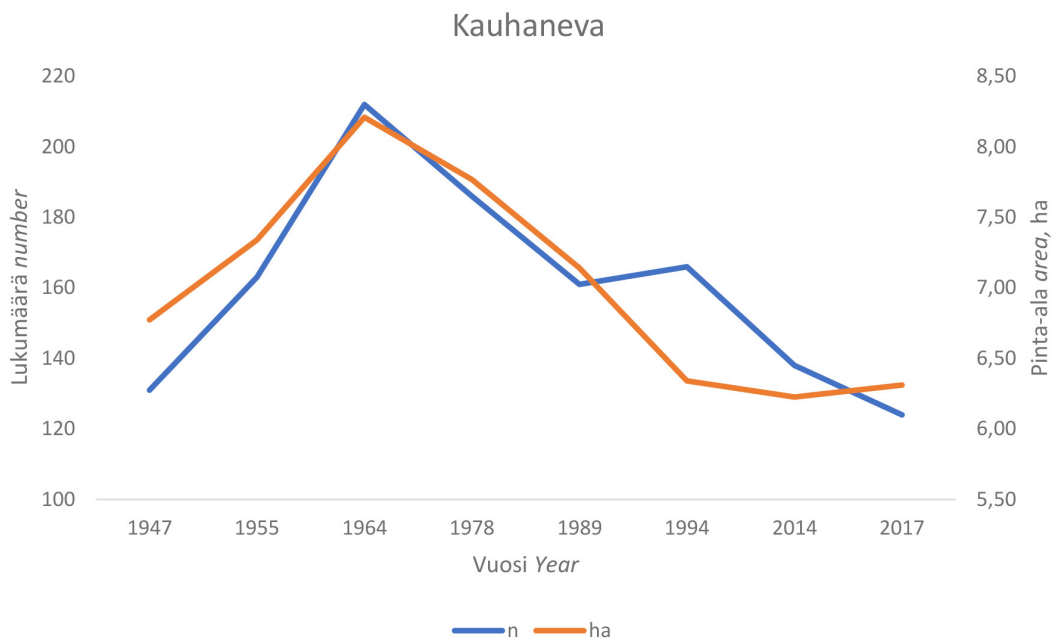
Kauhanevalla allikoiden lukumäärä ja pinta-ala kasvoivat mallin perusteella aikavälillä 1947–1964, minkä jälkeen sekä allikoiden luku-määrä että pinta-ala ovat tasaisesti vähentyneet suunnilleen samalle tasolle kuin tarkastelujakson alussa. Mallin perusteella suon avovesipintojen lukumäärä on koealueella vähentynyt aikavälillä 1947–2017 noin 5,3 % ja pinta-ala 6,8 % (Kuvat 6, 8 ja 10). Allikoiden määrä koealueella vaihtelee välillä 124–212 ja pinta-ala välillä 6,22–8,2 ha.

Kummallakin kohteella allikoiden pinta-alan ja lukumäärän trendi on ollut laskeva mutta ei tilastollisesti merkitsevä. Tilastollisesti merkitse-vän trendin havaitsemiseen olisi tarvittu useampia havaintoja tarkastelujakson ajalta.

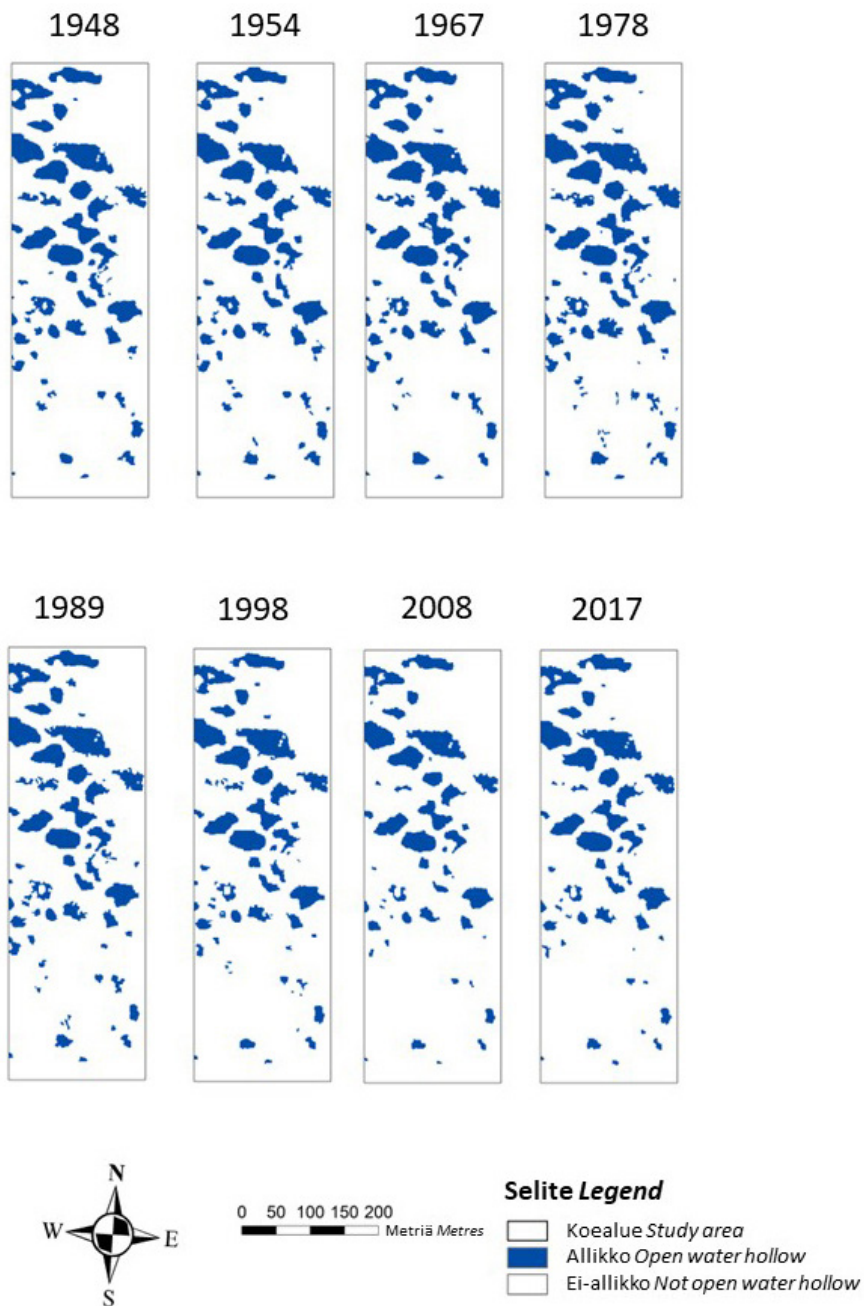
Pääasialliset muutokset molemmilla tutkimus-alueilla ovat silmämääräisen tarkastelun perus-teella tapahtuneet pienialaisissa allikoissa, joita on sekä syntynyt että hävinnyt tarkastelujakson aikana. Suuret avovesiallikot ovat pitkällä aika-välillä olleet suhteellisen stabiileja, eikä niihin ole yleisesti liittynyt voimakkaita lukumäärän tai pinta-alan muutoksia. Häädetkeitaan koealu-eella tavataan kuitenkin yksittäisiä varsin suuria allikoita, joiden pinta-alassa on tapahtunut ajan mittaan muutoksia mm. umpeenkasvun ja tulvi-misen myötä (kuvat 9 ja 15). Kauhanevalla mer-kittävimmat muutokset allikoiden lukumäärässä



Kuva 5. Allikoiden lukumäärän (n) ja kokonaispinta-alan (ha) muutos Häädetkeitaan koealueella aikavälillä 1948–2017.
 Figure 5. Change in the number (n) and the total surface area (ha) of open water hollows in the Häädetkeidas mire study area in the period 1948–2017.

