



Niko Kallio

SUOMEN RANNIKON LAJISTON ELINALUEIDEN ARVIOIDUT
MUUTOKSET ILMASTONMUUTOKSESTA AIHEUTUVAN
SUOLAPITOISUUDEN ALENEMISEN MYÖTÄ

Maantieteen/geologian pro gradu -tutkielma

Turku 2019

TURUN YLIOPISTO

Luonnontieteiden ja tekniikan tiedekunta

Maantieteen ja geologian laitos

Kallio, Niko: Suomen rannikon lajiston elinalueiden arvioidut muutokset
ilmastonmuutoksesta aiheutuvan suolapitoisuuden alenemisen myötä

Pro gradu -tutkielma, 63 sivua, 28 liitesivua

40 op, maantiede

Ohjaajat: Risto Kalliola ja Matti Sahla

Helmikuu 2019

Vesistöjen suolapitoisuus on merkittävä ympäristömuuttuja, joka vaikuttaa lajien käyttöön, elinkiertoon, lisääntymiseen ja elinalueisiin. Epäedullinen suolapitoisuus aiheuttaa eliöille osmoottista stressiä ja vaikuttaa eliöiden aineenvaihduntaan. Tässä tutkimuksessa tarkastellaan Suomen rannikon ja samalla koko Itämeren lajiston elinalueiden mahdollisia muutoksia seuraavan 50 vuoden aikana ilmastonmuutosta seuraavan suolapitoisuuden alenemisen myötä. Tutkimuksessa hyödynnetään paikkatietoaineistoja, jotka sisältävät tarkasteltavien lajien havaintopisteitä sekä ympäristömuuttujia Suomen aluevesiltä. Tarkasteltavat lajit ovat sinisimpukka, meriruoho, murtovesisieni ja vesisammal. Näiden aineistojen ja suolapitoisuuden vähentymistä kuvaavien mallien avulla selvitettiin mahdolliset muutokset elinalueissa kolmessa eri skenaariossa. Tutkimuksessa havaittiin, että mereisille lajeille mahdolliset elinalueet vähenevät runsaasti suolapitoisuuden alentuessa. Sinisimpukan elinalueet rajoittuvat skenaarioiden mukaan Saaristo- ja Selkämerelle, kun taas meriruohon elinalueet katoavat Suomen rannikolta kaikissa skenaarioissa. Toisaalta makeassa vedessä viihtyvien lajien mahdolliset elinalueet lisääntyvät huomattavasti tutkimusalueella. Murtovesisieni levittäytyy koko tutkimusalueelle asteittain suolapitoisuuden alentuessa, kun taas vesisammalelle mahdolliset elinalueet kattavat koko Suomen rannikon jo pienenkin suolapitoisuuden alentumisen myötä. Suolapitoisuuden alentuessa ja merellisten lajien vähentyessä Itämeren ekosysteemi muuttuu makeiden vesistöjen kaltaiseksi. Sinisimpukka ja meriruoho ovat merkittäviä avainlajeja Itämerellä, joiden katoaminen saattaa vaikuttaa alueen biodiversiteettiin merkittävästi. Toisaalta makean veden lajien levittäytyminen saattaa korvata poistuvien lajien merkitystä. Tulosten perusteella on myös syytä pohtia luonnonsuojelualueiden merkitystä eri alueilla sekä suolapitoisuuden alenemisen myötä muuttuvan hydrologian vaikutuksia ekosysteemeihin Itämerellä.

Asiasanat: suolapitoisuus, Itämeri, ilmastonmuutos, biodiversiteetti, avainlaji

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

UNIVERSITY OF TURKU
Faculty of Science and Engineering
Department of Geography and Geology

Kallio, Niko: The assessed changes of habitats of different species at Finnish coastline after the decrease in salinity levels caused by climate change

Master's Thesis, 63 pages, 28 appendixes

40 ECTS

Geography

Advisers: Risto Kalliola and Matti Sahla

February 2019

The salinity levels in water environment are significant and they affect the behavior, lifecycle, breeding and habitat of many species. If the salinity in the environment isn't favorable to a certain species, it will suffer from osmotic stress and while it tries to compensate the salinity levels of its own body, the level of metabolism will rise. This study will focus on how the habitats of different species will change at Finnish coastline and overall on the Baltic Sea after the decrease in salinity levels caused by the climate change during next 50 years. This study will utilize Geographical Information System (GIS) -data which contains the sightings of observed species and the values of environmental variables. The species that are observed in this study are blue mussel, eelgrass, brackish water sponge and common water moss. With this data and models that describe the salinity changes this study was able to find out the possible changes in habitats in three different scenarios. The results pointed out that the marine species will lose major parts of their habitat during the decrease in salinity. The habitats of blue mussel will only consist of Archipelago- and Bothnian Sea according to the scenarios while the eelgrass loses all its habitats at the Finnish coastline in every scenario. On the other hand, the freshwater species will gain more possible habitat zones in the study area. Brackish water sponge will spread gradually on the whole study area while common water moss will spread to every possible habitat even with the slightest change in the salinity. These changes in the future of the Baltic Sea are intriguing since the decrease in salinity and marine species will change the environment into more freshwater like. Blue mussel and eelgrass are also significant key species in the Baltic Sea and their disappearance might cause significant changes in the biodiversity. On the other hand, the spreading of new freshwater species might mitigate that effect. These results should also be considered when planning conservation areas and assessing on how the changing hydrology might affect the ecosystems in the Baltic Sea.

Keywords: salinity, Baltic Sea, climate change, biodiversity, key species

The originality of this thesis has been checked in accordance with the University of Turku quality assurance system using the Turnitin OriginalityCheck service.

Sisällys

1 Johdanto	1
2 Teoreettinen viitekehys.....	4
2.1 Suolapitoisuuden vaikutukset lajistolle	4
2.2 Itämeri	6
2.2.1 Ympäristö	6
2.2.2 Ilmasto	9
2.2.3 Ilmastonmuutos.....	10
2.2.4 Suolapitoisuus	12
2.3 Itämeren lajisto	15
2.3.1 Lajiston yleispiirteet.....	15
2.3.2 Sinisimpukka, <i>Mytilus trossulus</i>	16
2.3.3 Meriruoho, <i>Zostera marina</i>	19
2.3.4 Vesisammaleet	21
2.3.5 Murtovesisieni, <i>Ephydatia fluviatilis</i>	23
3 Aineistot ja menetelmät.....	24
3.1 Tutkimusalue.....	24
3.2 Aineistot.....	25
3.3 Menetelmät	27
3.3.1 Paikkatietomallinnukset.....	27
3.3.2 Expert Assisted Distribution Model, EADM.....	35
4 Tulokset	37
4.1 Sinisimpukan elinalueet heikentyvät.....	37
4.2 Meriruoho katoaa Suomen rannikolta	40
4.3 Murtovesisieni levittäytyy uusille elinalueille asteittain	42
4.4 Vesisammal levittäytyy koko Suomen rannikolle.....	46
5 Keskustelu.....	49
5.1 Tulosten merkitys	49
5.2 Lajiston muutokset	51
5.3 Hydrologiset muutokset	57
5.4 Merialueiden suunnittelu	60
6 Johtopäätökset.....	62
Kiitokset.....	63
Lähteet	64
Liitteet	67

1 Johdanto

Rannikkoalueet ovat monille lajeille tärkeitä elinympäristöjä. Rannikot tarjoavat merissä ja niiden läheisyydessä eläville lajeille ravintoa, suojaa, lisääntymisalueita ja muutenkin otollisen ympäristön. Rannikkoalueet ovat myös kautta aikojen olleet ihmisille elintärkeä ympäristö, joka tarjoaa ravintoa, kuljetusyhteyksiä sekä virkistysmahdollisuuksia. Myös tieteelle rannikot ovat erittäin mielenkiintoinen tutkimuskohde, jossa voidaan tarkastella erilaisten habitaattien ja lajien vuorovaikutuksia. Myös rannikoilla tapahtuvat muutokset, niin luonnon kuin ihmisenkin aiheuttamat, ovat erittäin mielenkiintoisia ja tärkeitä tutkimuksen aiheita ja joihin on syytä kiinnittää huomiota tulevaisuuden kannalta. Rannikkoalueisiin kohdistuvia muutoksia onkin tutkittu paljon ympäri maailmaa, ja tämä tutkimus on yksi osa näitä tutkimuksia ja keskittyy tarkemmin Itämereen kohdistuviin muutoksiin ilmastonmuutoksen myötä.

Itämeri on erittäin sulkeutunut murtovesiallas, missä pienestä koostaan huolimatta elinolosuhteet muuttuvat paljon alueesta riippuen. Muihin maailman rannikkoalueisiin verrattuna Itämeri on kovin erilainen. Sen ympäristöä voidaan verrata maailman merillä esiintyviin jokisuistoihin, mutta huomattavasti suuremmassa mittakaavassa. Itämerestä tekee myös erikoisen se, että sen vedenalainen ympäristö muuttuu rajusti jo lyhyilläkin etäisyyksillä ja samalla myös ympäristömuuttujat vaihtelevat huomattavasti. Alueellisten erojen lisäksi Itämeren ympäristössä tapahtuu myös suuria muutoksia ajallisesti. Vuodenaikojen vaihdellessa myös Itämeren olosuhteissa tapahtuu merkittäviä muutoksia. Näin suuret muutokset vaikuttavat samalla alueen elämän edellytyksiin ja siten alueella elävien lajien elämään. Nämä alueelliset ja ajalliset vaihtelut korostuvat erityisesti Itämeren pohjoisosissa, Suomen rannikoilla (Viitasalo ym. 2017a). Näiden normaaleiden alueellisten ja ajallisten muutosten lisäksi Itämeren ympäristöä koettelevat tulevaisuudessa myös ilmastonmuutoksesta aiheutuvat muutokset (Snoeijis-Leijonmalm & Andrén 2017). Ilmastonmuutoksen myötä tapahtuvat muutokset Itämeressä saattavat vaikuttaa moniin lajeihin haitallisella tavalla. Muutokset saattavat myös olla niin suuria ja nopeita, että lajit eivät välttämättä kykene sopeutumaan näihin muutoksiin. Toisaalta osalle lajeista nämä Itämereen mahdollisesti kohdistuvat muutokset saattavat olla tervetullut muutos kohti parempia elinalueita. Pienilläkin muutoksilla ympäristössä, erityisesti vesistöissä, saattaa olla suuriakin vaikutuksia monien eri lajien elinalueisiin ja elinkiertoon.

Veden kemialliset ominaisuudet ovat vedessä eläville lajeille elintärkeitä. Kuten meille ilmanlaatu ja sen koostumus on erityisen tärkeä, ovat nämä veden ominaisuudet kaloille, nilviäisille, vesikasveille ja muille lajeille vähintäänkin yhtä tärkeitä. Happipitoisuudella, sameudella, pH:lla ja lämpötilalla on merkittävä vaikutus eri vesiympäristöissä, ja monet lajit ovatkin sopeutuneet vain tietynlaisiin

olosuhteisiin. Itämerellä yksi tärkeimmistä ja rajoittavimmista tekijöistä on vesimassan suolapitoisuus. Valtamerillä suolapitoisuus on suhteellisen yhdenmukainen kauttaaltaan, noin 34 – 36 ‰ (Hill ym. 2008: 153). Itämerellä ja valtamerien jokisuistoilla suolapitoisuudessa tapahtuu kuitenkin suuria muutoksia alueellisesti. Tanskan salmilla suolapitoisuus on lähes valtamerien luokkaa, kun taas kauempana suolapitoisuus putoaa nopeasti, päätyen lähes nolnaan promilleen Pohjanlahden ja Suomenlahden perukoilla. Suolapitoisuuden erot rajaavat monien lajien elinalueita osmoottisen stressin seurauksena. Valtamerien lajit eivät kykene elämään alhaisissa suolapitoisuuksissa, eivätkä makean veden lajit suurissa suolapitoisuuksissa.

Tässä tutkielmassa tarkastellaan, miten Suomen rannikon vesistöissä elävien lajien elinalueet mahdollisesti muuttuvat seuraavan 50 vuoden aikana ilmastonmuutoksesta aiheutuvan suolapitoisuuden alenemisen myötä. Ilmastonmuutoksen myötä sääolosuhteet muuttuvat Itämeren valuma-alueella, mikä vaikuttaa samalla myös Itämeren veden kemialliseen koostumukseen (Meier 2015). Lisääntynyt sadanta lisää Itämereen valuvan makean veden määrää ja sen seurauksena alentaa suolapitoisuutta merialueella. Itämeri tarjoaa jo ennestään suolapitoisuutensa kannalta haastavat elinolosuhteet useille eliöille. Useat lajit ovat evoluution myötä sopeutuneet tiettyyn veden suolapitoisuuteen, mikä tuottaa eliöille haasteita murtovesialtaassa. Pienetkin poikkeamat suolapitoisuudessa voivat aiheuttaa joillekin lajeille erittäin haastavat elinolosuhteet (Viitasalo ym. 2017b). Suuremmat muutokset uhkaavat jo eliön terveyttä ja saattavat jopa tehdä alueesta elinkelvottoman. Tästä syystä Itämeressä selviytyvien eliöiden on oltava mahdollisimman tehokkaita joustamaan ja sopeutumaan uusiin olosuhteisiin. Huono sopeutuminen aiheuttaa lajeille stressiä, minkä voi havaita eliön ulkoisina muutoksina: Itämeressä lajit saattavat jäädä valtamerien lajitovereitaan pienemmiksi ja esimerkiksi simpukoilla kuorien paksuudet ovat usein ohuempia. Itämeressä elää myös runsaasti makeaan veteen sopeutuneita lajeja, jotka puolestaan kärsivät meren liiallisesta suolapitoisuudesta. Itämerellä voidaankin selkeästi havaita, kuinka merialueen eteläosissa elää enemmän valtamerien lajistoa, kun taas pohjoisosissa makean veden lajistoa.

Tutkimuksessa tarkastellaan ainoastaan suolapitoisuuden ympäristömuuttujan muutoksia Itämeressä sekä sen vaikutuksia eliöiden elinalueisiin. Muut tutkimuksessa tarkasteltavat ympäristömuuttujat pysyvät vakioina. Tutkimuksessa ei myöskään huomioida Suomen rannikoilla tapahtuvaa maan kohoamista tai ilmastonmuutoksesta mahdollisesti aiheutuvaa merenpinnan kohoamista. Suolapitoisuutta säädellään The Baltic Earth Assessment of Climate Change (BACC) -järjestön luomien ilmastomallien ja niiden perusteella arvioitujen suolapitoisuuden muutosten mukaisesti (Meier 2015). Näistä muutoksista luodaan kolme erilaista skenaariota Itämerelle, joiden avulla tarkastellaan mahdollisia muutoksia

nykytilanteen ja skenaarioiden välillä. Elinalueita tarkastellaan neljän Suomen rannikolla elävien lajien osalta, joista kaksi, sinisimpukka ja meriruoho, on sopeutunut suolapitoiseen veteen ja kaksi, vesisammal ja murtovesisieni, makeaan veteen. Tällä valikoinnilla halutaan saavuttaa tuloksia, jotka esittävät molempiin ryhmiin kohdistuvat vaikutukset suolapitoisuuden muutosten myötä. Nämä lajit kokevat jo nykyisin osmoottisen stressin vaikutusta elinalueillaan Suomen rannikolla. Osmoottisella stressillä tarkoitetaan tilaa, jossa eliön oman elimistön suolapitoisuus on joko liian alhainen tai liian korkea sen elinympäristöön nähden (Hill ym. 2008: 666). Lajien elinalueisiin kohdistuvien muutosten kautta voidaan arvioida myös muihin Itämeren lajeihin kohdistuvia muutoksia muuallakin kuin Suomen rannikolla. Lisäksi voidaan arvioida, miten yhden lajin katoaminen saattaa vaikuttaa epäsuorasti muihin lajeihin esimerkiksi ravintoverkon kautta.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on mallintaa ja selvittää Suomen rannikon lajien elinalueita ilmastonmuutoksen aiheuttamien mahdollisten elinolosuhteiden muutosten myötä sekä arvioida, miten tätä tietoa voisi hyödyntää merialueiden suunnittelussa. Tuloksien avulla pohditaan myös, miten Itämeren ekosysteemi muuttuu suolapitoisuuden alentuessa ja miten suolapitoisuuden aleneminen vaikuttaa ympäristöön. Tutkimuksen hypoteesina on, että ilmastonmuutoksen myötä aiheutuvan Itämeren suolapitoisuuden alenemisen seurauksena merellisten eliöiden elinalueet pienenevät. Makean veden lajien elinalueet puolestaan kasvavat Itämerellä. Hypoteesi perustuu osmoottisen stressin vaikutukseen lajeille, sekä tietämykseen siitä, kuinka paljon suolapitoisuutta tietyt lajit kaipaavat selviytyäkseen tai lisääntyäkseen.