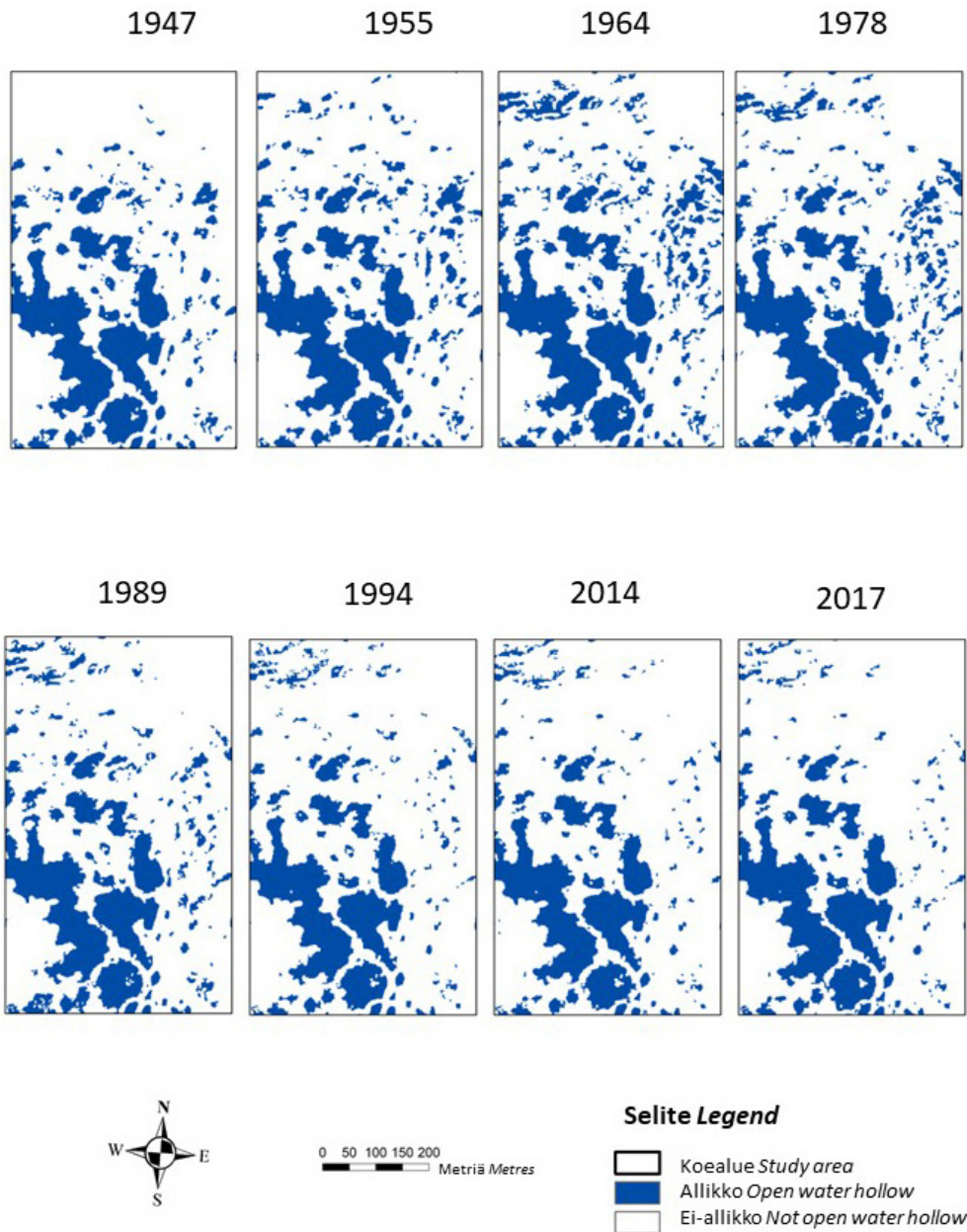


Kuva 6. Allikoiden lukumäärän (n) ja kokonaispinta-alan (ha) muutos Kauhanevan koealueella aikavälillä 1947–2017.
 Figure 6. Change in the number (n) and the total surface area (ha) of open water hollows in the Kauhaneva mire study area in the period 1947–2017.



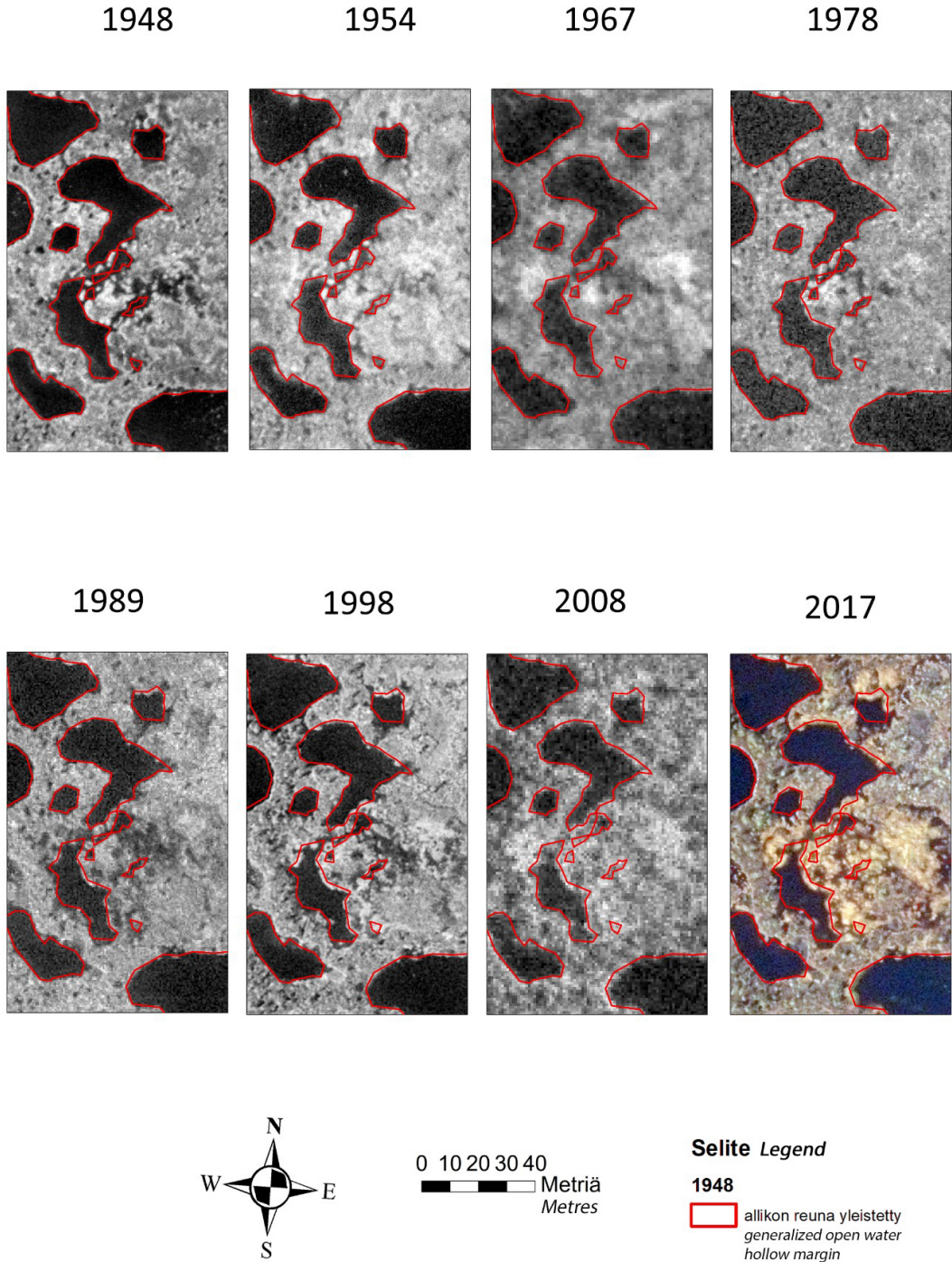
Kuva 7. Häädetkeitaan koealueen ilmakuvien luokittelun tulos. Näkyvimvät muutokset allikkoiden lukumäärässä ovat tapahtuneet pienialaisissa allikoissa, esimerkiksi koealueen eteläosassa. Yksityiskohtaisempi näkymä alueen keskiosan muutoksiin ks. Kuva 9.

Figure 7. The classification result of aerial photographs of the Häädetkeidas mire study area. The most visible changes in the number of open water hollows have occurred in small hollows, for example in the southern part of the study area. For a more detailed view of the changes in the central part of the area, see Figure 9.



Kuva 8. Kauhanevan koealueen ilmakuvien luokittelun tulos. Merkittäviä muutoksia allikkoiden lukumäärässä ja pinta-alassa on havaittavissa erityisesti koealueen pohjois- ja itäosassa, jossa nähtävillä tarkastelujakson alkupuoliskolla tapahtunut kasvu sekä jälkipuoliskolla tapahtunut väheneminen. Pohjaturpeen pintaan pulauttaminen on havaittavissa 1989 kuvassa tutkimusalueen suurimman allikon pohjoisimman lahdekkeeseen pohjoispäässä näkyvänä saarena.

Figure 8. The classification result of aerial photographs of the Kauhaneva mire study area. Significant changes in the number and surface area of open water hollows can be observed especially in the northern and eastern parts of the study area, where the increase in the first half of the review period and the decrease in the second half can be seen. The bulging of bottom peat to the surface of the hollow can be seen in the 1989 image as a visible island at the northern end of the northernmost bay of the largest open water hollow in the study area.



Kuva 9. Yksityiskohta Häädetkeitaalta. Vuoden 1948 luokittelutuloksen perusteella yleistetty allikon rantaviiva verrattuna aikasarjan käsittelemättömiin ilmapäiviin.

Figure 9. Detail from Häädetkeidas mire. The generalized open water hollow shoreline based on the classification result of 1948 compared to the unprocessed aerial photographs of the time series.

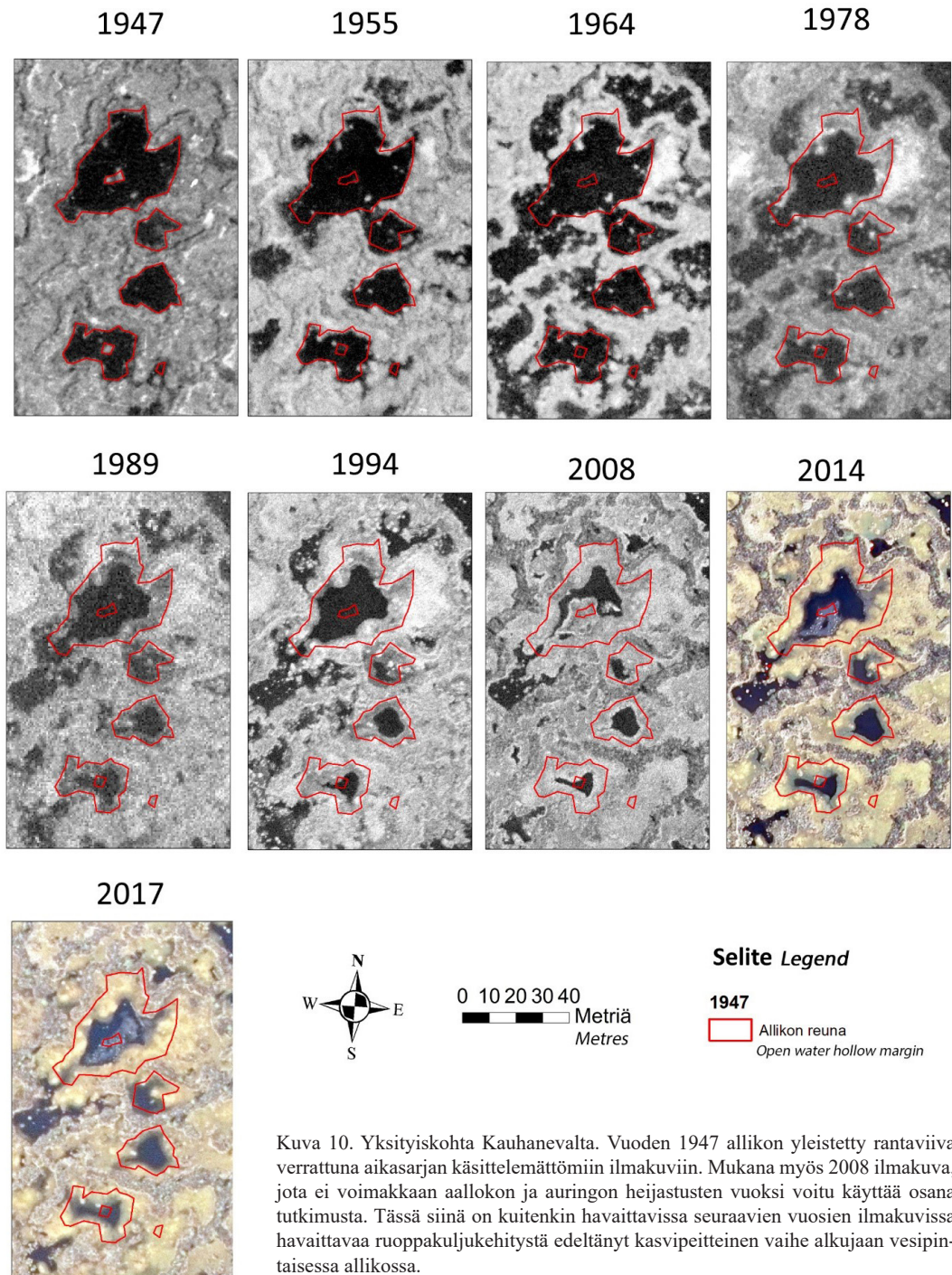


Figure 10. Detail from Kauhaneva mire. The generalized open water hollow shoreline based on the classification result of 1947 compared to the unprocessed aerial photographs of the time series. Also included is a 2008 aerial photo, which could not be used as part of the study due to strong waves and sun reflections. However, the photo shows a plant covered phase of a previously open water hollow, that in the following years develops to an open peat hollow devoid of plant cover.

ja pinta-alassa ovat tapahtuneet keskuslaakion reuna-alueilla, erityisesti koealueen pohjois- ja itäosassa. Lisäksi kuvista on havaittavissa kasvi-
peitteisyyteen liittyviä muutoksia ja allikoiden ruopakuljuehitystä (kuva 10). Muutostulkinnassa havaittiin myös ilmakuvien georeferointi- ja perspektiivivirheistä johtuvia näennäisiä muutoksia suurten ja stabiilien allikoiden reunoilla.

Allikoiden pinta-alan ja lukumäärän sekä kasvukauden aikaisen kuvausajankohdan välillä ei havaittu selkeää korrelaatiota (Pearsonin korrelaatiokerroin välillä $-0,25-0,08$). Allikko-luokan F1-tarkkuus Häädeteitaalla vaihtelee välillä $0,87-0,97$, keskiarvo $0,90$. Kauhanevalla Allikko-luokan F1-tarkkuus vaihtelee välillä $0,85-1,00$, keskiarvon ollessa $0,93$.

Kasvukauden aikainen muutos

Satelliittikuvien perusteella avovesipintojen lukumäärä lisääntyi Häädeteitaan koealueella vuoden 2021 kesäkuukausien aikana noin $6,1\%$ ja niiden yhteispinta-ala väheni noin $6,8\%$ (Kuva 11). Lukumäärän lisääntyminen selittyi laaja-alaisen allikon vedenpinnan laskulla, jolloin allikon eri osat erkanevat erillisiksi allikoiksi. Allikoiden pinta-alan mediaani on heinäkuussa pienempi kuin toukokuussa. Kauhanevan koealueella avovesipintojen lukumäärä väheni 2021 kesäkuukausien aikana noin $68,0\%$ ja niiden yhteispinta-ala pieneni $17,7\%$ (Kuva 12). Pintaalojen mediaani on heinäkuussa suurempi kuin toukokuussa, mikä viittaa pienten sulavesiallikoiden kuivumiseen.

Satelliittikuvissa erottuvien allikoiden lukumäärä on vähäisempi kuin ilmakuvilla erottuvien. Niiden kokonaispinta-ala on myös ilmakuvia alhaisempi. Häädeteitaalla allikoiden pinta-alan mediaani on kuitenkin samaa luokkaa kuin ilmakuvissa. Satelliittikuvissa on havaittavissa sekä pienialaisten allikoiden kuivumista että yksittäisten suurialaisten allikoiden pilkkoutumista useammaksi pienemmäksi allikoksi (Kuvat 11 ja 12). Muutostulkintakuvasta on havaittavissa myös satelliittikuvien georeferoinnin ja ortorektiofioinnin tarkkuuteen liittyvien virheiden vaikutuksia.

Allikkomallien tarkkuutta koealueilla on arvioitu sekä silmämääräisesti että ositetulla satunnaisotannalla luodun riippumattoman vertai-

luaineiston avulla. Allikko-luokan F1-tarkkuudet Häädeteitaan toukokuun ja heinäkuun mallissa olivat $0,79$ ja $0,88$, jotka olivat alhaisempia kuin ilmakuvista tehtyjen mallien arvot. Kauhanevalla F1-tarkkuusarvot toukokuussa ja heinäkuussa olivat $0,95$ ja $0,84$, jotka olivat samalla tasolla kuin ilmakuvista tehtyjen mallien vastaavat arvot.