Tutkimuksen tavoitteita pyritään selvittämään seuraavien tutkimuskysymysten kautta:

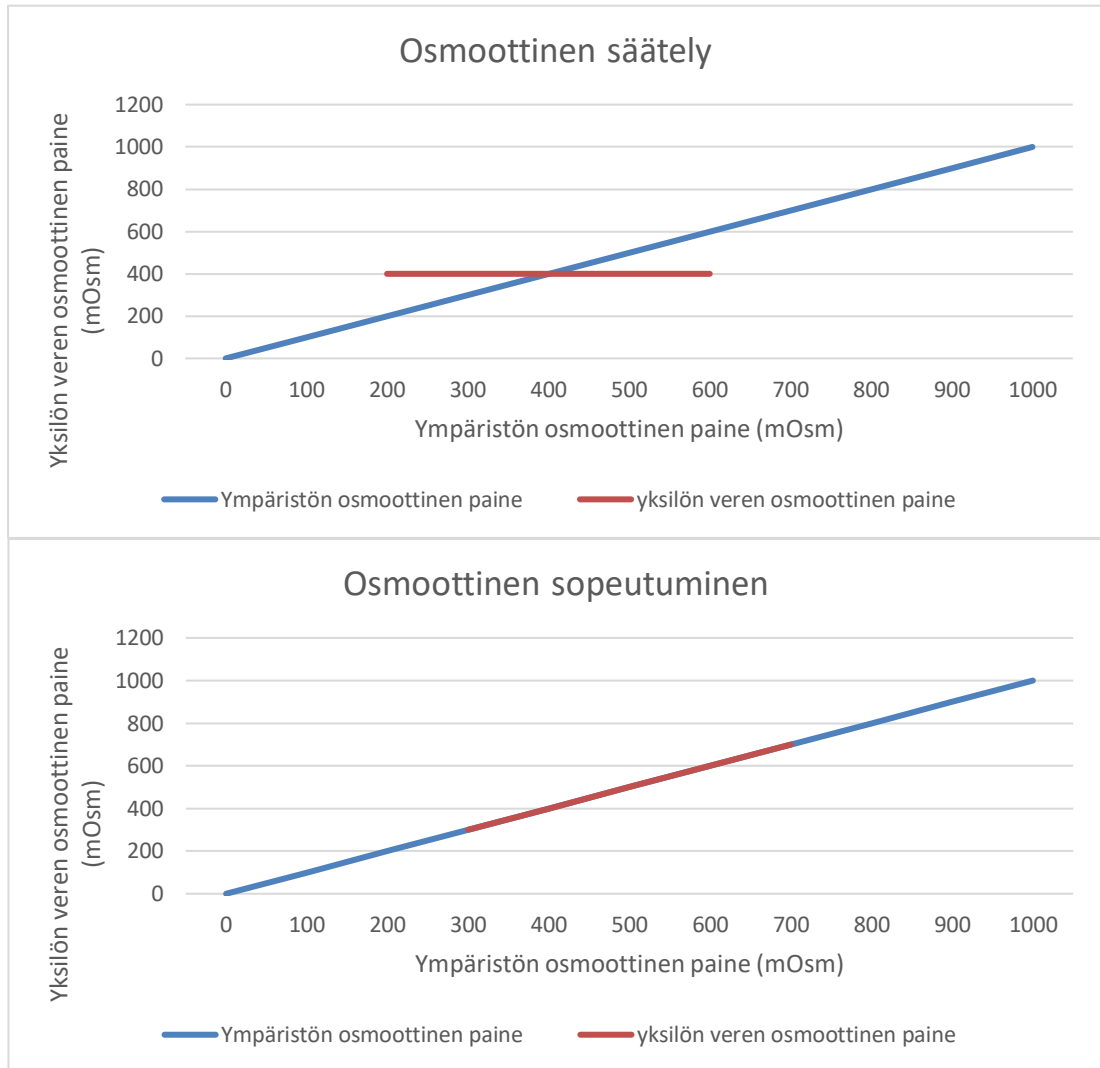
- Miten suolapitoisuuden muutokset vaikuttavat Itämerellä ja erityisesti Suomen rannikolla elävien merellisten lajien elinalueisiin?
- Mahdollistaako suolapitoisuuden aleneminen makean veden lajien levittäytymisen Suomen rannikolla ja muualla Itämerellä?
- Miten suolapitoisuuden muutokset vaikuttavat Itämeren mereisyyden käsitteeseen, ja minkälaisia hydrologisia muutoksia sillä saattaa olla Itämerellä?

2 Teoreettinen viitekehys

2.1 Suolapitoisuuden vaikutukset lajistolle

Suolapitoisuudella ja sen muutoksilla on merkittäviä vaikutuksia vesistöjen lajistolle. Suurimmat lajeihin kohdistuvat vaikutukset voidaan havaita lajien kasvussa, lisääntymisessä sekä erityisesti muutoksissa lajeille soveltuviissa elinalueissa. Vesistöissä tapahtuvat suolapitoisuuden muutokset vaikuttavat ympäristössä vallitsevaan osmoottiseen paineeseen, mikä saattaa puolestaan nostaa eliön metabolian eli energiankulutuksen tasoa (Hill ym. 2008: 153). Osmoottista painetta voidaan mitata osmoottisen konsentraation määrällä (mOsm). Lisääntynyt metabolian taso kuluttaa eliön energiaa, jolloin sitä ei riitä esimerkiksi kasvamiseen, jolloin eliö saattaa jäädä kitukasvuiseksi. Tämä on selkeästi havaittava ilmiö Itämerellä.

Eliöt kykenevät säätelemään oman kehon osmoottista painetta joko osmoottisen säätelyn tai osmoottisen sopeutumisen kautta (Kuva 1) (Hill ym. 2008: 666). Osmoottisessa sopeutumisessa eliön kehon soluissa vallitseva suolapitoisuus pyrkii vastaamaan sen ympäristössä vallitsevaan suolapitoisuuteen. Osmoottisessa säätelyssä eliö kykenee puolestaan joko lisäämään tai poistamaan nestettä kehostaan, jotta kehon suolapitoisuus säilyisi omalle keholle sopivana. Kaikki osmoottista sopeutumista hyödyntävät lajit ovat valtamerissä eläviä lajeja (Reece ym. 2011: 1000). Näillä lajeilla ei ole makean veden lajeihin verrattuna niin suurta tarvetta lisätä tai poistaa vettä kehostaan, sillä niiden kehon suolapitoisuus on sama kuin sen ympäristössä. Menetelmän hyötynä on vähäisempi energian kulutus, mutta kehon suolapitoisuus ei ole välttämättä yksilön elintoiminnoille otollisin. Osmoottista säätelyä hyödyntävät lajit elävät puolestaan sellaisilla alueilla, joissa osmoottisella sopeutumisella ei ole mahdollista selviytyä. Osmoottista säätelyä hyödyntävillä lajeilla on myös mahdollisuus sopeutua erilaisiin ympäristöihin, toisin kuin osmoottista sopeutumista hyödyntävillä. Vähäsuolaisissa eli hypo-osmoottisissa ympäristöissä osmoottista säätelyä hyödyntävät lajit joutuvat poistamaan kehostaan ylimääräisen veden, joka on kulkeutunut osmoottisen paineen vaikutuksesta kehoon. Korkeissa eli hyperosmoottisissa suolapitoisuuksissa lajit joutuvat puolestaan lisäämään kehonsa nestepitoisuutta esimerkiksi ravinnon kautta sekä poistamaan suolaa kehostaan eritteiden mukana tasatakseen osmoottisen paineen vuoksi menetetyn nesteen. Tämän keinon hyötynä on keholle otollisimman suolapitoisuuden ylläpito, mutta se kuluttaa huomattavasti enemmän energiaa kuin osmoottinen sopeutuminen.



Kuva 1. Osmoottisen sopeutumisen ja osmoottisen säätelyn periaate eliössä suolapitoisuuden muutoksissa (mOsm). Tulkinta Hill ym. 2008: 666 kaaviosta.

Monet lajit, hyödynsivät ne kumpaa tahansa menetelmää, eivät kuitenkaan kykene selviytymään suurista suolapitoisuuden muutoksista (Reece ym. 2011: 1000). Näitä lajeja kutsutaan *stenohaliineiksi* (kreik. stenos = kapea ja halos = suola). Mikäli vesimassan suolapitoisuus ja siten sen osmoottinen paine nousee tai laskee liikaa, eivät tietyt eliöt kykene enää selviytymään kyseisessä vesimassassa. Osmoottisen paineen vaikutus heikentää myös useiden lajien kykyä sopeutua muihin stressitekijöihin, kuten matalaan happipitoisuuteen tai kemiallisiin saasteisiin (Dippner ym. s.a.). Toisaalta *euryhaliinit* lajit (kreik. eurys = laaja) voivat selviytyä suurissakin suolapitoisuuden muutoksissa (Reece ym 2011: 1000). Myös euryhaliinit lajit voivat hyödyntää jompaakumpaa menetelmää selvitäkseen erilaisista suolapitoisuuksista. Osmoottista sopeutumista hyödyntäviä euryhaliineja lajeja ovat

muun muassa monet siimajalkaiset ja simpukat, kun taas osmoottista säätelyä hyödyntäviin lajeihini kuuluvat esimerkiksi monet lohikalat sekä juovabassi.

Suolapitoisuuden fysiologisia vaikutuksia on tutkittu jo pitkään ja se onkin ollut yksi ensimmäisistä Itämeren meribiologian tutkimuskohteista (Dippner ym. s.a.). Suolapitoisuuden muutoksista johtuvia vaikutuksia lajistolle on jo havaittu Itämeren historiassa. Jo vuonna 1940 Remane tarkasteli Itämeren lajien osmoregulaatiota ja raportoi useiden lajien kestävyyttä alhaisissa suolapitoisuuksissa. Remane (1940) arvioi myös, että punameritähden (*Asterias rubens*) ja rantataskuravun (*Carcinus maenas*) määrät läntisellä Itämerellä tulisivat vähenemään runsaasti jos Itämeren suolapitoisuus laskee alle 25-15 PSU:n. Näiden arviointien perusteella nykyiset ennusteet Itämeren lajistossa tapahtuvista muutoksista arvioivat, että lajien levinneisyys muuttuu huomattavasti suolapitoisuuden vähentyessä (Dippner ym. s.a.)

Myös suolapitoisuuden lisääntymisellä on havaittu muutoksia Itämeren lajistossa. 1900-luvun alkupuoliskolla Itämeren suolapitoisuus oli nousussa ja useat lajit, kuten monet siimajalkaiset, meduusat ja pyrstökkäät, levisivät Itämeren pohjois- ja länsiosiin (Dippner ym. s.a.). 1970-luvun jälkeen Itämeren suolapitoisuus lähti puolestaan laskuun, jolloin suolaisissa vesissä viihtyvien hankajalkaisten biomassan määrä romahti ja makeassa vedessä elävien vesikirppujen määrä puolestaan lisääntyi (Vuorinen ym. 1998). Vuorinen ym. (1998) tutkimuksessa kerätyissä näytteissä suolapitoisissa vesissä elävät hankajalkaiset puuttuivat lähes kokonaan. Suolapitoisuuden väheneminen heikensi myös syvänteissä esiintyvien hankajalkaisten kantaa, mikä puolestaan poisti tärkeitä osia pinta- ja väliveden eli pelagisen vyöhykkeen ravintoverkosta.

2.2 Itämeri

2.2.1 Ympäristö

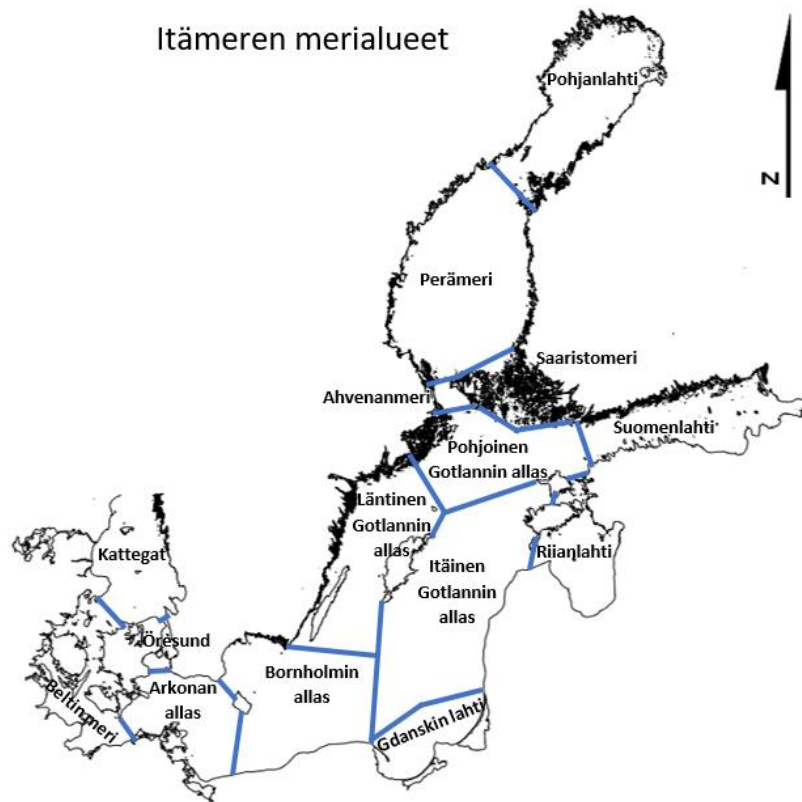
Itämeri on murtovesialtaana lähes ainutlaatuinen maailmassa. Vastaavanlaisia vesistöjä voidaan tarkastella Mustallamerellä tai Kaspianmerellä, mutta näissä vesistöissä suolapitoisuus on kuitenkin huomattavasti Itämerta korkeampi (Viitasalo ym. 2017a). Syynä näiden merialueiden runsaampaan suolapitoisuuteen on Itämerta vähäisempi valunta jokien kautta sekä suurempi haihdunta. Itämeressä tilanne on päinvastainen: valunta on suurempaa ja haihdunta vähäisempää. Itämerellä ja muilla vastaavanlaisilla merialueilla on myös yhtäläisyyksiä, joilla voi olla ympäristölle haitallisia vaikutuksia. Sulkeutuneisuutensa ja voimakkaan kerrostuneisuutensa vuoksi tämän kaltaiset meret kärsivät vähähappisista tai jopa hapettomista pohjista (Snoeijis-Leijonmalm & Andrén 2017). Itämeren kaltaisia murtovesialueita voidaan

tarkastella valtamerien jokisuistoina, estuaareina, joissa vallitsee ympäristömuuttujien suhteen vastaavanlaiset olosuhteet (Viitasalo ym. 2017a). Itämerä voidaankin ajatella useamman joen yhtenä suurena estuaarina. Toki estuaareihin verrattuna Itämerellä on useita poikkeavuuksia. Useimpiin estuaareihin laskee vain muutamia jokia ja niillä on laaja yhteys avomerelle. Itämereen laskee puolestaan yli 200 jokea ja yhteys valtameriin on kapea ja matala (Snoeijis-Leijonmalm & Andrén 2017). Tämän perusteella Itämerä voitaisiinkin ehkä jopa luonnehtia eräänlaiseksi suureksi vuonoksi.