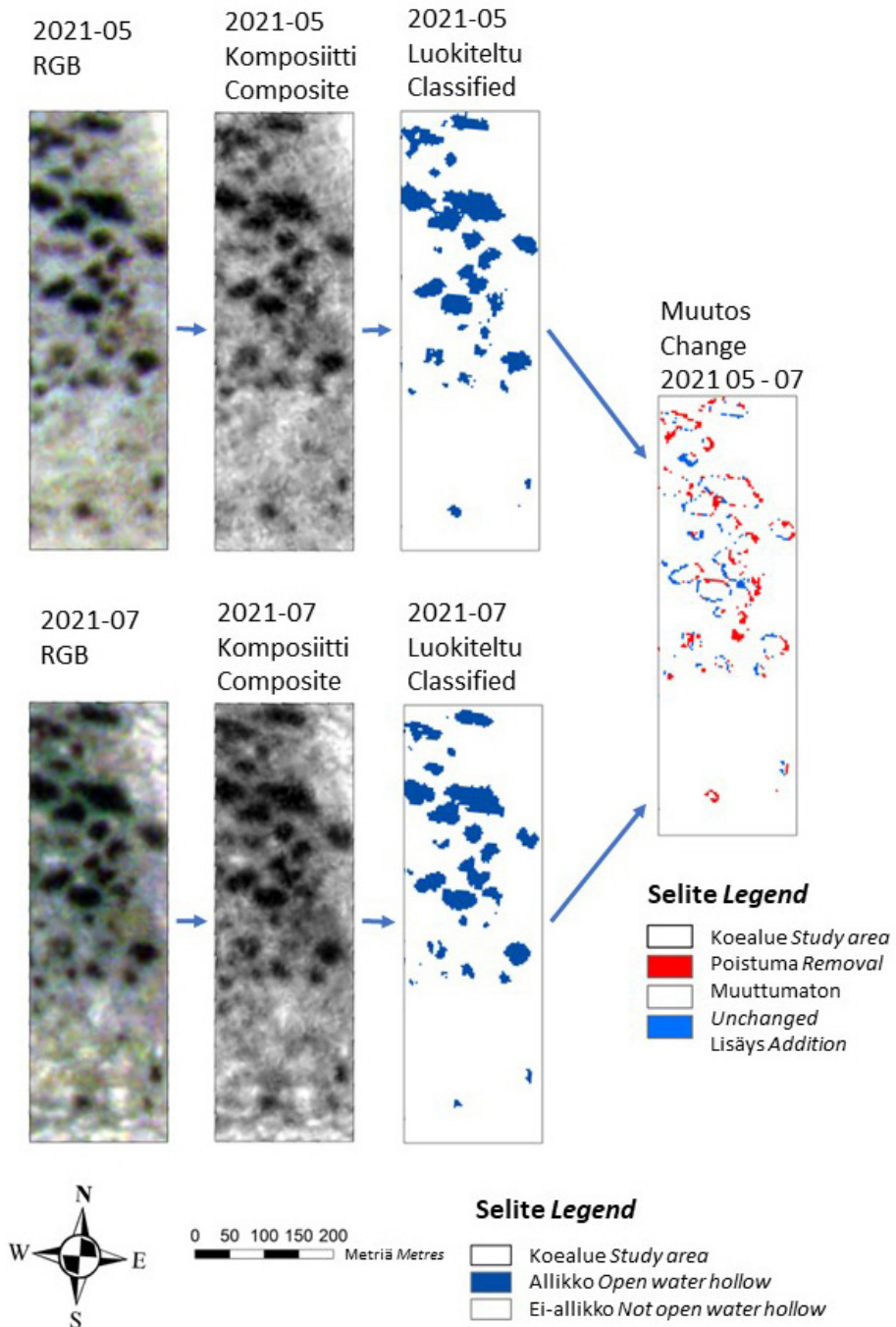
Säähavainnot

Tutkimusalueen 10 vuoden keskilämpötila on noussut 1955 jälkeen noin $1,4$ astetta (Kuva 13). Selkeintä nousu on ollut 1980-luvun puolivälin jälkeen. Sademäärät puolestaan ovat keskimäärin vähentyneet 1970-luvun puoleenväliin asti, minkä jälkeen sademäärissä on ollut selkeä, noin 15 vuoden mittainen kasvu. Tämän jälkeen sademäärät ovat pysytelleet kutakuinkin samalla tasolla tai laskeneet lievästi (Kuva 14). Vuosittainen sademäärän vaihtelu on kuitenkin voimistunut 2000-luvulla. Sademäärän monotoninen trendi koko ajanjaksolta oli nouseva mutta ei tilastollisesti merkitsevä.

Tulosten tarkastelu

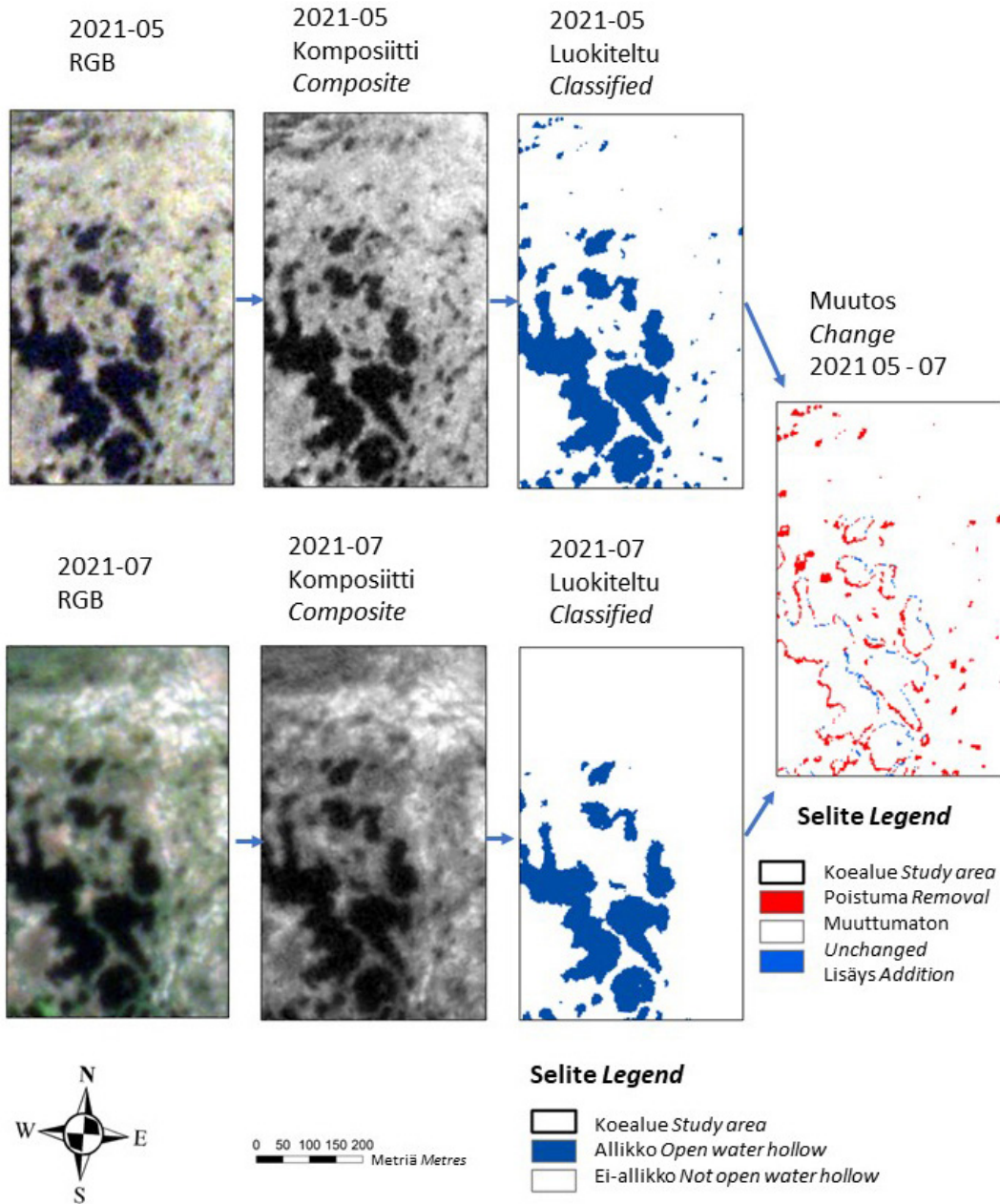
Tulosten perusteella allikoiden lukumäärä ja niiden pinta-ala ovat molemmilla tutkimuskohteilla vaihdelleet pitkän ajan tarkastelujaksolla, ja ne ovat tarkastelujakson lopussa pienempiä kuin sen alussa. Suurimmat pinta-alat ja lukumäärät havaittiin tarkastelujakson keskivaiheilla. Lisäksi allikoiden määrässä ja pinta-alassa on ollut vuodenaikaisvaihtelua.

Huolimatta koko tarkastelujakson $1,4$ asteen tilastollisesti merkitsevästä lämpenemistrendistä, prosessi ei kuitenkaan ole ollut lineaarisesti etenevä. Sääaineistossa voidaan erottaa lämpenemisen suhteen kaksi erityyppistä jaksoa: 1940-luvulta 1980-luvulle ja 1980-luvulta nykypäivään. Aikaisemmalla jaksolla ilmaston trendi oli viilenevä, kun taas jälkimmäinen jakso on ollut lämpenevä. Tutkittujen keidassoiden mikrotopografian muutokset heijastavat näitä alueen ilmastossa esiintyneitä lämpötilatrendejä, mikä tukee hypoteesia keidassoiden mikrotopografiassa tapahtuneiden muutosten ja lämpötilan korrelaatiosta. Siten havaittu allikoiden pitkän ajan muutos on mahdollisesti selitettävissä alueen ilmasto-olojen



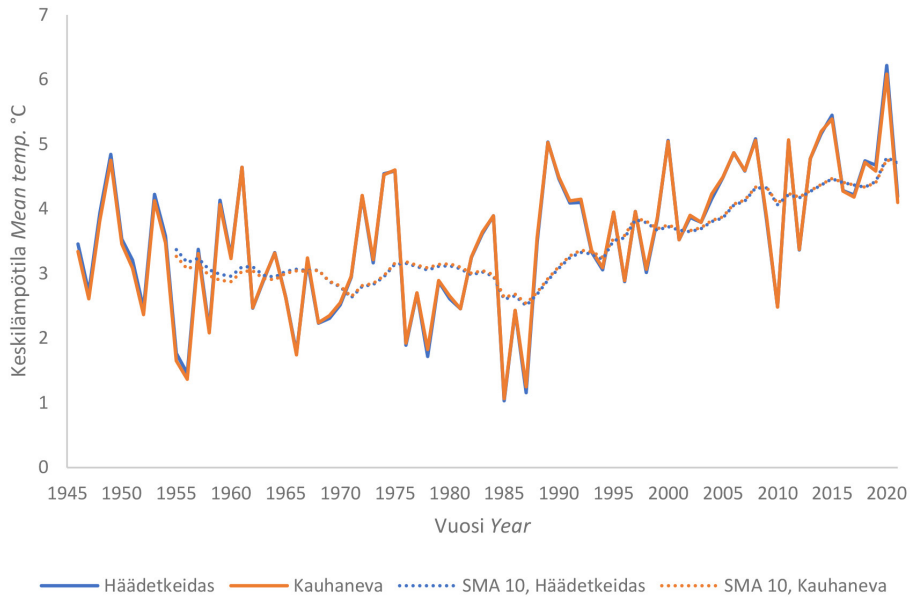
Kuva 11. Häädetkeitaan koalueen satelliittikuvat toukokuussa 2021 (11.5.2021) ja heinäkuussa (26.7.2021), RGB+NIR komposiitti-harmaasävykuvat, luokittelun tulos (allikko ja ei-allikko) ja kuvista tehdyn luokittelun perusteella muuttuneet alueet 11.5. ja 26.7. välillä.

Figure 11. Satellite images of the test area in Häädetkeidas mire in May 2021 (11.5.2021) and July (26.7.2021), RGB+NIR composite grayscale images, classification result (open water hollow and non - open water hollow) and areas that have changed between 11.5. and 26.7 based on the classification made from the satellite images.



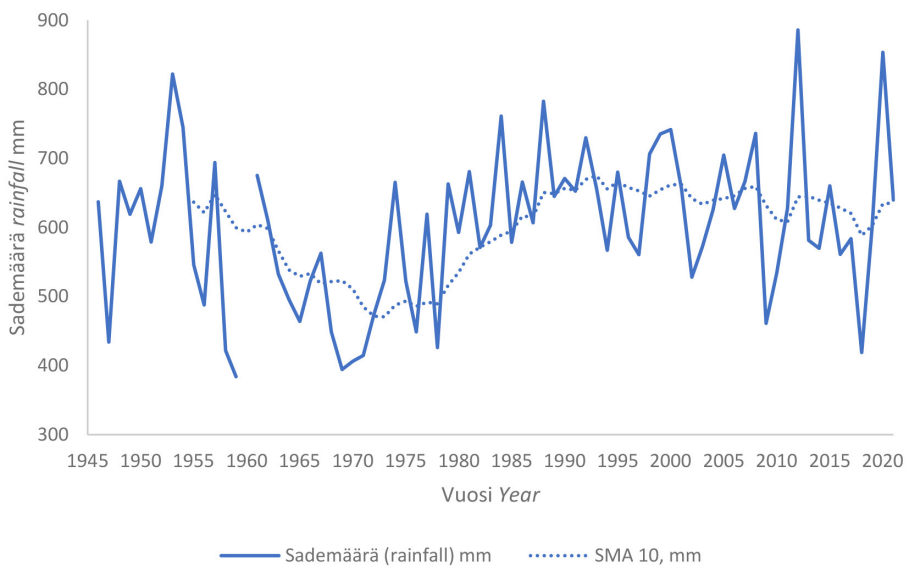
Kuva 12. Kauhanevan koealueen satelliittikuvat toukokuussa 2021 (13.5.2021) ja heinäkuussa (26.7.2021), RGB+NIR komposiitti-harmaasävykuvat, luokittelun tulos (allikko ja ei-allikko) ja kuvista tehdyn luokittelun perusteella muutuneet alueet 13.5. ja 26.7. välillä.

Figure 12. Satellite images of the Kauhaneva mire study area in May 2021 (13.5.2021) and July (26.7.2021), RGB+NIR composite grayscale images, classification result (open water hollow and non - open water hollow) and areas that have changed between 13.5. and 26.7 based on the classification made from the satellite images.



Kuva 13. Vuoden keskilämpötilä Häädetkeitaalla ja Kauhanevalla sekä keskilämpötilojen 10 vuoden liukuvat keskiarvot (SMA 10, Simple Moving Average) ajanjaksolla 1946–2021.

Figure 13. Average annual temperature in Häädetkeidas and Kauhaneva mires and 10-year moving averages (SMA 10) of the average temperatures in the period 1946–2021.



Kuva 14. Vuosittainen sademäärä Karviassa ajanjaksolla 1946–2021 sekä sademäärän 10 vuoden liukuva keskiarvo (SMA 10).

Figure 14. Annual rainfall in Karvia municipality in the period 1946–2021 and a 10-year moving average (SMA 10) of rainfall.

lämpenemisellä. Havaitut säätila-allikko-yhteydet eivät olleet tilastollisesti merkitseviä kuten eivät myöskään allikoiden muutostrendit. Tähän on syynä allikkohavaintojen lukumäärän vähäisyys. Jos allikkohavainnot olisivat olleet esimerkiksi vuosittaisia, olisi ollut monipuolisemmat mahdollisuudet tilastolliseen testaamiseen.

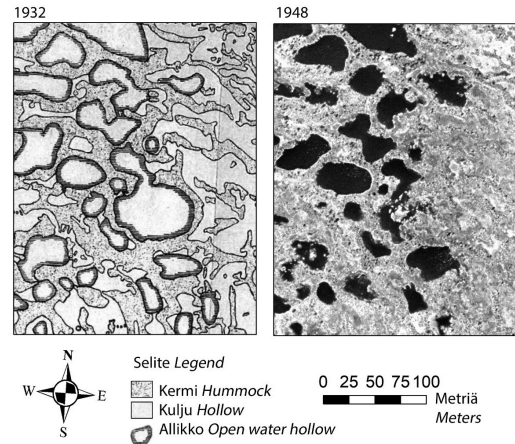
Allikoiden kokonaispinta-alan muutoksessa huomattiin 1940–60-luvuilla pinta-alan nousu ja sen jälkeen pinta-alan laskua. 1950-luvulla oli useita keskimääräistä sateisempia vuosia, mikä yhdessä nykyhetkeä hieman viileämmän ilmaston kanssa saattaa myös vaikuttaa soiden vetisyyden lisääntymiseen tarkastelujakson alkupuolella. Häädetkeitaalla allikoiden pieneneminen ja väheneminen on ollut suhteellisen tasaista 1970-luvulta ja Kauhanevalla 1960-luvulta alkaen. Allikoiden lukumäärän ja pinta-alan huipun eriaikaisuus Häädetkeitaalla ja Kauhanevalla saattaa selittyä 1960-luvun ilmakuvien kuvausajankohtien kolmen vuoden erolla.

Tulostemme perusteella allikoiden määrä ja pinta-ala on vähentynyt enemmän Häädetkeitaalla kuin Kauhanevalla. Tämä saattaa selittyä Kauhanevan suhteellisen muuttumattomina pysytlevien primääristen allikoiden suurella määrällä.

Häädetkeitaalla allikoiden pinta-alan pitkäaikaismuutokset keskittyvät pieniin ja suhteellisen mataliin sekundäärisiin allikoihin. Tutkimusalueen keski- ja eteläosassa on useita allikoita, joiden pinta-alassa tapahtuu tarkastelujakson aikana muutoksia, muun muassa kasvillisuuden levittäytymistä allikon alueelle.

Aario (1932) kuvaa Häädetkeitaan suokasvillisuuskartassaan selkeämuotoisen pyöreähkön allikon, joka myöhemmin kuvatuissa ilmakuvissa on ilmeisesti umpeenkasvun myötä muuttunut sokkeloiseksi ja sen pinta-ala on pienentynyt murto-osaan Aarion esittämästä (kuva 15). Myös Kauhanevalla allikoiden pinta-alan muutokset keskittyvät pääasiassa pienialaisiin ja mataliin sekundäärisiin allikoihin. Pääasialliset muutokset allikoiden lukumäärässä ja pinta-alassa ovat tapahtuneet tarkastelualueen itä- ja pohjoisosassa, jonne kevään sulamisvedet vaikuttavat satelliittikuvien perusteella kertyvän.

Häädetkeitaasta poiketen Kauhanevalla on tapahtunut muutoksia myös primääreissä allikoissa, joissa on 1955 ja 1989 ilmakuvissa



Kuva 15. Aarion (1932) kartta vasemmalla ja Maanmittauslaitoksen vuoden 1948 ilmapäätös kuvaa oikealla.

Figure 15. Aario's (1932) map on the left and the 1948 aerial photograph of the National Land Survey of Finland on the right.

havaittavissa saarimaisia turvepintoja allikoiden keskiosissa (ks. Kuva 8). Erittäin kuivana kesänä 2018 vastaavia turvepintoja havaittiin maastossa Kauhanevalla useissa allikoissa ja Kauhalammin lahdelmissa (Anttila ym. 2019). Ilmiö saattaa selittyä allikoiden pohjaturpeen pintaan pullahtamisella, joka voi olla yksi allikoiden umpeenkasvua edistävä tekijä. Ruoppakuljuehitystä havaittiin myös tutkimusalueen itäosassa vuosina 2014 ja 2017, mutta ruoppakuljuvaihetta edelsi tässä tapauksessa kasvipeitteinen jakso.

Tämän tutkimuksen tulosten perusteella vanhat ilmakuvat soveltuvat hyvin keidassoiden pintarakenteen ja erityisesti allikoiden havainnointiin. Tämä tulos on linjassa aiempien havaintojen kanssa (Tahvanainen 2011; Granlund ym. 2021; Kolari ym. 2022). Ilmakuvat ovat radiometriseltä laadultaan kohtalaisen korkealuokkaisia ja spatiaaliselta erottelukyvyltään riittäviä tarkasteltavan ilmiön esiintymisen mittaamiseen. Lopputuloksessa on kuitenkin jonkin verran epätarkkuutta, joka johtuu pääasiassa georeferoinnin virheistä sekä ortorektifoinnin puutteesta, mikä joissain kuvissa aiheuttaa sekä perspektiivivirheitä että optiikasta johtuvia vääristymiä, mikäli kohde oli kuva-alueen reunalla. Aineistolle ei ollut käytettävissä ortorektifointiin vaadittavia

tietoja. Pääasiallisin virhelähde ilmakuvia käytettäessä on kuvausajankohdan vaihtelu, sillä suon vesiolosuhteiden vuodenaikaisvaihtelu on suhteellisen voimakasta, ja kuvausvuosien välillä voi olla myös eroja.