Murtovetisyytensä ohella Itämeri on myös monilla muilla tavoilla ainutlaatuinen ja erikoinen sisämeri. Matalasta keskisyvyydestään, noin 55 m, ja pienestä koostaan huolimatta, Itämeressä on runsaasti erilaisia elinalueita syvänteissä, sulkeutuneissa lahdissa, erilaisissa pohjissa ja suolapitoisuuksissa (Myrberg & Andrejev 2003). Itämeren sulkeutuneisuus, vaihteleva ilmasto ja ympäröivät manneralueet vaikuttavat merkittävästi alueella vaihteleviin ympäristöihin (Snoeijis-Leijonmalm & Andrén 2017). Itämeren vedenalainen ympäristö saattaa muuttua runsaasti jo lyhyilläkin etäisyyksillä ja alueilla vaihtelevat ympäristömuuttujat muokkaavat alueen ekosysteemejä. Vesimassan pintakerroksen suolapitoisuus ja lämpötila laskevat kulkiessa kohti pohjoista, mutta samalla esimerkiksi talvikauden jääpeitteen vaikutus voimistuu. Myös ihmisen vaikutuksesta lisääntyneillä ravinteilla on havaittu erilaisia vaikutuksia Itämeren eri alueilla. Pohjoisessa lisäravinteet ovat aiheuttaneet alhaisempaa ja etelässä lisääntyntä lajien tuottavuutta, ja idässä ravinteet ovat aiheuttaneet jo vesistöjen selkeää rehevöitymistä. Maapallon pyörimisliikkeen eli coriolis-ilmiön vaikutuksesta Itämeren vesimassat kiertävät vastapäivään (Kautsky & Kautsky 2000). Jokien kautta kulkeutuvat vesimassat kääntyvät Itämereen laskettuaan siis oikealle. Tämän seurauksena eniten Itämereen ravinteita kuljettavien jokien, kuten Veiksel ja Neva, vesi säilyy Itämeressä kauemmin. Vesimassan sisällä tapahtuvat virtaukset ovat puolestaan pääasiassa suolapitoisuuden ja lämpötilan eroista johtuvia virtauksia, jotka lisäävät vesimassan vertikaalista sekoittumista (Snoeijis-Leijonmalm & Andrén 2017). Tuulien vaikutuksella on vain pieni rooli Itämeren virtauksissa.

Myös Itämeren morfologiassa ja topografiassa tapahtuu alueellisia muutoksia, ja Itämeri voidaankin jakaa näiden ja pohjassa olevien kynnysten perusteella 14:ään ala-alueeseen (Kuva 2) (Leppäranta & Myrberg 2009). Skagerrakin merialueella vallitsevat valtamerien kaltaiset vesimassat, ja alue kuuluukin Pohjanmeren merialueisiin. Kattegat toimii puolestaan vaihettumisvyöhykkeenä Itämeren ja Pohjanmeren välillä, mutta ei kuulu vielä varsinaisesti Itämeren merialueisiin. Öresund ja Beltin meri ovat ensimmäisiä Itämeren alueita Pohjanmeren suunnalta ja alueen suolapitoisuus onkin Itämeren suurimpia, noin 25 ‰. Itämeren eteläisimpiin osiin sijoittuvat Arkonan- ja Bornholmin altaat, joiden jälkeen saavutaan Gotlannin altaalle, joka sisältää noin puolet kaikesta Itämeren vesimassasta. Gotlannin allas

jaetaan itäiseen-, läntiseen- ja pohjoiseen Gotlannin altaaseen sekä Gdanskin lahteen. Itämeren syvin kohta sijaitsee Gotlannin altaassa Landsortin syvänteessä, 459 m. Gotlannin altaan jälkeen Itämeri jakautuu kolmeen lahteen, Pohjanlahti, Suomenlahti ja Riianlahti. Pohjanlahti jakautuu vielä neljään pieneenpään altaaseen: Ahvenanmeri, Saaristomeri, Perämeri ja Pohjanlahti.



Kuva 2. Itämeren merialueet. Tulkinta Leppäranta & Myrberg 2009: 13 kartasta.

Itämeri on kokenut historiansa aikana suuria muutoksia vaihdellessaan jääjärvestä mereiseen altaaseen, jälleen makeanveden altaaseen ja lopulta nykyisen kaltaiseen murtovesialtaaseen noin 3000 vuotta sitten (Kautsky & Kautsky 2000). Itämeressä tapahtuu edelleen muutoksia, vaikkakin ne ovat nykyisin hieman erilaisia. Nykyisten muutosten taustalla voidaan pitkälti pitää ihmisen vaikutusta ravinteiden, liikakalastuksen ja rehevöitymisen lisääntyessä (Snoejis-Leijonmalm & Andrén 2017). Monia näistä ongelmista on saatu vähennettyä tietoisuuden lisääntyessä ja aktiivisen toiminnan kautta. Uusia haasteita ja muutoksia Itämerelle on kuitenkin jo havaittavissa. Uudenlaiset saasteet ja erityisesti ilmastonmuutos saattavat aiheuttaa tulevaisuudessa muutoksia Itämeren ympäristöön ja lajikantaan. Kaikkien Itämeren olosuhteisiin vaikuttavien tekijöiden valossa Itämerta voidaan pitää ekosysteeminä, jolla on erittäin matala ekologinen sietokyky (Snoejis-Leijonmalm & Andrén 2017). Itämeren ympäristön alhainen suolapitoisuus vaikuttaa joidenkin

ympäristömyrkköjen ionikonsentraatioon positiivisesti, tehden aineista myrkyllisempiä (Kautsky & Kautsky 2000). Myös Itämeren avainlajien herkkyys haastavissa elinolosuhteissa heikentää Itämeren ekologista sietokykyä, sillä avainlajien mahdollisella katoamisella saattaa olla erittäin suuri haitallinen vaikutus Itämeren biodiversiteettiin (Snoeijis-Leijonmalm & Andrén 2017). Itämeren avainlajien uhkakuvina ovat liikakalastus, elinalueiden tuhoutuminen rannikkoalueilla sekä saasteiden lisääntyminen. Myös suolapitoisuudessa mahdollisesti tapahtuvat muutokset saattavat aiheuttaa suuria muutoksia lajien elinalueisiin.

2.2.2 Ilmasto

Itämeren alue sijoittuu kahden Köppenin ilmastoluokituksen välille, jotka määrittelevät alueen ilmastoa (McClatchey 2012). Molemmat alueella vallitsevat ilmastoluokitukset ovat osa kylmätalvisia ilmastoja. Alueen jakavat ilmastoluokitukset ovat lämminkesäinen mannerilmasto, joka vallitsee Itämeren altaan eteläosissa, sekä subarktinen mannerilmasto, joka puolestaan vaikuttaa alueen pohjoisosiin. Pohjoiselta Atlantilta kulkeutuva kostea ilma ja Venäjän mantereiselta suunnalta kulkeutuva kuiva ilmassa aiheuttavat Itämeren alueella erittäin vaihtelevia sääolosuhteita (Leppäranta & Myrberg 2009). Polaaririntamalla ja länsituulilla on merkittävä vaikutus Itämeren ilmastoon, ja erityisesti talvella länsituulien merkitys voimistuu, kun mantereen ja rannikon ilmassojen lämpötilaerot voimistuvat. Islannin matala-, Azorien korkea- sekä Venäjän talvikauden korkea- ja kesäkauden matalapaineet vaikuttavat merkittävästi Itämeren alueen ilmassojen liikkeisiin (Storch & Omstedt 2006). Tämä tunnetaan käsitteenä Pohjois-Atlantin oskillaatio, eli NAO (North Atlantic Oscillation). NAO-indeksin ollessa positiivinen Islannin matala- ja Azorien korkeapaine ovat voimistuneet, mikä johtaa voimakkaampiin ilmassojen virtauksiin aiheuttaen Itämerellä voimakkaita länsituulia (Rutgersson ym. 2015). Indeksillä ollessa negatiivinen vaikutus on päinvastainen. Vahvasti negatiivinen NAO-indeksi saattaa jopa kääntää tuulen suunnan kokonaan, mikäli Islannin matala ilmanpaine ylittää Azoreilla vallitsevan korkean ilmanpaineen. Länsituulien mukana Itämeren altaalle kulkeutuu kostea ja lauhkeaa ilmassaa. Skandinavian vuoristo suojaa hieman aluetta suurimmilta sateilta sekä saattaa samalla aiheuttaa Föhn-ilmiön vuoriston itäpuolelle, jolloin vuoriston yli kulkeutuva ilmassa lämpenee entisestään. Länsituulia voidaan yleisesti pitää Itämeren ilmastoalueen vallitsevina tuulina (Storch & Omstedt 2006).

Golf-virta ja pohjois-Atlantin virta tuovat lämpöä päiväntasaajalta pohjoisemmille leveyspiireille ja samalla myös Itämeren alueelle. Nämä merivirrat mahdollistavat sen, että Itämeren alueella vuoden keskilämpötila on keskimääräisesti muutamia asteita korkeampi kuin muualla samalla leveyspiirillä (Storch & Omstedt 2006).

Tukholman 200 vuotta kestäneen lämpötilatarkkailun avulla on havaittu, että alueen keskilämpötila vuosilta 1800 - 2000 on noussut 6,5 °C. Tutkimuksen 200 vuoden tarkkailujakso on jaoteltu 15 vuoden alajaksoihin. Alajaksojen keskilämpötiloista voidaan havaita selkeä positiivinen suunta ilmastonmuutoksen suhteen. Tarkkailujakson aikana alajaksojen lämpötilat ovat nousseet suhteellisen tasaisesti, joista viimeisin alajakso nousee esille selkeästi muita lämpimimpänä.

2.2.3 Ilmastonmuutos

Tämän tutkimuksen yhtenä tärkeimpänä terminä on ilmastonmuutos. Ilmastonmuutoksen käsitteellä voi olla useampia merkityksiä lähteestä riippuen, joten sen määritelmän asettaminen on tutkimuksen kannalta tärkeää. Ilmastonmuutoksella voidaan viitata mihin tahansa ilmastossa esiintyvään epävakaisuuteen, oli se sitten tilastollisesti merkittävää tai riippumatta sen syistä (Storch & Omstedt 2006). Kansainvälinen ilmastopaneeli, IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), määrittelee ilmastonmuutoksen miksi tahansa ajan mittaan ilmastossa tapahtuvaksi muutokseksi, oli se sitten luonnon tai ihmisen aiheuttama. YK:n ilmastonsuojelun puitesopimuksessa, UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change), sama termi määritellään ilmastossa tapahtuvaksi muutokseksi, joka on suoraa tai epäsuoraa seurausta ihmisen vaikutuksesta ja joka muokkaa globaalia ilmastoa ja lisää luonnollisen ilmastonmuutoksen vaikutusta. The Baltic Earth Assessment of Climate Change (BACC) -järjestö seuraa omassa julkaisussaan IPCC:n määritelmää ilmastonmuutoksesta. Julkaisussaan BACC myös käyttää erillään käsitteitä ”ihmisen aiheuttama ilmastonmuutos” ja ”ilmaston vaihtelevuus” viitatessaan joko ihmisen tai luonnon vaikutuksiin. Tämän tutkimuksen arvioinnit lajien elinalueiden muutoksista perustuvat BACC:n julkaisuihin, joten myös tässä tutkimuksessa ilmastonmuutosta käsitellään IPCC:n määritelmän mukaisesti.

Nykyisellä ilmastonmuutoksella on havaittu olevan ilmastoa lämmittävä vaikutus globaalisti, mutta erityisesti maapallon pohjoisissa osissa, 60. leveyspiirin pohjoisella puolella, ilmastonmuutoksen lämmittävän vaikutuksen on havaittu olevan voimakkaampaa (HELCOM 2013a). Vuodesta 1871 aloitetun seurannan aikana on havaittu, että 60. leveyspiirin pohjoisella puolella vuoden lämpötilojen keskiarvo on noussut joka vuosikymmenellä 0,11 °C ja leveyspiirin eteläpuolella vain 0,08 °C. Samalla globaali lämpötilan nousu on ollut keskimäärin 0,05 °C jokaisella vuosikymmenellä. Vuosien 1990 ja 2100 välisenä aikana ilmaston arvioidaan lämpenevän vielä 1,4 – 5,8 °C lisää (Graham ym. s.a.). Arviot perustuvat oletettuihin kasvihuonekaasujen ja aerosolipitoisuuksien muutoksiin. Arvion alin muutos, 1,4 °C, saattaa vaikuttaa vähäiseltä, mutta se on lähes kaksinkertainen verrattuna edeltävän

vuosisadan muutokseen, ja marginaalin ylin mahdollinen muutos, 5,8 °C, vastaa muutosta nykytilanteen ja viimeisimmän jääkauden välillä.

Myös Itämeren alueella ilmastonmuutoksella on merkittäviä vaikutuksia sääolosuhteissa ilmaston lämpenemisen lisäksi. Ilmaston lämpenemisellä on selvä vaikutus kausittaisten ilmasto-olosuhteiden muutokseen niin globaalisti kuin myös Itämerenkin alueella. Norjassa tarkasteltiin vuosien 1871 – 1990 välisen ajanjakson aikana eri vuosien lämpötilojen muutoksia, joista havaittiin kausittaisten vaihtelujen muutoksia (Grimenes & Nissen 2004). Näiden mittausten perusteella havaittiin, että kesäkauden pituus ja kuumien kausien määrät vuodessa lisääntyivät tarkkailujakson aikana. Pakkasjaksojen pituuden havaittiin myös vähentyneen tarkkailujakson aikana. Vastaavanlaisia tutkimuksia on suoritettu myös Virossa, missä tarkasteltiin vuodenaikojen muutoksia vuosien 1891 – 1998 välisenä aikana (Jaagus & Ahas 2000). Kyseisessä tutkimuksessa havaittiin, että vuodenaikojen pituudet ovat muuttuneet merkittävästi tarkkailujakson aikana: kevätkausi alkaa aikaisemmin ja syyskausi myöhemmin. Kun keskilämpötila putoaa alle +5 °C, puhutaan myöhäisen syksyn alkamisvaiheesta, joka on tutkimuksen mukaan siirtynyt 8 vuorokautta myöhäisemmäksi. Pysyvä lumipeite puolestaan merkitsee tutkimuksessa talven alkamista, joka on myös siirtynyt jopa 17 vuorokautta myöhäisemmäksi. Myös kausien pituuksissa havaittiin muutoksia. Kesän, jolloin keskilämpötila on yli +13 °C, pituus on lisääntynyt 11 vuorokaudella ja aikaisen talven, jonka alkua merkitsee ensilumi, pituus 18 vuorokaudella. Näiden kausien pituudet ovat lisääntyneet talven kustannuksella, jonka kesto on puolestaan vähentynyt jopa 30 vuorokautta.

Lämpötilojen ja kausittaisten vaihteluiden lisäksi ilmastonmuutoksella on havaittu vaikutuksia myös sadannan määrään Itämerellä. Sadannan määriin vaikuttavat pääasiassa ilmamassojen liikkuminen ja koostumus. Myös alueen topografialla eli pinnanmuodoilla on merkittävä vaikutus tietyn alueen sademääriin (Heino ym. s.a.). Pohjoisen 55° ja 85° leveyspiirin alueella on havaittu keskimäärin 12 % korotus manneralueiden sademäärissä 1900-luvun aikana. Sademäärät toki vaihtelevat alueista riippuen, eikä 12 % korotus kuvaa tarkasti tilannetta esimerkiksi Itämeren alueella. Esimerkiksi keski-Ruotsissa kevään sadannan määrän on havaittu nousevan jopa 15 %, kun taas Puolassa vastaava luku on laskenut (Heino ym. s.a.). Kesäisin sadannat ovat vähentyneet kauttaaltaan Itämeren alueen länsi- ja eteläosissa, kun taas pohjoisessa ja Suomen eteläosissa määrät ovat lisääntyneet. Syksyllä sateiden määrät ovat lisääntyneet kauttaaltaan lähes koko Itämeren alueella, ja suurimmat lisäykset sadannassa ovat talvijaksoilta. Myös Suomessa on pyritty mittaamaan sadannassa tapahtuneita muutoksia 1900-luvun aikana (Hyvärinen & Korhonen 2003). Tämän tarkkailun tuloksena havaittiin, että sadannan määrä on noussut Suomessa 1900-luvun aikana noin 50 mm useilla sääasemilla. Vastaavasti Venäjällä ja Virossa tehdyt havainnot osoittavat jopa 100 mm kasvua. Hyvärinen ja Korhonen kuitenkin muistuttavat julkaisussaan, että sademäärien lisääntymisen arviointi

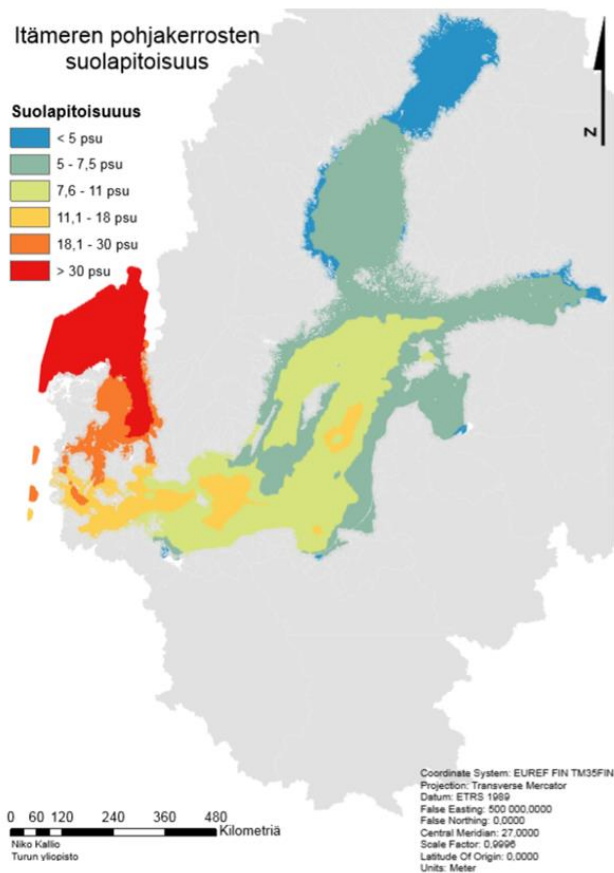
laajoilta alueilta on suhteellisen vaikeaa ja epätarkkaa. Vaikkakin sadannan lisääntymisen tarkka arviointi saattaa olla vaikeaa, tukevat nämä havainnot BACC:n arvioita lisääntyvän sadannan ja valunnan myötä aiheutuvasta Itämeren suolapitoisuuden vähenemisestä (Meier 2015). Toki myös tässä julkaisussa painotetaan, että ilmastomallien tarkka arviointi on hankalaa, mikä samalla aiheuttaa epävarmuuksia myös suolapitoisuuksien muutosten kannalta.

2.2.4 Suolapitoisuus

Itämeri on noin 12 000 vuotta vanha allas, joka muodostui, kun viimeiset mannerjäätiköt sulivat jääkauden päättyessä (Kautsky & Kautsky 2000). Tämän jälkeen Itämeri on muuttunut useamman kerran mereisen-, makean veden- ja murtovesialtaan välillä. Mereisten lajien arvellaan levittäytyneen Itämeren altaalle Littorina-meren aikana, noin 7 500 vuotta sitten, kun yhteys Atlantin valtamerelle oli suurempi. Tämän jälkeen Itämeren suolapitoisuus on laskenut tasaisesti sateiden ja lukuisten jokien laskeman makean veden vuoksi. Yhteys valtameriin myös kutistui ajan saatossa, minkä seurauksena suolaisen veden kulkeutuminen Itämereen väheni. Noin 3 000 vuotta sitten suolapitoisuuden aleneminen tasaantui ja Itämerestä tuli nykyisen kaltainen murtovesiallas.

Veden suolapitoisuus on yksi tärkeimmistä vesiympäristöjen tekijöistä ja onkin monelle vesieliölle avainkysymys ympäristön elinkelpoisuuden kannalta (Viitasalo ym. 2017b). Suolapitoisuus määrittelee pitkälti monen Itämeren lajin elinalueita sekä elinkiertoa. Samalla suolapitoisuus myös vaikuttaa Itämeren kerroksellisuuteen ja muihin veden ominaisuuksiin. Veden suolapitoisuuden muutoksilla on suuria vaikutuksia meren ekosysteemeille, erityisesti herkässä Itämeressä, missä monet lajit kärsivät jo nykyisessä tilassa suolapitoisuuden aiheuttamasta stressistä (Meier ym. 2006). Itämeren nykyinen suolapitoisuuden keskiarvo on noin 7,4 PSU (Practical Salinity Unit, 1 PSU = 1g/kg), eli 7,4 ‰. Tämä suolapitoisuus on valtamerissä eläville lajeille liian alhainen, mutta samalla makean veden lajeille liian korkea. Useimmat Itämeren lajit ovatkin kitukasvuisia valtamerissä tai sisävesissä eläviin lajikumppaneihin verrattuna (Viitasalo ym. 2017b).

Suolapitoisuuden käsite ei kuitenkaan ole vesiympäristöissä täysin yksiselitteinen, varsinkaan murtovetisessä Itämeressä. Itämeren suolapitoisuuden keskiarvo ei anna oikeanlaista kuvaa eri alueiden suolapitoisuuksista, sillä se on jakautunut erittäin epätasaisesti koko merialueella (Kuva 3). Itämerellä suolapitoisuudessa tapahtuu suuria muutoksia alueellista ja ajallisesti. Itämeren valuma-alueen sadannan määrällä on merkittävä vaikutus Itämeren suolapitoisuuteen, sillä mantereelta kulkeutuva valunta Itämereen alentaa vesimassan suolaisuutta, erityisesti jokisuistoilla. Myös suora sade Itämereen laimentaa vesimassan pintakerroksen suolaisuutta.



Kuva 3. Itämeren pohjakerroksen suolapitoisuus. HELCOM map and data service.

Haihdunta puolestaan poistaa vettä Itämerestä ja väkevöittää samalla vesimassaa. Suolapitoisuudessa tapahtuu myös muutoksia vuodenajasta riippuen, erityisesti vesimassan pintakerroksissa. Keväällä lumien ja jäiden sulaessa Itämereen kulkeutuu runsaasti makeaa vettä, laimentaen pintakerroksen suolapitoisuutta rannikoilla. Suurimpana suolapitoisuutta lisäävänä tekijänä Itämerellä on kuitenkin Tanskan salmien kautta kulkevat virtaukset Itämereen. Tätä Pohjanmereltä kulkeutuvan suolaisen veden määrää Itämereen voi ajoittain vahvistaa sopivissa olosuhteissa syntyvät suolapulssit. Näiden eri tekijöiden seurauksena Itämerellä havaitaankin erittäin suuria muutoksia suolapitoisuudessa lyhyilläkin etäisyyksillä. Suolapitoisuus laskee runsaasti Tanskan salmien 25 %:sta jokisuistojen 0 %:een (Leppäranta & Myrberg 2009). Ajoittain suolapitoisuus voi Tanskan salmien alueella nousta jopa 32 %:een voimakkaiden suolapulssien myötä.

Koko Itämeren vesimassan suolapitoisuus on siis täysin riippuvainen jokien valunnasta, sadannasta, haihtumisesta sekä Tanskan salmien kautta kulkeutuvasta suolapitoisesta vedestä. Leppäranta ja Myrbergin (2009) mukaan Itämeren suolapitoisuuden suhdeluku on 1:4, eli yksi osa suolaista vettä ja neljä osaa makeaa vettä. Itämeren kokonaistilavuus on 21 205 km³, jolloin suhdelukua noudattaen makean veden määräksi Itämerellä saadaan 16 964 km³. Itämereen kulkeutuvan

makean veden valunnan määrä on vuodessa keskiarvoltaan 480 km³ (Leppäranta & Myrberg 2009). Näiden lukujen avulla voidaan laskea, että Itämeren koko makean veden määrän vaihtumiseen menee 35 vuotta. Tämä luku on Leppärannan ja Myrbergin (2009) mukaan erittäin luotettava, sillä suurin osa Itämereen valuvista joista ovat kaukana Tanskan salmilta. Joet tuovat mereen lisää makeaa vettä, jonka on loppujen lopuksi kulkeuduttava Tanskan salmien kautta Pohjanmerelle, vaihtaen siten Itämeren vesimassan. Samojen arvojen avulla voidaan myös tarkastella suolaisen veden vaihtuvuutta Itämerellä, vaikkakin tässä menetelmässä on omat ongelmansa. Suolaisen veden tilavuudeksi Itämerellä voidaan kuitenkin laskea 4 241 km³ ja Leppärannan ja Myrbergin (2009) mukaan tämän vesimassan vaihtumiseen kuluisi teoriassa 5,3 vuotta. Luvut eivät kuitenkaan ole erittäin tarkkoja tai luotettavia, sillä suurin osa Itämereen kulkeutuvasta suolapitoisesta vedestä valuu nopeasti takaisin Pohjanmerelle, eikä kauempana Itämerellä olevien altaiden suolapitoinen vesi vaihdu lainkaan. Oikeampi luku suolapitoisen veden vaihtumiselle koko Itämeressä on luultavasti 50 – 100 vuotta. Koko Itämeren vesimassaa tarkastellessa veden vaihtuvuus on lähempänä 50 vuotta, sillä makean veden vaihtumisnopeudelle on Leppärannan ja Myrbergin (2009) mukaan annettava tässä arviossa suurempi painoarvo. Nämä tekijät vaikuttavat myös merkittävästi Itämeren suolapitoisuuteen, ja vaikka Itämeren suolapitoisuus onkin alhainen, on se silti erittäin merkittävässä osassa ylläpitäen vesimassan kerroksellisuutta ja virtauksia.

Alueellisten ja ajallisten erojen lisäksi suolapitoisuudessa tapahtuu muutoksia myös vesimassan sisällä. Halokliini eli suolapitoisuuden harppauskerros jakaa Itämeren vesimassan suolapitoiseen ja raskaaseen syvään veteen sekä kevyempään ja suolattomampaan pintaveteen. Vesimassan sisällä tapahtuu kuitenkin myös sekoittumista joko diffuusion tai advektion kautta (Leppäranta & Myrberg 2009). Diffuusiolla tarkoitetaan suolapitoisuserojen tasaantumista vesimassojen välillä liukenemalla ja advektiolla puolestaan tuulien ja virtausten aiheuttamaa sekoittumista. Kesäaikaan Itämeren vesimassa on kuitenkin vahvasti kerrostunut lämpötilan harppauskerroksen, termokliinin, mukaan (Suominen ym. 2010). Tällöin vesimassan sekoittuminen on vähäisempää. Kuitenkin syksyisin, keväisin sekä leutojen talvien aikana erityisesti halokliinin yläpuolella pystysuorat virtaukset ovat voimakkaampia. Itämeren altaiden pintakerrosten suolapitoisuus onkin suhteellisen homogeeninen, ja suurimmat erot suolapitoisuuden gradientissa tapahtuvat altaiden raja-alueilla, joissa sijaitsevat merenpohjan topografian kynnykset. Itämeren suolapitoisuus on myös pidempää aikajanaa tarkastellessa säilynyt suhteellisen tasaisena. Viime vuosisadan aikana suolapitoisuudessa on tapahtunut vain noin 1 % marginaalin sisällä tapahtuvia muutoksia, eikä selvää trendiä suolapitoisuuden muutoksessa ole näkynyt suuntaan tai toiseen (Winsor ym. 2001).

2.3 Itämeren lajisto

2.3.1 Lajiston yleispiirteet

Itämerellä elää erittäin kirjava eliöyhteisö, joka koostuu valtamerillä ja sisävesissä viihtyvistä lajeista, vaikkakin valtameriin verrattuna Itämeren lajikantaa voidaan pitää jokseenkin köyhänä (Kautsky & Kautsky 2000). Lajien esiintymisaluet vaihtelevat suolapitoisuuksien mukaan, eivätkä kaikki valtamerien lajit viihdy vähäsuolaisilla Suomenlahdella ja Perämerellä. Samalla sisävesistöissä viihtyvät lajit eivät kulkeudu Tanskan salmien läheisyyteen liian suuren suolapitoisuuden vuoksi. Itämeren kovia ja kivikkoisia pohjia hallitsevat rakkolevä-, eli rakkohauru-, ja sinisimpukkayhteisöt (Kautsky & Kautsky 2000). Pehmeiden pohjien yhteisöjä hallitsevat puolestaan liejusimpukat. Näissä yhteisöissä elää myös runsaasti muita lajeja, jotka hyödyntävät muiden lajien läsnäoloa. Nämä lajit, jotka tarjoavat sopivia elinolosuhteita muille lajeille kutsutaan avainlajeiksi. Tällaisia lajeja ovat esimerkiksi tässä tutkimuksessa tarkasteltavat sinisimpukka ja meriruoho.

Itämerellä esiintyy runsaasti erilaisia lajeja, aina ravintoverkon huipulla olevista selkärangattomista linnuista ja kaloista aina ravintoverkon alapuolella oleviin nilviäisiin, matoihin, kasveihin, äyriäisiin ja muihin selkärangattomiin. Nämä ravintoverkon pohjalla olevat eliöt ovat kuitenkin erittäin tärkeitä kaikille muille lajeille. Ilman niiden läsnäoloa ei Itämeressä esiintyisi muitakaan lajeja (Hallanaro ym. 2017). Itämerellä esiintyy useita satoja erilaisia lajeja, joiden tarkkaa määrää ei vielä edes tunneta. Kaikkein pienimpien lajien eroja joudutaan tutkimaan mikroskoopin ja DNA-tutkimusten avuin. Pienten lajien lisäksi Itämereltä on löytynyt äskettäin myös uusia lajeja, niin Itämerelle kuin tieteellekin. Itämeren nuori ikä ja ainutlaatuinen ympäristö mahdollistavat sen, että alueelle kulkeutuu ja kotiutuu yhä edelleen uusia lajeja, jotka etsivät itselleen omaa ekologista lokeroa. Tämä tekee Itämerestä myös erittäin mielenkiintoisen tutkimuksen kohteen.

Itämerellä on monia erilaisia pohjatyyppejä, joiden välissä on vielä useampia sekapohjia ja vaihtumisvyöhykkeitä (Hallanaro ym. 2017). Kullakin pohjatyypillä on kuitenkin omanlaisensa lajisto, joka on sopeutunut elämään juuri kyseisellä pohjalla. Erityisesti vesikasveille pohjan laatu on merkittävä. Esimerkiksi rakkohauru viihtyy kovilla kivikko- tai kalliopohjilla, sillä se vaatii kovan pinnan mihin ankkuroitua. Meriruoho puolestaan suosii pehmeitä, erityisesti hiekkaisia pohjia, joihin se kykenee upottamaan juurensa. Erilaiset eliöstöt puolestaan houkuttelevat muita lajeja alueelle. Tämän perusteella voidaan sanoa, että pohjan laatu on erittäin ratkaiseva matalien merialueiden lajiston kannalta. Erilaisille pohjille syntyy erilaisia yhteisöjä. Vaikka Itämerellä onkin useita erilaisia pohjatyyppejä, voidaan ne jakaa karkeasti neljään eri luokkaan: valottomat, syvien merialueiden pohjat, kovat kallio-

ja kivikkopohjat, hiekka- ja sorapohjat sekä pehmeät suojaisten ja matalien lahtien pohjat (Hallanaro ym. 2017).