Allikoiden lukumäärän ja pinta-alojen muutoksen tarkastelu ilmakuvien perusteella objektiperusteista kuvien segmentointia ja ohjattua luokittelua käyttäen osoittautui toimivaksi menetelmäksi. Objektiperusteinen segmentointi auttoi poistamaan kuvista puuston ja muiden pienialaisten piirteiden aiheuttaman kohinan, mikä paransi luokittelutulosta pikselipohjaista ohjattua luokittelijaa käytettäessä. Allikot ovat keidassuon pintarakenteen piirteistä selkeimmin erottuvia. Ne poikkeavat kooltaan, muodoltaan ja spektriominaisuuksiltaan suon muista piirteistä, joten ne soveltuvat hyvin objektiperusteisilla menetelmillä tarkasteltaviksi (vrt. Blaschke ym. 2014). Aiemmissä tutkimuksissa on avovesipintojen lisäksi tarkasteltu myös muiden pintatyyppien pinta-aloissa tapahtuvia ajallisia muutoksia, ja tulokset ovat olleet kohtalaisen hyviä (esim. Tahvanainen 2011; Kolari ym. 2022). Kuitenkin laajempaan suon pintarakenteen tai kasvillisuuden muutosten tarkasteluun sekä vedenpinnan vaihtelun selvittämiseen tarvittaisiin maastossa kerättyä havaintoaineistoa (Kolari ym. 2022; Steenvoorden ym. 2022).

Kuvia segmentoidessa havaittiin ero vanhempien ja uudempien ilmakuvien välillä: vanhempien ilmakuvien segmentoinnissa riitti alhaisen spektraalisen yksityiskohtaisuuden parametriarvo, mutta uudemmissa hyvä tulos saatiin korkealla spektraalisella yksityiskohtaisuudella. Ero saattaa selittyä filmimateriaalin kehittymisellä ja eroilla kuvauskalustossa – ilmakuvien metatietojen ja filmin merkintöjen perusteella ilmakuvat on 1960-luvulle asti otettu Zeissin kameralaitteistolla ja 1970-luvulta alkaen Wildin kameralaitteistolla. Segmentointimenetelmän perustuminen liikkuvan ikkunan keskiarvoon aiheutti ongelmia tilanteissa, joissa pienikokoista tummaa allikkoa reunusti hyvin heijastava kasvillisuus – segmentointimenetelmä ei siis erottanut tummaa allikkoa ympäristöstään, koska kirkas reunus nosti kohteen heijastavuuden keskiarvon ympäristönsä tasolle. Carreira-Perpiñánin (2015) mukaan mean shift -menetelmä toimii huonosti

tilanteissa, joissa klusterien määrässä tapahtuu äkillisiä muutoksia. Toinen ongelmatapaus oli aalokko sekä siihen liittyvät auringon heijastukset, jolloin vesipinnan heijastavuus oli keskimäärin sama kuin suokasvillisuuden.

Osa tarkastelujakson alkupuolella havaitusta allikoiden pinta-alan noususta saattaa liittyä kuvausajankohtien eroihin ja siten kosteuden ja kasvillisuuden vuodenaikaisvaihteluun. Tarkastelumme perusteella korrelaatio ilmakuvien kuvausajankohdan ja allikoiden lukumäärän tai pinta-alan välillä ei kuitenkaan ollut selkeä, mutta yhteyden selvittämistä haittasi vähäinen havaintojen lukumäärä. Kasvukauden vaiheen vaikutus suon kosteusolosuhteisiin voi olla merkittävää (Amani ym. 2022). Keidassuon pohjaveden pinnan tasolla ja sitä kautta allikoiden lukumäärällä ja laajuudella on yhteys edellisen talven lumimäärään (Silvan & Jokinen 2016).

Keväisin suolle kertyvät sulamisvedet muodostavat runsaasti sekundäärisiä allikoita, jotka kasvukauden edetessä häviävät. Satelliittikuvatarkastelun perusteella Kauhanevalla sekä allikoiden lukumäärä ja pinta-ala vähenivät huomattavasti kasvukauden aikana. Häädeteitaalla allikoiden lukumäärä kuitenkin lisääntyi, vaikka pinta-ala väheni. Tämä selittyy suurempien allikoiden lahdelmien kuroutumisella omiksi allikoikseen kesän edetessä. Kauhanevalla tutkittu keidassuo on kooltaan Häädeteidasta suurempi ja sinne kertyy enemmän sulamisvesiä, jotka suon keskiosasta reunaan kohti virratessaan kertyvät keskuslaakion reunaan sekundääriksiksi allikoiksi. Suurempi sulamisvesikertymä ja sitä kautta suurempi matalien, kuivumiselle herkkien sulamisvesiallikoiden osuus saa aikaan pidemmälle etenevän kuivumiskehityksen kesän kuluessa. Häädeteitaalla ylipäätään suurempi osuus allikoista lienee primäärejä, syviä allikoita, jotka säilyvät matalia sulamisvesiallikoita paremmin ja joiden kasvukauden aikaiset muutokset ovat pinta-alamuutoksia, ei lukumäärämuutoksia.

PlanetScope-kuvat soveltuvat hyvin keidasoiden pintarakenteen havainnointiin. Kerran päivässä otetuista kuvista voidaan valita kuvausajankohta ilmakuvia tarkemmin, joten vesiolosuhteiden vuodenaikaisvaihtelu voidaan huomioida paremmin. Ortorektifioituina toimitetuissa kuvissa on kuitenkin havaittavissa jonkin verran

perspektiivistä tai georeferoinnista johtuvaa virtettä. Planetscope-kuvia on saatavilla vasta 2016 alkaen, joten pitkän ajanjakson tarkastelu niitä käyttäen ei ole mahdollista. Kuvien spatiaalinen erotuskyky oli riittävä allikoiden erottamiseen, mutta kuvien radiometrinen laatu ei ole kovinkaan korkea eivätkä kuvat näytä yhtä teräviltä kuin esimerkiksi ilmakuvat (Frazier & Hemingway 2021). Lisäksi Kauhanevan PlanetScope-kuvien vertailun tuloksiin on syytä suhtautua varauksella, sillä Kauhanevan heinäkuun ja Häädetkeitaan PSB.SD-sensorin kuvista muodostetuissa harmaasävykuvissa on enemmän kohinaa kuin Kauhanevan toukokuun PS2-sensorin kuvassa, mikä todennäköisesti johtuu rannikon sinisen (coastal blue) aallonpituuskaistan sisällyttämisestä pankromaattiseen RGB+lähi-infrapuna-harmaasävykomposiittikuvaan. Siten Kauhanevan satelliittikuvat eivät ole keskenään täysin vertailukelpoisia. PlanetScope-kuvien vaihtoehtoina voisi käyttää myös 10 metrin spatiaalisen erottelukyvyn Sentinel-2-kuvia, joita on saatavilla vuodesta 2015. Pitkäaikaiseen seurantaan olisi mahdollista käyttää myös 30 metrin spatiaalisen erottelukyvyn Landsat-kuvia (Kolari ym. 2022), joiden ajallinen resoluutio on kuitenkin kohtalaisen alhainen.

Tulosten perusteella voidaan olettaa, että keidassoiden allikoiden määrän ja pinta-alan muutoksilla voi olla yhteys ilmaston lämpenemiseen. Suhteellisen nopea, muutaman vuosikymmenen aikana tapahtunut muutos ei todennäköisesti ole osa suon normaalia, jopa tuhansia vuosia kestävää sukkessiokehitystä, vaan ulkoisten olosuhteiden muutoksen aiheuttamaa. Umpeenkasvun aiheuttama avovesipintojen vähenemistä aapasoilla ovat kuvanneet mm. Tahvanainen (2011), Granlund ym. (2021) ja Kolari ym. (2022). Kauhanevan osalta havaittuun muutokseen voi välillisesti vaikuttaa myös Nummikankaalla ja Pohjankankaalla tapahtuva pohjaveden otto. Se ei kuitenkaan voi selittää Häädetkeitaalla havaittua muutosta. Pohjaveden ottoon Kauhanevan ympäristössä liittyvistä velvoitetarkkailupisteistä saatavilla olevan pohjaveden pinnankorkeusaineiston tarkastelu yhdessä pohjaveden pumppaustietojen kanssa voisi kuitenkin tuoda arvokasta lisätietoa alueen pohjavesiolosuhteiden vaihtelusta.

Allikoiden pinta-alan ja lukumäärän vaihtelun mekanismi voi liittyä talvien lumisuuden vähe-

nemiseen (Brown & Mote 2009), joka vähentää keväisten sulamisvesien määrää soilla, mikä puolestaan laskee soiden pohjaveden pintaa. Lisäksi kesäaikaisten kuivien kausien lisääntyminen todennäköisesti edesauttaa pohjaveden pinnan alhaalla pysymistä (Pearson ym. 2015). Pohjaveden pinnan alenemisen määrää ei senttimetreinä tässä käytetyillä menetelmillä pysty suoraan arvioimaan, mutta suuruusluokka on todennäköisesti lähellä Roulet ym. (1992) esittämää 14–22 cm muutosta. Vedenpinnan aleneminen voi näkyä soilla allikoiden lukumäärän ja pinta-alan vähenemisenä.