Itämeren suolapitoisuus ja erityisesti sen alueelliset muutokset vaikuttavat merkittävästi Itämerellä elävien lajien kirjoon ja elinalueisiin. Lajien määrissä voidaan havaita selkeitä muutoksia Tanskan salmien sekä Suomen rannikkoalueiden välillä. Eniten lajeja voidaan havaita valtamerien suolapitoisuutta muistuttavalla Tanskan salmien alueella, missä on noin 1000 erilaista paljain silmin havaittavaa lajia (Viitasalo ym. 2017b). Suolapitoisuuden alentuessa myös lajien määrä vähenee, sillä mereiset lajit eivät enää selviydy alhaisemmissa suolapitoisuuksissa. Itämeren pääaltaalla, Gotlannin altaalla, voidaan havaita enää hieman vajaa 300 erilaista lajia. Gotlannin altaalla suolapitoisuus on selkeästi liian alhainen mereisille lajeille, mutta samalla myös liian korkea makean veden lajeille. Tästä syystä alueen lajimäärä on Itämeren köyhin. Suomen- ja pohjanlahdella suolapitoisuus jatkaa laskuaan, mutta lajien määrä lähtee kasvuun, kun makean veden lajit alkavat täydentää alueella esiintyvien lajien määrää. Pohjanlahdella voidaan havaita hieman alle 400 erilaista lajia, kun taas Suomenlahdella vastaava luku nousee jopa yli 750:n (Viitasalo ym. 2017b). Suomenlahdella onkin eniten lajeja koko Itämeressä Tanskan vesistöalueiden jälkeen.

2.3.2 Sinisimpukka, *Mytilus trossulus*

Itämeren sinisimpukka, eli *Mytilus trossulus* (Kuva 4), on erittäin mielenkiintoinen Itämeren eliö ja sitä voidaan pitää yhtenä Itämeren avainlajina. Sinisimpukan tarkka alalaji on vasta vastikään selvitetty. 2000-luvun alkupuolelta lähtien ongelmaan on pyritty hakemaan vastauksia DNA-tutkimusten avulla (Kostamo ym. 2017). Tutkimusten mukaan Itämeren



Kuva 4. Sinisimpukoiden asuttama merenpohja Saaristomerellä Bussön saaren edustalla. Kuva: Heidi Arponen/ Metsähallitus.

sinisimpukka on risteymä kahdesta muusta sinisimpukasta: Tyynellämerellä ja Luoteis-Atlantilla elävästä *Mytilus trossulus* -simpukasta sekä Koillis-Atlantilla esiintyvistä *Mytilus edulis* -simpukasta.

Sinisimpukka on Itämeren yksi huomiota herättävimmistä lajeista, ja sillä on erittäin merkittävä rooli benthisessä eli pohjan- ja pelagisessa eli pinnan- ja väliveden ekosysteemissä (Westerbom 2002). Sinisimpukka kuuluu kaksikuorisiin nilviäisiin ja on maailman vanhimpia merissä eläviä monisoluisia eliölajeja (Kostamo ym. 2017). Historiansa aikana sinisimpukka on onnistunut sopeutumaan moniin erilaisiin ympäristöihin. Myöskään maapallon historian aikana tapahtuneet mullistukset eivät ole ajaneet sinisimpukkaa muokkaamaan sen ulkomuotoa. Sinisimpukka on onnistunut sopeutumaan erittäin hyvin myös Itämeren alhaisiin suolapitoisuuksiin, vaikkakin tästä seuraavalla osmoottisella stressillä on vaikutuksia lajille. Itämeren sinisimpukan on havaittu olevan selvästi Pohjanmeren sinisimpukkaa pienempi, ja syyksi on pystytty osoittamaan juuri osmoottisesta stressistä aiheutuva energian kulutus (Prevodnik ym. 2007).

Suomenlahden keskiosissa ja Eteläisellä Merenkurkulla sinisimpukat elävät suolapitoisuuden alarajoilla: 4 ‰ (Kostamo ym. 2017). Sinisimpukat kohtaavat kuitenkin jo hankaluuksia 18 ‰:n jälkeen vesi- ja energiatasapainon ylläpidossa, jonka seurauksena yksilöiden koko ja kasvunopeus pienenevät (Kautsky & Kautsky 2000). Tämä 4 ‰:n suolapitoisuuden alaraja estää sinisimpukkaa leviämästä pidemmälle lahtien perukoille. Puolestaan alueilla, joilla suolapitoisuus on sinisimpukalle otollisempi, on laji levinnyt tehokkaasti. Koska Itämerellä ei ole sinisimpukan suurimpia saalistajia, meritähtiä tai isoja rapuja, ovat ne levittäytyneet syvimmillään jopa 30 metriin (Kostamo ym. 2017). Westerbom ym. (2001) arvioikin, että saalistuksella on hyvin pieni vaikutus sinisimpukoiden kantaan vakailta elinalueilla, joissa simpukoita on runsaasti. Puolestaan sinisimpukan elinalueiden reunoilla, joissa simpukoita on hieman harvemmassa ja ne ovat pienempiä, voi simpukoita saalistavilla kaloilla ja linnuilla olla merkittävä vaikutus lajin kantaan. Sinisimpukoiden kanta Itämerellä on kuitenkin saalistuksesta huolimatta erittäin runsas. Sinisimpukoita voi olla neliömetrin kokoisella alueella parhaimmillaan jopa 200 000 yksilöä (Kostamo ym. 2017). Toki ulkosaaristossa ja erittäin aallokkoisilla rannoilla sinisimpukat voivat jäädä kooltaan erittäin pieniksi, vain jopa muutaman millimetrin mittaisiksi. Myös Westerbom ym. (2001) tutkimuksessa kävi ilmi, että sinisimpukalle suotuisan suolapitoisuuden alarajoilla yksilöiden koko jää erittäin pieneksi, 2 – 10 mm. Alhaisissa suolapitoisuuksissa jopa 98 % populaatiosta oli pieniä yksilöitä. Pienestä koostaan huolimatta yksilöitiheydet olivat erittäin suuria. Puolestaan Saaristomerellä, missä suolapitoisuus on sinisimpukalle otollisempi, havaittiin huomattavasti enemmän suurempia yksilöitä ja vain vähän pieniä yksilöitä. Tutkimuksessa myös havaittiin, että sinisimpukoiden kasvunopeus on huomattavasti nopeampaa suolapitoisemmissa ympäristöissä.

Sinisimpukka luo, muokkaa ja samalla myös ylläpitää elinympäristöään siten, että se on sinisimpukan läsnäolon seurauksena myös monille muille lajeille suotuisampi (Kostamo ym. 2017). Ravintonsa sinisimpukka suodattaa sitä ympäröivästä

vesimassasta, ja tästä syystä laji menestyy parhaiten alueilla, joissa virtaukset ja aallokko nostattavat sille ravintoa. Pieneliöt, bakteerit, levät ja muu eloton aines kelpaavat sinisimpukalle ravinnoksi. Suodattaessaan ravintoa vesimassasta sinisimpukka puhdistaa samalla ympäristöään ja kirkastaa alueen vesimassaa. Erityisesti rannan tuntumassa vaikutus saattaa olla tarpeeksi suuri, että valoa vaativat kasvit ja levät hyötyvät sinisimpukoista. Kostamo ym. (2017) mukaan keskikokoinen sinisimpukka kykenee suodattamaan useita litroja vettä tunnissa. Tämä puolestaan mahdollistaa sen, että koko Itämeren sinisimpukkakanta kykenisi teoriassa suodattamaan koko Itämeren vesimassan kerran vuodessa. Tätä sinisimpukoiden suodatustehoa on jopa hyödynnetty Ruotsissa ja Tanskassa rannikoiden vedenlaadun parantamiseen (Kostamo ym. 2017). Jos sinisimpukka katoaa Itämerestä, sillä saattaa olla merkittäviä vaikutuksia erityisesti rannikoiden vedenlaatuun.

Aktiivisen toimintansa lisäksi sinisimpukka vaikuttaa ympäristöönsä ja siinä eläviin lajeihin myös passiivisesti. Monet paikoillaan elävät lajit, kuten merirokot, polyypit ja levät, voivat löytää sinisimpukoiden kuorista hyvä kiinnittymisalustan (Kostamo ym. 2017). Sinisimpukan tyhjät kuoret puolestaan tarjoavat suojapaikkoja pienille eläimille. Sinisimpukoiden ansiosta niiden elinympäristössä kykenee elämään yli 40 muuta paljain silmin havaittavaa selkärangattonta eläinlajia tai lajiryhmää. Näitä lajeja ovat esimerkiksi muut simpukat, katkat, siirat, kotilot, erilaiset madot sekä vesipunkit. Turvapaikkojen lisäksi sinisimpukka on myös tärkeää ravintoa haahkoille ja alleille. Myös kampelat ja monet särkikalat syövät mielellään sinisimpukoita ravinnokseen. Itämeren suuren pohjakalakannan arvellaankin olevan sinisimpukoiden runsauden ansiota. Näillä sinisimpukan myötä esiintyvillä lajeilla on puolestaan oma merkityksensä alueen ekosysteemissä, tarjoavat ne sitten ravintoa esimerkiksi kaloille, linnuille tai muille selkärangattomille tai mahdollistavat vesikasvien esiintymisen alueilla poistamalla niille haitallisia lajeja. Muutaman lajin esiintyminen alueella saattaa vaikuttaa ravintoketjun kautta merkittävästi ympäristöön ja mahdollistaa sitä kautta myös muiden lajien esiintymisen. Sinisimpukkapohjat ovatkin lajirunsaudeltaan Itämeren runsaslajisimpia alueita (Kostamo ym. 2017). Rakkolevä- eli rakkohauruyhteisöjä pidettiin aiemmin Itämeren runsaslajisimpina eliöyhteisöinä, mutta sinisimpukkapohjat näyttäisivät vetävän vertoja myös niille.

Vaikka sinisimpukoita voidaankin pitää kestäväenä ja sopeutumiskykyisenä lajina, ovat niiden elinalueet Itämerellä nykyisin uhattuina. Vesistöjen happamoituminen ja rehevöityminen sekä erityisesti ilmastonmuutoksesta aiheutuva suolapitoisuuden aleneminen ovat merkittäviä uhkatekijöitä sinisimpukan elinalueille Itämerellä (Kostamo ym. 2017). Suolapitoisuuden laskiessa sinisimpukoiden lisääntyminen muuttuu mahdottomaksi. Sinisimpukoilla ei ole juurikaan mahdollisuuksia vaihtaa elinympäristöään suolapitoisuuden kannalta suotuisammaksi, eivätkä ne ehdi

sopeutua tällaisiin muutoksiin. Ajan myötä myös aikuiset yksilöt menehtyvät alueilla, joilla ne eivät kykene lisääntymään suolapitoisuuden alenemisen takia. Myös ilmastonmuutoksesta aiheutuva ilmaston lämpeneminen ja sitä myöten merien lämpeneminen hankaloittavat sinisimpukoiden selviytymistä. 17 °C lämpötiloissa simpukat alkavat laihtua ja sitä lämpimämissä tai pidempään kestävässä lämpöjaksoissa ne nälkiintyvät. Sinisimpukka on sopeutunut kylmiin vesiin, eivätkä lämpimät olosuhteet ole sille otollisia. Vesistöjen happamoituminen puolestaan hankaloittaa sinisimpukoiden, kuten myös muidenkin kalkkikuorien eliöiden, kalkkikuorien muodostumista. Sinisimpukat kaipaavat myös elinalueiltaan kovapintaisia pohjia, joihin ne voivat kiinnittyä. Rehevöitymisen myötä Itämeren sedimentaatio lisääntyy, jolloin sinisimpukalle otollisten pohjien määrä vähenee.

2.3.3 Meriruoho, *Zostera marina*

Meriruoho, tai meriajokas (Kuva 5), on erittäin laajalle levinnyt matalien merialueiden kasvi, joka on myös yksi meriekosysteemien tuottavimmista lajeista (Kharlamenko ym. 2001). Sitä esiintyy laajalti pohjoisella pallonpuoliskolla Atlantin ja Tyynenmeren lauhkeilla rannikoilla (Kiviluoto ym. 2017).



Kuva 5. Meriruohoniitty läntisellä Suomenlahdella. Kuva: Juuso Haapaniemi/ Metsähallitus.

Valtamerillä meriruoho lisääntyy tehokkaasti tuottamalla siemeniä, mutta Itämerellä tilanne on toinen. Kasvustot ovat hajanaisia ja yleensä etäällä toisistaan. Myös kukinta on harvinaista ja saattaa tapahtua populaatioissa eri aikoihin. Tämä aiheuttaa sen, että kasvien pölyttäminen on erittäin vaikeaa. Vaikka pölyttäminen onnistuisikin ja kasveista kehittyisi siemeniä, on niiden kehittyminen kasviksi erittäin epätodennäköistä lyhyen kasvukauden vuoksi. Suomen rannikolla meriruohon leviäminen onkin lähes täysin rönsyilyn varassa. Kasvi leviää kasvullisesti tuottamalla uusia versoja juurakoista tai mahdollisista irronneista versoista. Meriruohoa tarkastelevissa molekyylibiologisissa tutkimuksissa on havaittu, että laajat meriruohoniityt saattavat koostua muutamasta tai jopa vain yhdestä kasviyksilöstä.

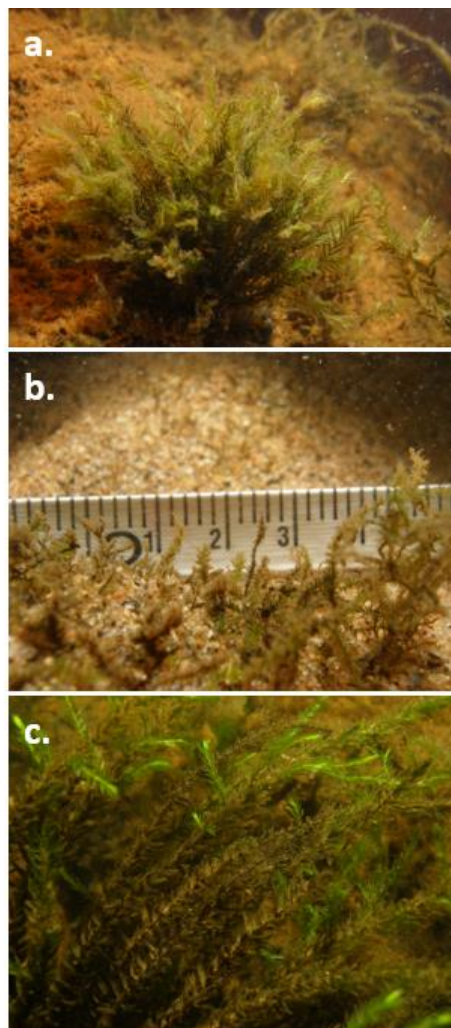
Meriruoho viihtyy parhaiten pehmeillä merenpohjilla, kuten hiekka-, hieta- tai hiesupohjilla noin 1 – 5 metrin syvyydessä (Kiviluoto 2017). Laji on Suomen rannikon ja myös koko Itämeren ainut monivuotinen siemenkasvi, joka on merellistä alkuperää. Kasvi vaatii ympäristöltään vähintään 5 ‰ suolapitoisuutta selviytyäkseen. Otollisissa olosuhteissa meriruoho saattaa kasvattaa laajoja niittyjä, jotka tarjoavat elinympäristön monille kaloille ja selkärangattomille lajeille. Etenkin Itämeren eteläisillä rannikoilla, missä on orgaanista ainesta ravinteeksi, meriruoho saattaa muodostaa erittäin laajoja kasvustoja (Kautsky & Kautsky 2000). Nämä kasvustot eivät ole yhtä runsaita kuin avomerillä esiintyvät, mutta niityt kuitenkin ylläpitävät monimuotoista eliöyhteisöä. Kasvien suojista löytävät turvaa esimerkiksi kolmipiikit, hietatokot, siirat sekä hietakatkaravut (Kiviluoto ym. 2017). Myös särmä- ja siloneulat kietoutuvat kiinni kasviin. Niityt tarjoavat elinympäristön myös katka- ja kotilolajeille. Juurillaan meriruoho sitoo pohja-ainesta ja vähentää sedimenttien uudelleen suspensoitumista ja vaikuttaa siten niiden kerrostumiseen ja rakenteeseen (Herkjül & Kotta 2009). Meriruoho myös hapettaa pohjaa ja sedimenttejä kuljettamalla hapetta lehdistään juurilleen, jotka sijaitsevat usein hapettomissa olosuhteissa. Tämä suojaa kasvia myrkyllisiltä fytotoksiineilta, kuten raudalta (Fe^{2+}), mangaanilta (Mn^{2+}) ja sulfideilta. Hapettamalla pohjaa meriruoho edistää orgaanisen aineksen hajottamista sedimenteissä ja tarjoaa sitä myöten myös pohjaeläimille hyvät elinolosuhteet. Myös monet muut kasvit viihtyvät meriruohon läheisyydessä, kuten erilaiset vidat, haurat ja hapsikat (Kiviluoto ym. 2017).

Meriruoholla vaikuttaisi siis olevan merkittävä osa matalien merenpohjien ekosysteemeissä parantaessaan ja luodessaan muille lajeille otollisia elinalueita. Suomen rannikon alhaiset suolapitoisuudet kuitenkin estävät meriruohon laajan levittäytymisen, ja lajia esiintyykin pääasiassa vain Saaristomerellä. Suomen rannikolla esiintyvät uhkakuvat meriruoholle ovat kuitenkin yhtä lailla koko Itämeren kannan uhkana. Duarte (2002) toteaa julkaisussaan, että meriruohon kannat ovat ympäri maailmaa vähentyneet, ja syynä tälle ovat ihmisen aiheuttama veden laadun heikentyminen, vesistöjen rehevöityminen ja lisääntynyt sedimentaatio. Hauxwell ym. (2003) jatkaa myös omassa julkaisussaan, että lisääntyneet satamat, ruoppaukset, nuottakalastus ja veneily matalilla vesialueilla ovat pirstoneet meriruohoniittyjä ympäri maailmaa. Meriruohoa uhkaavista tekijöistä erityisesti rehevöityminen on suurin uhkakuva Itämerellä (Kiviluoto ym. 2017). Rehevöitymisen tiedetään vähentävän meren pohjaan tunkeutuvan valon määrää, mikä heikentää vesikasvien, kuten myös meriruohon, olosuhteita (Herkjül & Kotta 2009). Rehevöityminen lisää myös rihmamaisten levien esiintymistä rannikolla. Laajoista leväesiintymistä saattaa irtautua laajoja rihmalevämattoja, jotka vähentävät valon kulkeutumista muille vesikasveille entisestään (Kiviluoto ym. 2017: 364). Nämä rihmalevämatot saattavat myös painaa meriruohon versoja pohjaan ja estää siten kasvuston uusiutumisen kokonaan. Myös lämpenevien talvien myötä vähenevä

jääpeite jättää meriruohoniityt talvimyrskyjen armoille, jotka saattavat tehdä pahaa jälkeä matalilla rannoilla kasvaville niityille (Herkjül & Kotta 2009).

2.3.4 Vesisammaleet

Tutkimuksessa ei niinkään tarkastella yhtä vesisammaleen lajia, vaan vesisammaleita Itämeressä kokonaisuudessaan. Yleisesti vesisammaleita tavataan vain sisävesistöissä, minkä vuoksi ne ovatkin yksi Itämeren erikoisuuksista. Erikoisuudestaan huolimatta Itämerellä esiintyy kuitenkin useampia vesisammaleita (Kuva 6): isonäkingsammal (*Fontinalis antipyrecita*), ahdinsammal (*Platyhypnidium riparioides*) sekä vellamonsammal (*Fissidens fontanus*) (Kostamo ym. 2017). Sisävesisen alkuperänsä vuoksi vesisammaleet eivät kestä korkeita suolapitoisuuksia. Siksi niitä esiintyykin pääasiassa vain Suomenlahden ja Perämeren perukoilla sekä jokisuistoissa, missä suolapitoisuudet ovat tarpeeksi alhaisia. Vesisammaleet ovat yhtä lailla tärkeitä vesiympäristölle kuin muutkin vesikasvit, tarjoavat ne sitten piilopaikkoja tai ravintoa muille vesistöissä eläville lajeille. Kostamo ym. (2017) mukaan murtovesissä elävistä vesisammalista tiedetään vasta erittäin vähän, sillä alun perin lajit ovat peräisin makeasta vedestä. Sisävesien vesisammalia on puolestaan tutkittu huomattavasti enemmän, mutta uudenlainen ympäristö Itämerellä on kuitenkin saattanut muokata lajien elinkiertoa ja vaikutuksia ympäristölle ja siinä eläville lajeille.



Kuva 6. Itämeren vesisammal lajeja.
Kuva a: Vellamonsammal, *Fissidens fontanus*.
Kuva: Pauliina Ahti/ Metsähallitus.
Kuva b: Ahdinsammal, *Platyhypnidium riparioides*. Kuva: Pekka Lehtonen/ Metsähallitus.
Kuva c: Isonäkingsammal, *Fontinalis antipyrecita*. Kuva: Suvi Saarnio/ Metsähallitus.

Isonäkingsammal on levinnyt laajimmin Itämerellä ja se onkin sukunsa suurin vesisammal Suomessa (Kostamo ym. 2017). Alueilla, joissa elinympäristön olosuhteet ovat otolliset ja suolapitoisuus säilyy alhaisena, kuten Perämerellä, kasvaa isonäkingsammal mattomaisena sammaleena meren pohjassa tai rehevänä pensaana. Merenkurkussa esiintyy puolestaan jo huomattavasti hennompia yksilöitä, sillä

suolapitoisuus on alueella korkeampi. Isonäkingsammaleen esiintyminen on kuitenkin alueella vielä mahdollista, vaikkakin osmoottisen stressin vaikutukset ovat jo havaittavissa lajin ulkonäössä. Isonäkingsammal viihtyy parhaiten avoimilla paikoilla, missä sillä on tilaa kasvaa, eikä kilpailu ole suurta. Suomenlahden esiintymät sijoittuvat myös mataliin ja suojaisiin sisälahtiin, joissa voidaan havaita tiheitäkin kasvustoja. Myös irtonaisia kasvustoja voidaan havaita Suomenlahden suojaisimpien hiekkapohjien alueelta.

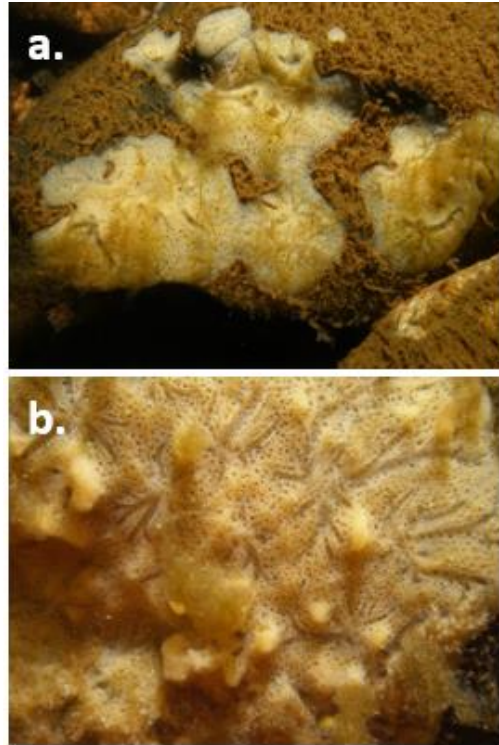
Isonäkingsammaleen lisäksi Itämerellä esiintyy huomattavasti harvemmin ahdinsammalta, joka on sukunsa ainut Suomessa esiintyvä laji. Harvemmassa esiintymisalueestaan huolimatta ahdinsammaleen on havaittu olevan suhteellisen yleinen laji Perämeren kivikkopohjilla (Kostamo ym. 2017). Isonäkingsammaleeseen verrattuna ahdinsammal on selvästi pienempi ja siitä esiintyy kahta erilaista muotoa. Ahdinsammal saattaa esiintyä joko kuusenkaltaisena ja litteänä tuuheana muotona tai kapeana kivikkopohjan seassa kulkevana köynnöksenä. Uusimmissa tutkimuksissa on selvinnyt, että Itämerellä esiintyvä ahdinsammal eroaa sisävesien lajitoverista siinä määrin, että Itämeren ahdinsammal saatetaan tunnustaa omaksi lajikseen tai jopa suvukseen.

Itämerellä voi havaita vielä kolmatta, pienempää vesisammalta, vellamonsammalta. Tämä laji esiintyy litteänä ja matalakasvuisena viuhkana samoilla elinalueilla ahdinsammaleen kanssa (Kostamo ym. 2017). Laji jää usein ahdinsammaleen tai muiden kasvien ja levien varjoon, mutta otollisissa olosuhteissa se saattaa levitä suurellekin alalle ja kasvattaa tiheitä kasvustoja. Myös vellamonsammaleen tilanne Perämerellä näyttäisi uusimpien tutkimusten valossa paremmalta kuin aiemmin on luultu. Lajin pieni koko ja muiden lajien runsaus samoissa elinympäristöissä vaikeuttavat kuitenkin lajien havainnointia.

Vaikka vesisammaleet ovatkin levinneet Itämeren vähäsuolaisille vesistöille, edustavat ne silti makeassa vedessä eläviä lajeja. Toisin kuin mereisten lajien kannalta, ilmastonmuutos ja siitä mahdollisesti seuraava Itämeren suolapitoisuuden aleneminen antaa vesisammaleille ja muille makean veden lajeille mahdollisuuden levitä uusille alueille. Ilmastonmuutos ei siis ole välttämättä uhkakuva vesisammalille, vaan jopa mahdollisuus uusille elinalueille. Tämä saattaa kuitenkin aiheuttaa kilpailua uusilla elinalueilla ja muokata ravintoverkkoa.

2.3.5 Murtovesisieni, *Ephydatia fluviatilis*

Myös murtovesisieni (Kuva 7) on yksi Itämeren erikoisista lajeista, sillä se on ainakin toistaiseksi ainut sienieläin Itämerellä (Holopainen ym. 2017). Tämä sienieläin muodostaa korallien tavoin runkokuntia, jotka koostuvat tuhansista yksilöistä. Nämä runkokunnat muodostavat tukirankansa piineulasten verkostoista, joihin myös niiden lajinmääritys perustuu. Runkokuntien koko riippuu täysin habitaatin ympäristömuuttujista, kuten virtauksista ja niiden voimakkuudesta sekä valon määrästä. Hyvissä olosuhteissa murtovesisieni saattaa peittää suhteellisen kookkaitakin alueita vaaleana ja mattomaisena pintana pohjanmuotojen päällä. Matalissa vesissä kasvavat murtovesisienet saattavat puolestaan olla vihertäviä, mikä johtuu symbioosista viherlevien kanssa. Murtovesisienet kykenevät hyödyntämään levien yhteytystuotteita.



Kuva 7. Itämeren murtovesisieni, *Ephydatia fluviatilis*.

Kuva a: Murtovesisieni Perämeren pohjassa. Kuva: Essi Keskinen/ Metsähallitus.

Kuva b: Tarkempaa kuvaa murtovesisienien runkokunnan rakenteesta. Kuva: Essi Keskinen/ Metsähallitus.

Murtovesisieni lisääntyy pääosin suvuttomasti omassa runkokunnassaan. Myös lajin alueellinen leviäminen tapahtuu suvuttomasti. Runkokunnasta irronneet kappaleet kulkeutuvat virtausten mukana uusille alueille, missä ne kiinnittyvät jälleen pohjaan tai muuhun pintaan. Murtovesisieni voi kuitenkin levitä myös suvullisesti sienieläimen huokosissa tapahtuvan hedelmöityksen avulla (Holopainen ym. 2017). Siimalliset toukat poistuvat emorunkokunnasta ja uivat uusille elinalueille, missä ne perustavat täysin uusia runkokuntia, jotka aloittavat oman kasvamisensa. Murtovesisieni on levinnyt osittain jo koko Suomen rannikolle. Pääasiassa lajia kuitenkin tavataan Suomenlahdella ja Perämerellä, missä kilpailu elintilasta on vähäisempää ja suolapitoisuus alhaisempi. Näillä alueilla murtovesisientä voi tavata myös syvemmissä vesissä, missä auringonvalo on niukkaa. Suolapitoisemmillä alueilla, kuten saaristomerellä, murtovesisieni viihtyy parhaiten matalissa, suojaisissa ja vähäsuolaisissa lahdissa.

3 Aineistot ja menetelmät

3.1 Tutkimusalue

Tutkimuksen ja tutkimusalueen rajaaminen Suomen rannikkoa käsitteleväksi perustui pääasiassa tutkimuksessa hyödynnettävään aineistoon. Vedenalaisen meriluonnon monimuotoisuuden inventointiohjelmalta eli VELMU:lta ja Metsähallitukselta saadut aineistot käsittelevät vain Suomen aluevesillä suoritettuja lajihavaintoja sekä ympäristömuuttujien mittauksia. Tutkimukseen olisi toki saattanut olla mahdollista kerätä tietoa myös muilta merialueilta. Tutkimusalueen rajaaminen kuitenkin mahdollisti aineistojen keruun samasta lähteestä, jolloin aineistojen keruutapa on ollut mahdollisimman samankaltainen ja ne ovat verrattavissa keskenään. Eri lähteitä hyödyntäessä aineistojen kerääminen olisi saattanut poiketa toisistaan, mikä olisi saattanut aiheuttaa vääristymiä tutkimustuloksissa.

Tutkimusalue koostuu neljästä eri Itämeren alueesta: Suomenlahti, Saaristomeri, Pohjanlahti ja Perämeri. Vaikka nämä alueet ovatkin suhteellisen samankaltaisia, on niiden ympäristössä ja lajistossa silti pieniä poikkeavuuksia. Suurin syy ympäristön ja lajiston erilaisuuteen on juuri suolapitoisuus. Perämerellä ja Suomenlahden itäosissa suolapitoisuudet ovat alhaisimmillaan, käytännössä liki nolla promillea (Leppäranta & Myrberg 2009). Tämä johtuu kaukaisesta etäisyydestä Tanskan salmille sekä suurista ja lukuisista alueelle laskevista joista. Gotlannin allasta lähestyttäessä suolapitoisuus kohoaa Suomenlahdella lähes 6 ‰:een ja Perämerellä noin 3,5 ‰:een siirryttäessä Pohjanlahdelle, missä suolapitoisuus nousee sen eteläisimmässä osassa 6 ‰:een.

Saaristomerellä puolestaan vallitsee pääasiassa 5,5 – 6,5 ‰:n suolapitoisuus, mutta tällä pienimmällä merialueella tapahtuu myös paljon muutoksia sen saaristossa. Rannikon läheisyydessä suojaisissa lahdissa ja jokisuistoilla suolapitoisuus jää lähes nolnaan promilleen, mutta siirryessä kohti ulkosaaristoa suolapitoisuus kasvaa nopeasti. Matalasta merialueesta ja lukuisista saarista johtuen veden vaihtuvuus alueella on suhteellisen vähäistä (Virtasalo ym. 2005). Myös tästä syystä sisäsaariston suolapitoisuus pysyy alhaisena. Nämä suolapitoisuuden erot tutkimusalueella rajaavat samalla monen lajin elinalueita, kuten tässäkin tutkimuksessa tarkasteltavien. Merellisen ympäristön merkitys ja merellisten lajien määrä kasvaa siirryttäessä tutkimusalueella kohti Saaristomerta.

3.2 Aineistot

Tutkimuksessa käytettävät ilmastomallit pohjautuivat The Baltic Earth Assessment of Climate Change (BACC) -järjestön suorittamiin arviointeihin Itämeren tulevaisuudesta ilmastonmuutoksen suhteen (Meier 2015). Baltic Earth on valmistanut vuosina 2008 ja 2015 kaksi arviota Itämereen kohdistuvista muutoksista ilmastonmuutoksen myötä ja selvittää niiden avulla Itämeressä mahdollisesti tapahtuvia muutoksia. Näitä arvioita hyödynnettiin tutkimuksessa ilmastomallien tarkasteluun, ympäristömuuttujien muokkaamiseen mallien mukaisesti sekä ilmastonmuutoksen vaikutusten selvittämiseen. BACC:n ilmastonmuutoksen arvioinnissa on ollut tarkoituksena tarjota tieteelliselle yhteisölle arvio käynnissä olevan ilmastonmuutoksen mahdollisista vaikutuksista Itämeren valuma-alueella. Arvioinnissa vertaillaan myös nykyisen ilmastonmuutoksen elementtejä historiassa tapahtuneisiin ilmastonmuutoksiin, jotta ymmärtäisimme paremmin ilmastonmuutosten vakavuuden ja epätavallisuuden, johtui se sitten ihmisen aiheuttamasta tai luonnollisesta ilmastonmuutoksesta. BACC:n arvioinnissa tarkastellaan myös ilmastonmuutoksen hydrologisia, oseanografisia ja biologisia vaikutuksia, sekä mitkä eri tekijät ovat näiden vaikutusten osasyinä.