Ruuhijärven (2018) mukaan ilmaston lämpeneminen kohti keidassoiden kehityksen alkuvaiheessa vallinneita Atlanttisia ilmasto-olosuhteita voi johtaa viileämmän ilmastovaiheen aikana kehittyneen selväpiirteisen kermi-kulju-rakenteen häviämiseen. Vedenpinnan aleneminen keidassoilla voi myös altistaa suot metsittymiselle (Laiho ym. 2003), mikä saattaa muuttaa paikallislilmastoa (Lohila 2010). Lohilan ym. (2010) mukaan vaikutukset voivat lisääntyvän haihdunnan kautta olla osin paikallislilmastoa viilentäviä, mutta erityisesti avosoiden väheneminen vähentää lumipeitteen albedoa, jolloin suurempi määrä auringon säteilyenergiasta sitoutuu maaperään. Tällä voi olla ilmastoa lämmittävä vaikutus. Toisaalta lumipeitteen väheneminen ja aikaisempi sulamisajankohta voi edesauttaa tehokkaasti hiiltä sitovien mättäitä muodostavien rahkasammalajien (esim. *Sphagnum fuscum*) leviämistä ja kasvua. Tämä ombrotrofiaa voimistava kehitys voi viilentää ilmastoa (Silvan & Jokinen 2016). Yllä mainitut näkökohdat korostavat soiden monipuolista roolia suhteessa ilmastoon.

Johtopäätökset

Tässä työssä tarkasteltiin 70 vuotta pitkän ilmakehävaihtelun avulla keidassoiden allikoiden määrässä ja pinta-alassa tapahtuneita muutoksia ja satelliittikuvien avulla kasvukauden sisäisiä muutoksia. Tulosten mukaan tutkimusalueiden allikoiden määrä on vaihdellut tutkimusjakson aikana, ollen suurimmillaan 1960- ja 1970-luvuilla ja sittemmin vähentynyt siten, että vuoden 2017 ilmakuvalla lukumäärä on 5–14 % ja pinta-ala 7–15 % pienempi kuin tutkimusjakson alussa,

vuosien 1947 ja 1948 ilmakuvilla. Tyypillisen kasvukauden aikana allikoiden pinta-ala vähennee 7–18 %. Kasvukauden aikaiset muutokset havainnollistavat, että pitkäaikaisaika-sarjojen yksittäisissä havainnoissa voi olla virheitä, jos eri vuosien havainnot on tehty kasvukauden eri aikana tai sääoloiltaan poikkeuksellisina vuosina. Tulokset viittaavat siihen, että keidassoilla tapahtuu kaukokartoitusmenetelmin havaittavia pintarakenteen muutoksia, joilla on todennäköisesti kytkös ilmasto-olosuhteiden muutokseen.

Kiitokset

Tämä artikkeli perustuu Aalto-yliopiston Geoinformatiikan maisteriohjelmassa tehtyyn opinnäytetyöhön (Talvitie 2022) ja on tehty yhteistyössä Lauhanvuori - Hämeen kangas UNESCO Global Geoparkin, Luonnonvarakeskuksen ja Metsähallituksen kanssa. Kiitämme professori Miina Rautiaista Aalto-yliopistosta työn kommentoinnista ja erikoistutkija Markku Saarista Luonnonvarakeskuksesta soiden hydrologiaa ja kehitystä avaavista keskusteluista. Kiitämme myös Juha-Pekka Hostasta ja Antti Sallista arvokkaista kommentaiteista ja kehitysehdotuksista käsikirjoitusta koskien.

Kirjallisuus

- Aario, L. 1932. Pflanzentopographische Moorruntersuchungen in N-Satakunta. *Fennia* 55(1): 1–189.
- Aartolahti, T. 1966. Keidassoiden pinnanmuodosta ja niiden kehityksestä. *Suo* 17(2): 23–29.
- Amani, M., Brisco, B., Warren, R., DeLancey, E. R., Seydi, S.T. & Poncos, V. 2022. Wetland hydroperiod analysis in Alberta using InSAR coherence data. *Remote Sensing* 14(14): 3469. <https://doi.org/10.3390/rs14143469>
- Anttila, V., Hermansson, T., Lindholm, T., Saarinen, M., Talvitie, P. & Vesterinen, P. 2019. Geologiaa, suokulttuuria ja suoluonnon helmiä. Suoseuran retki lounaisen Suomenselän rajamaiden soille 14.8.–15.8.2018. *Suo - Mires and peat* 70(1): 21–32. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.01.013>
- Blaschke, T., Hay, G. J., Kelly, M., Lang, S., Hofmann, P., Addink, E., Feitosa, R.Q., van der Meer, F., van der Werff, H., van Coillie, F. & Tiede, D. 2014. Geographic object-based image analysis—towards a new paradigm. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing* 87: 180–191. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.09.014>
- Brown, R.D., & Mote, P.W. 2009. The response of Northern Hemisphere snow cover to a changing climate. *Journal of Climate* 22(8): 2124–2145. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2665.1>
- Carreira-Perpinán, M.A. 2015. A review of mean-shift algorithms for clustering. arXiv preprint arXiv:1503.00687.
- Chasmer, L., Mahoney, C., Millard, K., Nelson, K., Peters, D., Merchant, M., Hopkinson, C., Brisco, B., Niemann, O. Montgomery, J., Devito, K. & Cobbaert, D. 2020. Remote sensing of boreal wetlands 2: methods for evaluating boreal wetland ecosystem state and drivers of change. *Remote Sensing* 12(8): 1321. <https://doi.org/10.3390/rs12081321>
- Dissanska, M., Bernier, M., & Payette, S. 2009. Object-based classification of very high-resolution panchromatic images for evaluating recent change in the structure of patterned peatlands. *Canadian Journal of Remote Sensing* 35(2): 189–215. <https://doi.org/10.5589/m09-002>
- Dronova, I. 2015. Object-based image analysis in wetland research: a review. *Remote Sensing* 7(5): 6380–6413. <https://doi.org/10.3390/rs70506380>
- Ervasti, J. 2021. Ombrotrofikaation tutkiminen ilmakuvista ohjatulla luokituksella Pohjois-Karjalan soilla 1944–2017. Pro Gradu -tutkielma, Itä-Suomen yliopisto. 69 s. <http://urn.fi/urn:nbn:fi:uef-20210919>
- Planet Labs Inc. 2020. Planet Imagery Product Specifications. <https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/37627/Planet-combined-imagery-product-specs-2020.pdf?text=Combined-Imagery-Product-Spec.pdf>. [Viitattu 9.6.2022]
- Frazier, A.E., & Hemingway, B.L. 2021. A technical review of planet small sat data: practical considerations for processing and using planetscope imagery. *Remote Sensing* 13(19): 3930. <https://doi.org/10.3390/rs13193930>
- Granlund, L., Vesakoski, V., Sallinen, A., Kolari, T. H., Wolff, F. & Tahvanainen, T. 2021.

- Recent lateral expansion of *Sphagnum* bogs over central fen areas of boreal aapa mire complexes. *Ecosystems* 25: 1455–1475. <https://doi.org/10.1007/s10021-021-00726-5>
- Heikkilä, R., Kuznetsov, O., Lindholm, T., Aapala, K., Antipin, V., Djatshkova, T. & Shevelin, P. 2001. Complexes, vegetation, flora and dynamics of Kauhaneva mire system, western Finland. *The Finnish Environment* 489. 97 s.
- Häyrinen, U. 1980. Kauhaneva - Etelä-Pohjanmaan komein kermikeidas. Teoksessa: Havas, P. (päätoim.), Suomen Luonto. Suot. (Finnish nature - Mires). Kirjayhtymä, Helsinki. s. 192–196.
- Ilmatieteen laitos 2022. Kuinka tilaan ilmastotilastoja tai säähavaintosarjoja? <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/ilmastotilastot>. [Viitattu 15.9.2022]
- Kalpio, S. 1998. Häädetkeitaan luonnonpuiston kasvillisuus kesällä 1996. Metsäntutkimuslaitos. Tutkimusmetsäpalvelut ja Parkanon tutkimusasema. 76 s. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-1598-3>
- Kendall, M.G. 1975. Rank correlation methods, 4. painos. Griffin, Lontoo. 202 p.
- Kolari, T.H., Sallinen, A., Wolff, F., Kumpula, T., Tolonen, K., & Tahvanainen, T. 2022. Ongoing fen–bog transition in a boreal aapa mire inferred from repeated field sampling, aerial images, and Landsat data. *Ecosystems* 25(5): 1166–1188. <https://doi.org/10.1007/s10021-021-00708-7>
- Kärkkäinen, K. & Siivonen, N. (2003). Häädetkeitaan Natura-alueen kasvillisuus vuonna 2000. Metsäntutkimuslaitos. Parkanon tutkimusasema ja tutkimusmetsäpalvelut. 109 s. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-1888-5>
- Laiho, R., Vasander, H., Penttilä, T. & Laine J. 2003. Dynamics of plant-mediated organic matter and nutrient cycling following long-term water-level drawdown in boreal peatlands. *Global Biogeochem Cycles* 17(2): 1053. <https://doi.org/10.1029/2002GB002015>.
- Lohila, A., Minkkinen, K., Laine, J., Savolainen, I., Tuovinen, J.P., Korhonen, L., Laurila, T., Tietäväinen, H. & Laaksonen, A. 2010. Forestation of boreal peatlands: impacts of changing albedo and greenhouse gas fluxes on radiative forcing. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 115: G04011. <https://doi.org/10.1029/2010JG001327>
- Maanmittauslaitos. 2021. Maanmittauslaitoksen historiallisten ilmakuvien arkisto avautuu verkossa tänään. <https://www.maanmittauslaitos.fi/ajankohtaista/maanmittauslaitoksen-historiallisten-ilmakuvien-arkisto-avautuu-verkossa-tanaan>. [Viitattu 15.5.2023]
- Mann, H.B. 1945. Non-parametric tests against trend. *Econometrica* 13: 163–171. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- Mäensivu, A. 2017. Häädetkeitaan luonnonpuiston soistumiskehitys. Pro Gradu -tutkielma. Helsingin yliopisto. 68 s. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:hulib-201705174146>
- Paasio, I. 1935. Häädetkeitaan, erään länsisuomalaisen kermikeidassuon kasvillisuus. *Annales Botanici Societatis Zoologicae Botanicae Fennicae "Vanamo"* 6: 1–35.
- Pearson, M., Penttilä, T., Harjunpää, L., Laiho, R., Laine, J., Sarjala, T., Silvan, K. & Silvan, N. 2015. Effects of temperature rise and water-table-level drawdown on greenhouse gas fluxes of boreal sedge fens. *Boreal Environment Research* 20: 489–505.
- Päivänen, J. 2007. Suot ja suometsät - järkevän käytön perusteet. Metsäkustannus. ISBN 978-952-5694-02-4. 368 s.
- Rehell, S., Huttunen†, A. & Kondelin, H. 2012. The development of patterning on a succession series of aapa-mire systems on the land-uplift coast of northern Ostrobothnia, Finland. *The Finnish Environment* 38: 51–64.
- Richards, J.A. 2022. Supervised classification techniques. In: *Remote sensing digital image analysis*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-82327-6_8
- Roulet, N., Moore, T.I.M., Bubier, J., & Lafleur, P. 1992. Northern fens: methane flux and climatic change. *Tellus B* 44(2): 100–105. <https://doi.org/10.3402/tellusb.v44i2.15429>
- RSIS 2022. Ramsar sites information service. <https://rsis.ramsar.org/ris/1511>. [Viitattu 1.4.2022]
- Ruuhijärvi, R. & Hosiasluoma, V. 1980. Suoluontoa pohjoisesta etelään. Teoksessa: Havas, P. (päätoim.) Suomen luonto 3. Suot. Kirjayhtymä, Helsinki. s. 123–164.
- Ruuhijärvi, R. 2018. Ilmastonmuutoksen mah-