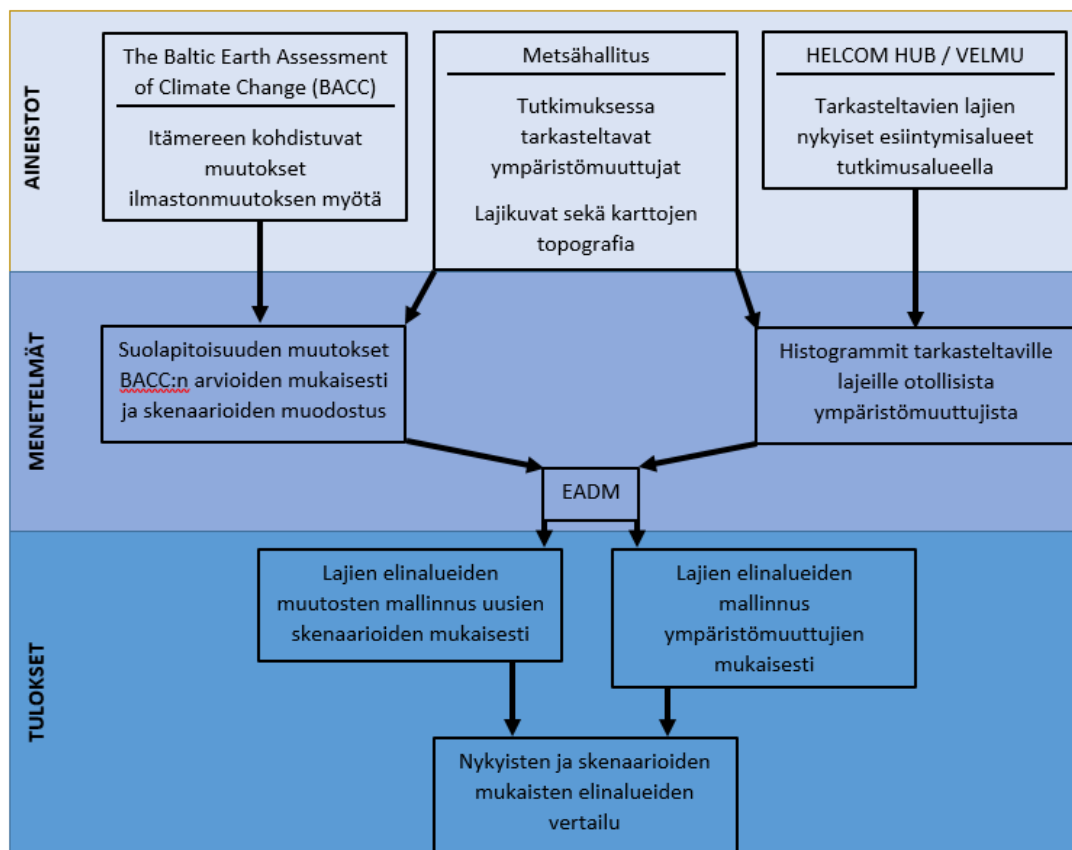
Tutkimukseen valikoitujen lajien valinta perustui puolestaan HELCOM HUB:n raporttiin vedenalaisten biotooppien ja habitaattien luokittelusta (HELCOM 2013b). Raportti on valmistunut vuonna 2013 ja sen tarkoitus on ollut selvittää ja kartoittaa Itämeressä olevia erilaisia habitaatteja ja niissä eläviä eliöitä. HELCOM HUB -aineiston perustaminen aloitettiin keräämällä aiempia biotooppien luokituksia ja kehittämällä samalla uusia asiantuntijoiden ja biologisen datan avulla (HELCOM 2013b). Vuosien 2010-2013 aikana työryhmä keräsi aineistoa kansallisista datapankeista, jotka koostettiin yhteen ja analysoitiin. Tämä vaihe mahdollisti alustavan luokittelun biotoopeille, jotka määritettiin organismien perusteella. Luokittelussa käytettiin suomalaista BalMar -järjestelmää, joka kehitettiin VELMU:n käyttöön. Sitä on jo onnistuneesti hyödynnetty samankaltaisen datan parissa Red List Biotope Expert Group -ryhmän käytössä. Luokittelu tapahtui makroskooppisten lajien määrällisten osuuksien mukaisesti. BalMar:n luokittelu suosi monivuotisia kasveja ja sessiilejä eli ei vapaasti liikkuvia merenpohjan päällä eläviä lajeja. Kausittaiset kasvit ja merenpohjan alla elävät lajit jäivät luokittelussa pienemmälle huomiolle.

Vedenalaisen meriluonnon monimuotoisuuden inventointiohjelman, VELMU:n, tarjoaman lajihavainto -aineiston avulla tehtiin lopulliset päätökset tutkimuksessa tarkasteltavista lajeista. Lajivalintoihin vaikutti niistä löytyvien havaintojen määrä. VELMU:n lajihavainnot on esitetty paikkatietoaineistoina Suomen rannikkoalueilta. Lajihavainnot eivät kuvaa yksittäisen yksilön havaintoa tietyllä alueella. Yksittäinen havainto kuvastaa aluetta, jolla kyseisen lajin peittävyys merenpohjasta on vähintään

50 % tai lajia on vähintään 50 % merenpohjan biomassasta. Peittävyden arviointiin on käytetty 1 – 6 m² ja biomassan arviointiin 0,04 m² kokoisia alueita. Tutkimukseen valikoitiin neljä lajia, joista kaksi edustaa suolaisessa vedessä viihtyvää ja kaksi makeassa vedessä viihtyvää lajia. Tällä valikoinnilla haluttiin selvittää, minkälaisia muutoksia kummankin ryhmän elinalueissa tapahtuu suolapitoisuuden muutoksen yhteydessä. Tutkimukseen valikoituivat sinisimpukka, meriruoho, murtovesisieni ja vesisammal.

Tutkimuksessa hyödynnetty ympäristömuuttuja-aineisto saatiin Metsähallitukselta. Tämä aineisto perustuu pitkäaikaiseen tarkasteluun ja mittauksiin Suomen rannikkoalueilta. Mittauspisteiden väliset alueet on aineistossa pyritty yleistämään kuvaamaan alueiden välistä vaihtelua. Ympäristömuuttujien laatu ja päällekkäisyydet karsivat osan muuttujista pois tutkimuksesta. Tutkimuksessa tarkasteltaviksi ympäristömuuttujiksi valikoituivat suolapitoisuus, syvyys, pH, sameus, näkösyvyys, pohjan lämpötila ja valosyvyys. Näiden aineistojen avulla pyrittiin tutkimuksessa hyödynnettyjen menetelmien avulla vastaamaan tutkielmalle asetettuihin tutkimuskysymyksiin (Kuva 8).

Metsähallitukselta saatiin myös tutkimuksessa esitettyjen elinalueita kuvaavien karttojen karttapohjat, jotka esittävät maa- ja merialueiden topografian. Suolapitoisuuksia ja meriruohon arvioituja elinalueita kuvaavien karttojen aineistot kerättiin puolestaan HELCOM:in map and data service:n avoimesta karttapalvelusta. Tutkimuksessa esitetyt lajikuvat ovat puolestaan Metsähallituksen tutkijoilta saatuja kuvia.



Kuva 8. Vuokaavio tutkimuksessa käytettyjen aineistojen lähteistä ja kuinka niitä on hyödynnetty tutkimuksessa.

3.3 Menetelmät

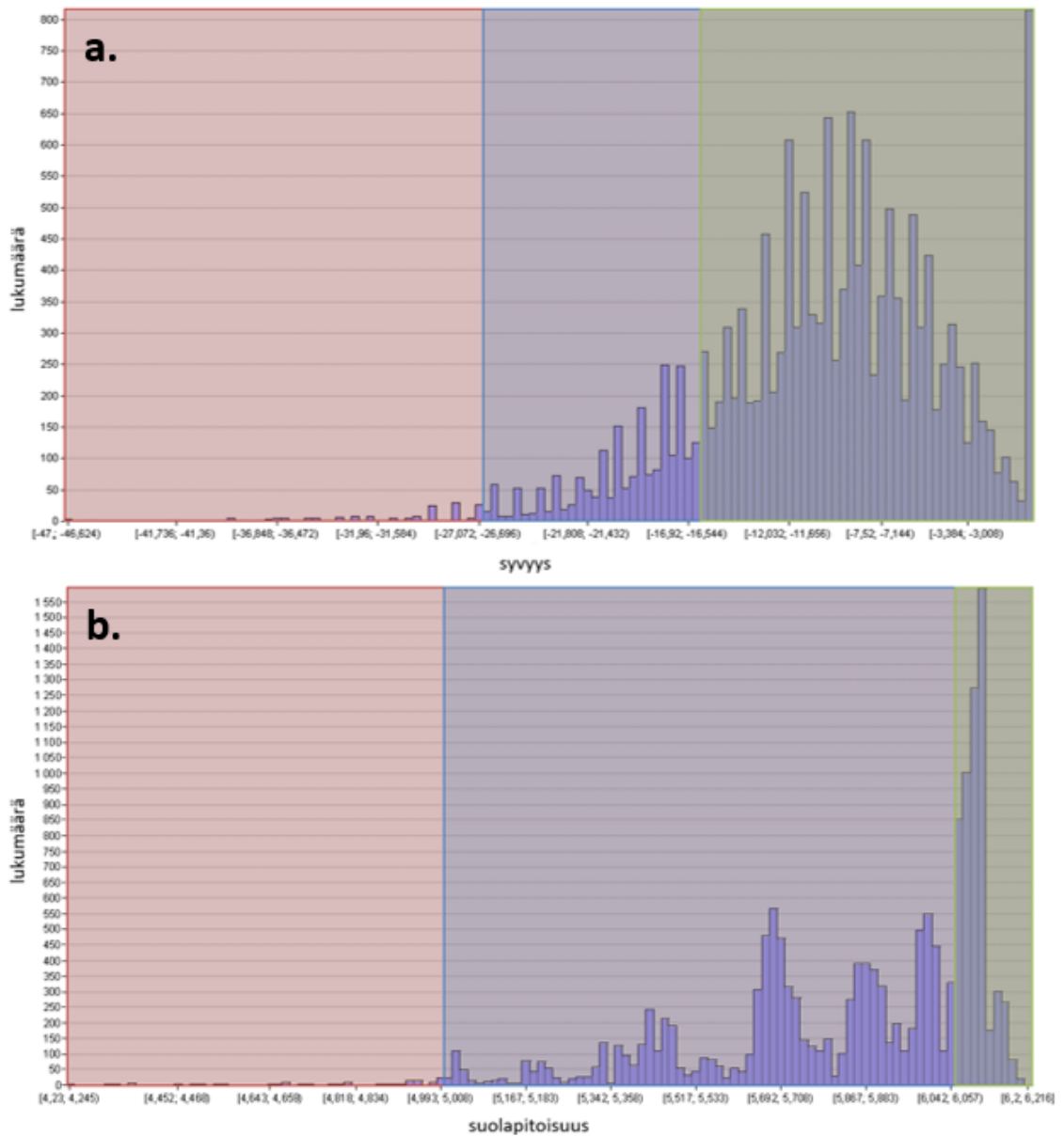
3.3.1 Paikkatietomallinnukset

Tutkimuksen pääasiallisena menetelmänä hyödynnettiin ArcMap -sovelluksen tarjoamia työkaluja ja mahdollisuuksia aineiston jalostukseen, mallinnukseen ja lopulliseen visualisointiin. ArcMapin työkalujen avulla aineistojen koordinaatitot voitiin vaihtaa yhtenäiseen muotoon, EUREF_FIN_TM35FIN. Koordinaatistojen muutokset suoritettiin Project (Data Management) -työkalulla vektoriaineistoille ja Project Raster (Data Management) rasteriaineistoille. Koordinaatistojen muutos yhtenäiseen muotoon on aineistojen mallinnuksien ja visualisointien kannalta välttämätöntä, jotta tuloksista saadaan tarkkoja. Väärät koordinaatitot aiheuttavat vääristymiä esimerkiksi lajihavaintojen sijainneissa, jotka saattavat aiheuttaa esimerkiksi sen, että osa havaintopisteistä esiintyisi mantereen päällä. Monet ArcMapin työkalut myös vaativat, että käsiteltävät aineistot jakavat saman koordinaatiston toimiakseen.

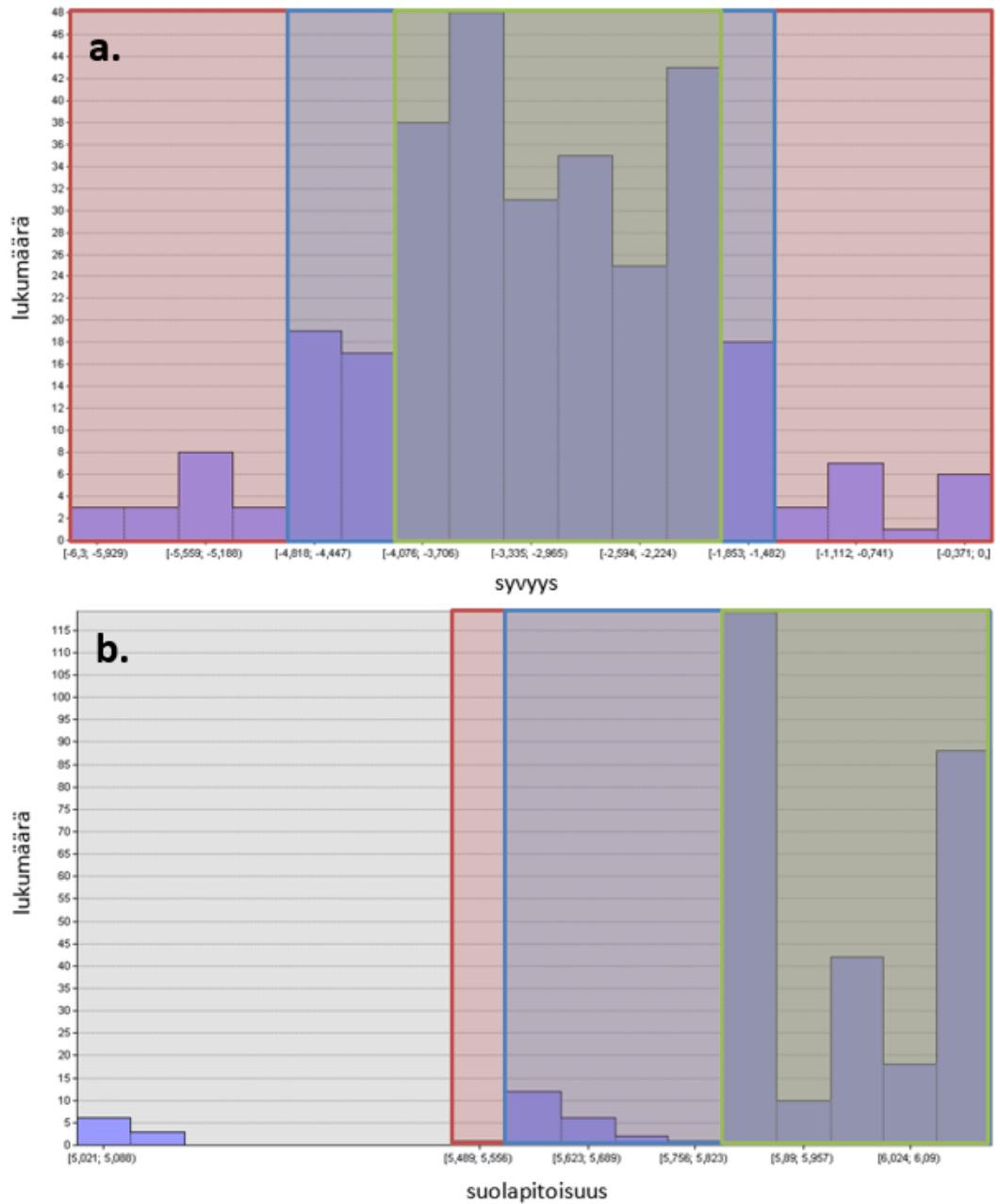
ArcMapin seuraava työvaihe koostui lajihavaintojen ja ympäristömuuttujien arvojen yhdistämisestä kunkin lajin omaan atribuuttitaulukkoon. Jokaiselle lajihavainnon

karttapisteelle oli annettava tarkasteltavien ympäristömuuttujien arvo kyseisessä sijainnissa, jotta lajille ominaiset ympäristöt olisi mahdollista kartoittaa. Tämä vaihe suoritettiin Extract Multi Values to Points (Spatial Analyst) -työkalulla. Työkalu yhdistää aineistot keskenään ja luo lajihavaintojen atribuuttitaulukkoon uuden kolumnin jokaista ympäristömuuttujaa kohden. Jokainen lajihavainnon sarake saa sen arvon, mikä esiintyy kyseisen havainnon sijainnissa kyseisellä ympäristömuuttujan rasterilla. Tämän työvaiheen jälkeen on mahdollista valmistaa ArcMapin Create Graph -työkalulla histogrammit tarkasteltavista ympäristömuuttujista kullekin lajille (Kuvat 9, 10, 11 & 12). Histogrammien avulla voitiin tarkastella, minkälaisilla ympäristömuuttujien arvoilla kyseistä lajia esiintyy runsaasti, vähän tai ei lainkaan.