- dollisia vaikutuksia suokasvillisuudessa. Teoksessa: Kontula, T. & Raunio, A. Suomen Luontotyypien uhanalaisuus 2018. Luontotyypien punainen kirja. Osa I - tulokset ja arvioinnin perusteet. Suomen ympäristö 5: 150–151.
- Ruuhijärvi, R. & Hosiasluoma, V. 1980. Suoluontoa pohjoisesta etelään. Teoksessa: Havas, P. (päätoim.) Suomen luonto 3. Suot. Kirjayhtymä, Helsinki. s. 123–164.
- Räsänen, A. 2022. Ilma- ja satelliittikuvat soiden vesitalouden seurannassa. *Vesitalous* 2: 28–31.
- Räsänen, A., Rusanen, A., Kuitunen, M., & Lensu, A. 2013. What makes segmentation good? A case study in boreal forest habitat mapping. *International Journal of Remote Sensing*, 34(23): 8603–8627. <https://doi.org/10.1080/01431161.2013.845318>
- Räsänen, A., Tolvanen, A., & Kareksela, S. 2022. Monitoring peatland water table depth with optical and radar satellite imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 112: 102866. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102866>
- Sallinen, A., Tuominen, S., Kumpula, T. & Tahvanainen, T. 2019. Undrained peatland areas disturbed by surrounding drainage: a large-scale GIS analysis in Finland with a special focus on aapa mires. *Mires and Peat* 24(38): 1–22.
- Seppä, H. 1994. Keidassoiden pienmuodot - kasvitiedettä ja geomorfologiaa (The hummock and hollow patterns of the peat bogs). *Terra* 106(3): 193–203.
- Seppä, H. 2002. Mires of Finland: regional and local controls of vegetation, landforms, and long-term dynamics. *Fennia* 180 (1–2): 43–60.
- Silvan, N., & Jokinen, K. 2016. Early snowmelt enhances the carbon sequestration of hummock-forming *Sphagnum* mosses on boreal wetlands. *Open Journal of Ecology* 6(3): 103–112. <https://doi.org/10.4236/oje.2016.63011>
- Solantie, R. 1986. Suoyhdistymätyypeistä suhteessa ilmastollisiin ja hydrologisiin vyöhykkeisiin. Summary: The zonation of peatland complex types in relation to climatic and hydrological zones. *Suo* 37(3–4): 73–85.
- Steenvoorden, J., Limpens, J., Crowley, W., & Schouten, M.G.C. 2022. There and back again: forty years of change in vegetation patterns in Irish peatlands. *Ecological Indicators* 145(7): 109731. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109731>
- SYKE 2015. Suokasvillisuusvyöhykkeet. Paikatietoaineisto. <https://ckan.ymparisto.fi/dataset/suokasvillisuusvyohykkeet>. [Viitattu 8.6.2022]
- Tahvanainen, T. 2011. Abrupt ombrotrophication of a boreal aapa mire triggered by hydrological disturbance in the catchment. *Journal of Ecology* 99(2): 404–415. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2010.01778.x>
- Talvitie, P. 2021. Lauhanvuori - Hämeenkan gas UNESCO Global Geopark. *Geologi* 73(2): 58–60.
- Talvitie, P. 2022. Keidassoiden pintarakenteen muutosten havainnointi kaukokartoituksen avulla. Diplomityö, Aalto-yliopisto, Geoinformatiikan maisteriohjelma. 84 s. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-202210165918>
- Tolonen, K., & Seppä, H. 1994. Pyhtään suursoiden kasvillisuudesta, morfologiasta ja kehityspiirteistä. *Terra* 106: 211–220.
- Tolonen, K., & Suoknuuti, M. 2022. Keidassuon pintakuivoinnin muutokset viimeisten 82 vuoden aikana Pyhtään Munasuolla. *Suo* 73(2): 15–25.
- Tuominen, S. & Aapala, K. 2001. Hyvinkään Petkelsuon muutokset 1936–1997. Esimerkki eriaikaisten ilmakuvien käytöstä keidassoiden muutosten seurannassa. *Suomen Ympäristö* 490: 45–89.
- Wulder, M.A., Loveland, T.R., Roy, D.P., Crawford, C.J., Masek, J.G., Woodcock, C.E., Allen, R.G., Anderson, M.C., Belward, A.S., Cohen, W.B., Dwyer, J., Erb, A., Gao, F., Griffiths, P., Helder, D., Hermosilla, T., Hipple, J. D., Hostert, P., Hughes, M.J., Huntington, J., Johnson, D.M., Kennedy, R., Kilic, A., Li, Z., Lymburner, L., McCorkel, J., Pahlevan, N., Scambos, T.A., Schaaf, C., Schott, J.R., Sheng, Y., Storey, J., Vermote, E., Vogelmann, J., White, J.C., Wynne, R.H. & Zhu, Z. 2019. Current status of Landsat program, science, and applications. *Remote sensing of environment* 225: 127–147. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.015>

Ymparisto.fi. 2023A. Häädetkeidas. <https://www.ymparisto.fi/fi/luonto-vesistot-ja-meri/luonnon-monimuotoisuus/suojelu-ennallistaminen-ja-luonnonhoito/natura-2000-alueet/haadetkeidas>. [Viitattu 6.11.2023]

Ymparisto.fi. 2023B. Kauhaneva-Pohjankangas. <https://www.ymparisto.fi/fi/luonto-vesistot-ja-meri/luonnon-monimuotoisuus/suojelu-ennallistaminen-ja-luonnonhoito/natura-2000-alueet/kauhaneva-pohjankangas-sci>. [Viitattu 6.11.2023]

Summary

Raised bogs are the most common combined mire type in Southern Finland. They are dependent on precipitation to provide water and nutrients. The surface of the raised bog is characterized by dry ridges, hummocks, and wet depressions, hollows. Climate warming reduces winter snowfall and increases evaporation, which is estimated to lower the water level in raised bogs. This can cause changes in the local ecosystem and accelerate climate warming locally. However, relatively little research has been done on long-term changes in raised bogs.

In this work, changes in the amount and area of open water hollows is determined over the course of 70 years with the help of aerial and satellite images. The research sites are two raised bogs in Western Finland: Häädetkeidas mire and Kauhaneva mire. Long-term change is monitored using object-based segmentation and supervised maximum likelihood classification of aerial images. Short-term change during a single growing season is determined using satellite images and maximum likelihood classification. The results are compared to weather data from the area.

Based on the results, the number and surface area of open water hollows have varied during the review period. From the 1940s to the 1970s, there has been an increase in surface areas and numbers, after which they have decreased. Compared to the situation in the 1940s, the number of springs in Häädetkeidas mire has decreased by 13.8% and the area has decreased by 14.8%. In Kauhaneva mire, the number has decreased by 5.3% and the area has decreased by 6.3%. At the same time, the average temperature in the area has risen by more than 1 °C. However, based on satellite image analysis, the variation during a single growing season can be strong, which causes uncertainty in the interpretation of long-term changes.

The results show that both long-term and short-term surface structure changes detectable by remote sensing methods are taking place in the raised bogs. The changes are probably connected to the change in climate conditions.

Keywords: Aerial images, Climate change, Geomorphology, Maximum likelihood, PlanetScope, Raised bogs, Remote sensing, Supervised classification