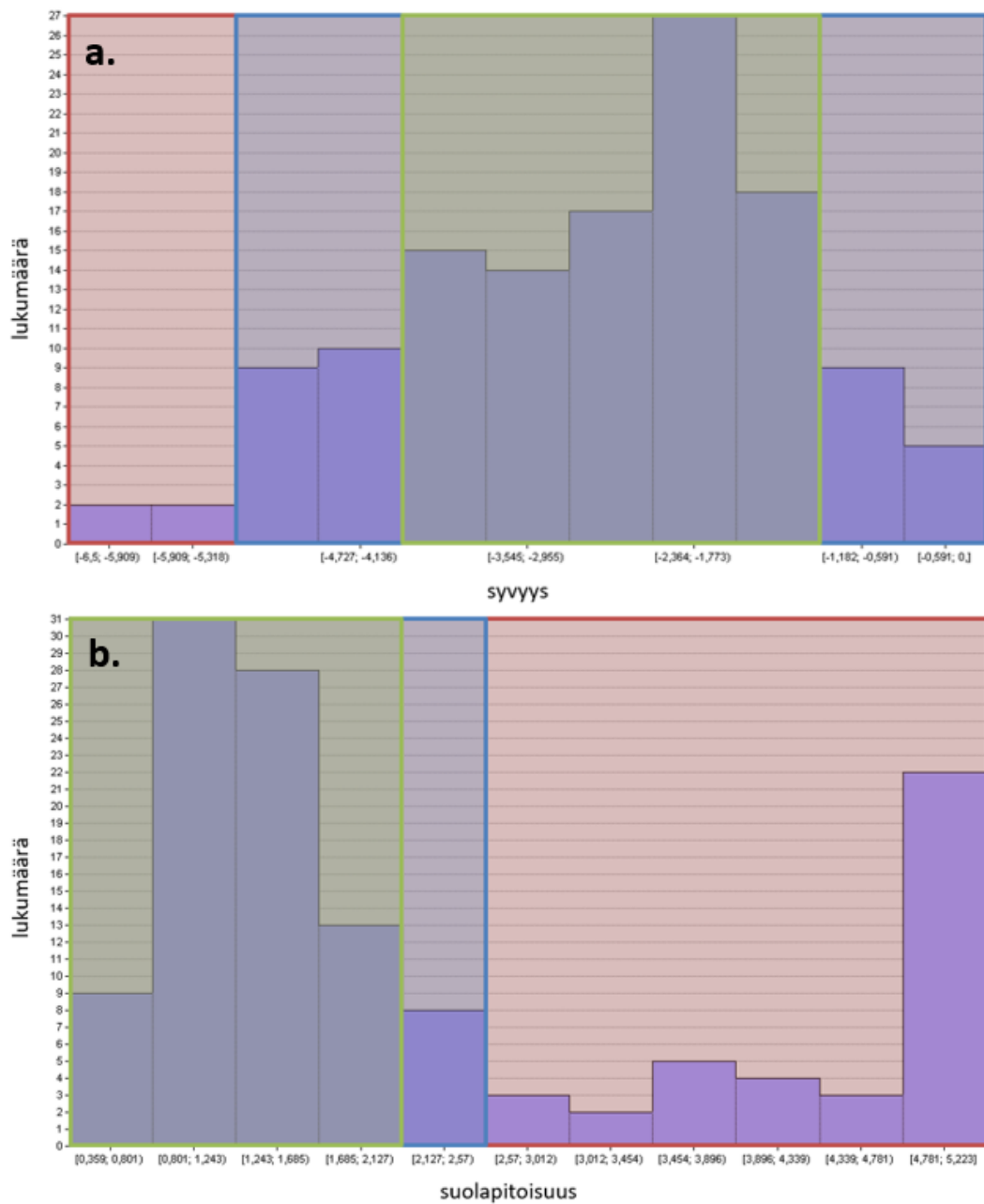
Histogrammeista rajattiin kolme erilaista aluetta raja-arvoilla, joiden sisällä olosuhteet kyseiselle lajille voivat olla joko mahdolliset, hyvät tai erinomaiset. Raja-arvojen sijainnit histogrammissa määräytyivät lajihavaintojen mukaisesti. Kaikki arvot, joiden sisällä lajista on suoritettu havaintoja, merkittiin tutkimuksessa mahdollisiksi elinalueiksi. Hyvien ja erinomaisten elinalueiden rajaukset suoritettiin samojen arvojen perusteella oman arvion mukaisesti. Histogrammeissa esiintyi kuitenkin joko virheellisiä tai muita mahdollisia yksittäisiä havaintoja, jotka poikkesivat selvästi muista kyseisen lajin suosimista ympäristömuuttujan arvoista. Näitä yksittäisiä havaintoja ei otettu mukaan tutkimukseen, vaan ne jätettiin lajeille mahdollisen elinalueen ulkopuolelle. Histogrammeissa punainen alue käsittää lajeille mahdollisen elinalueen, sininen hyvän ja vihreä erinomaisen. Kuvista on syytä myös huomata, että luokitusten rajaukset menevät päällekkäin. Esimerkiksi erinomainen elinalue sisältää samalla myös hyvän ja mahdollisen luokituksen elinalueeseen. Kakkien tutkimuksessa käytettyjen ympäristömuuttujien histogrammit ovat esitettyinä teoksen liitteissä sivuilla 67-80.



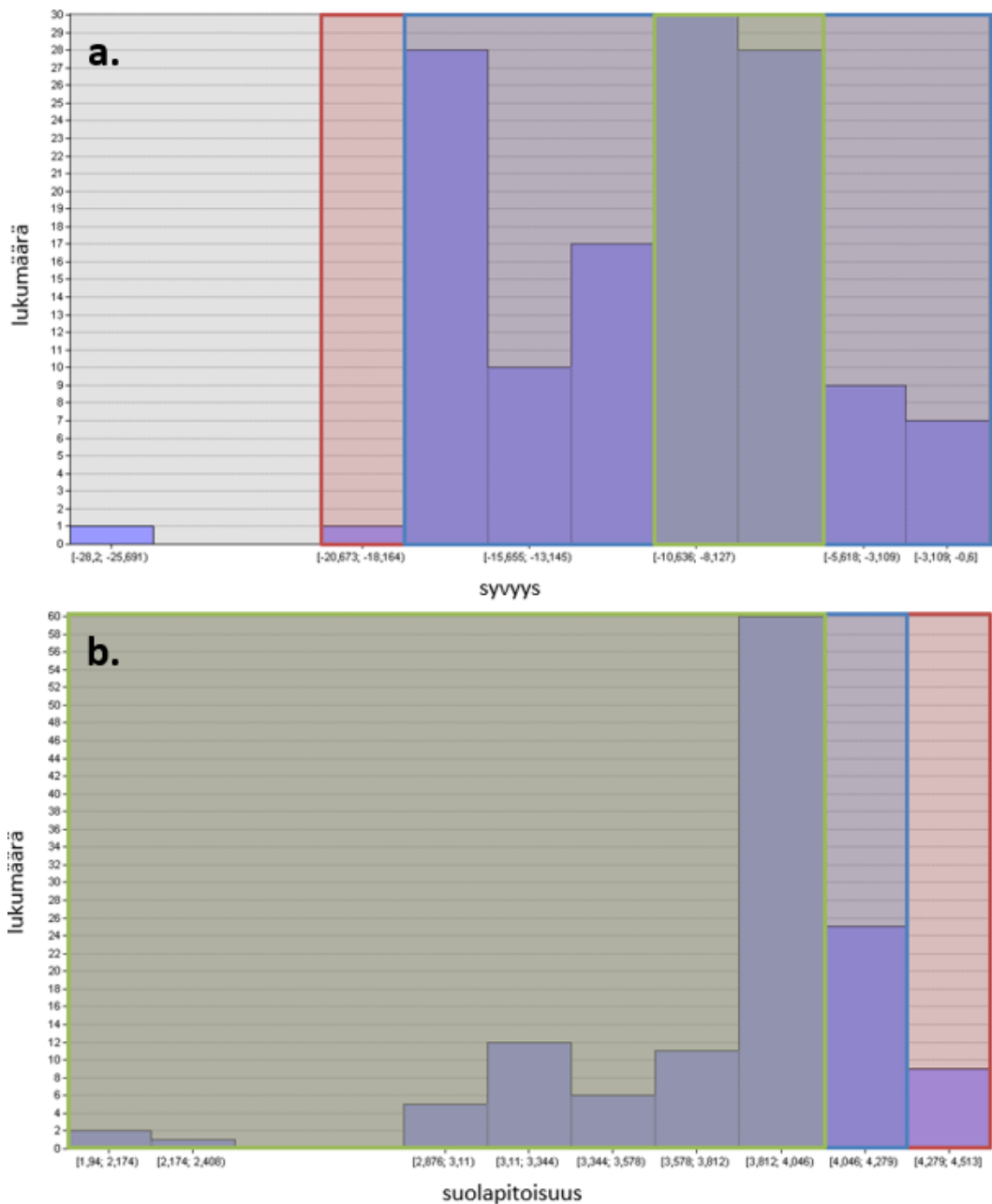
Kuva 9. Sinisimpukan syvyyden (a) ja suolapitoisuuden (b) ympäristömuuttujia kuvaavat histogrammit. Punainen alue esittää mahdollista elinaluetta, sininen soveliaasta ja vihreä erittäin soveliaasta. Luokitukset menevät limittäin, eli erittäin soveliaat alueet sisältyvät myös luokkiin: sovelias ja mahdollinen.



Kuva 10. Meriruohon syvyyden (a) ja suolapitoisuuden (b) ympäristömuuttujia kuvaavat histogrammit. Punainen alue esittää mahdollista elinaluetta, sininen soveliaasta ja vihreä erittäin soveliaasta. Luokitukset menevät limittäin, eli erittäin soveliaat alueet sisältyvät myös luokkiin: sovelias ja mahdollinen.



Kuva 11. Vesisammaleen syvyyden (a) ja suolapitoisuuden (b) ympäristömuuttujia kuvaavat histogrammit. Punainen alue esittää mahdollista elinaluetta, sininen soveliaista ja vihreä erittäin soveliaista. Luokitukset menevät limittäin, eli erittäin soveliaat alueet sisältyvät myös luokkiin: sovelias ja mahdollinen.



Kuva 12. Vesisien syvyyden (a) ja suolapitoisuuden (b) ympäristömuuttujia kuvaavat histogrammit. Punainen alue esittää mahdollista elinaluetta, sininen soveliaista ja vihreä erittäin soveliaista. Luokitukset menevät limittäin, eli erittäin soveliaat alueet sisältyvät myös luokkiin: sovelias ja mahdollinen.

Histogrammien avulla saatujen raja-arvojen perusteella voitiin muodostaa laskentakaavat Expert Assistance Distribution Model (EADM) -mallinnustyökalua varten. Laskentakaavat valmistettiin Excel-taulukossa, jossa raja-arvot merkittiin kullekin olosuhteelle. Laskentakaava antoi lajin esiintymisen kannalta mahdollisille alueille arvon 1, soveliaille alueille arvon 10 ja erittäin soveliaille alueille arvon 100. Tämä toimenpide suoritettiin kaikille tarkasteltaville ympäristömuuttujille: suolapitoisuus, syvyys, sameus, valosyvyys, näkösyvyys, pohjan lämpötila sekä pH. Excelissä valmistettu kaava on seuraava, jossa X on ympäristömuuttuja:

```

SetNull(Con(("X"*1000)<=-1180)&(("X"*1000)>-
4100),100,Con(("X"*1000)<=0)&(("X"*1000)>-
5310),10,Con(("X"*1000)<=0)&(("X"*1000)>-6500),1,0)), Con(("X"*1000)<=-
1180)&(("X"*1000)>-4100),100,Con(("X"*1000)<=0)&(("X"*1000)>-
5310),10,Con(("X"*1000)<=0)&(("X"*1000)>-6500),1,0)),"Value = 0")

```

Edeltävästä työvaiheesta saatiin kullekin tarkasteltavalle lajille suotuiset elinalueet kustakin ympäristömuuttujasta. Seuraavassa työvaiheessa näiden ympäristömuuttujien tulokset laskettiin yhteen Raster Calculator -työkalun avulla. Toimenpide on yksinkertainen yhteenlasku, josta saatiin tulokseksi kullekin lajille sen nykyinen elinalue tarkasteltavien ympäristömuuttujien sekä saatujen lajihavaintojen perusteella. Seuraavassa työvaiheessa aloitettiin kolmen erilaisen skenaarion mallinnus. Näiden mallinnusten avulla pyrittiin havainnoimaan, minkälaisia muutoksia Itämeren suolapitoisuudessa tapahtuu ilmaston muuttuessa ja miten se vaikuttaa tarkasteltavien eliöiden elinalueisiin.

Uusien skenaarioiden mallinnus aloitettiin Raster Calculator -työkalun avulla, jolla vähennettiin haluttu suolapitoisuuden muutos aiemmasta suolapitoisuuden ympäristömuuttuja -aineistosta. Tutkimuksessa käytetyt muutokset suolapitoisuudessa on hankittu Meier (2015) teoksesta Projected Change—Marine Physics, joka on julkaistu Bolle, H.J. ym. (2017) teoksessa Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. Teoksessa esitetään tutkimuksiin perustettuja arvioita suolapitoisuuden muutoksista Itämeren eri osissa eri syvyyksiltä. Tähän tutkimukseen valittiin Suomenlahtea ja Pohjanlahtea kuvaavat arviot suolapitoisuuden muutoksista. Näiden alueiden arviot ovat erittäin samankaltaisia ja kattavat suuren osan tutkimusalueesta ja sopivat siksi kuvaamaan yleisesti koko tutkimusalueella tapahtuvaa muutosta. Tarkasteltava syvyys valittiin puolestaan tutkimukseen valikoitujen lajien suosimien syvyyksien keskiarvon perusteella. Sopivaksi tarkasteltavaksi syvyydeksi osoittautui 5m, jolloin Meier (2015) mukaan suolapitoisuuden arvioidut muutokset olisivat 1,75 - 1,25 ‰ välillä. Tuloksiksi saatuja suolapitoisuuden skenaarioita kuvaavia rastereita täytyi laskujen jälkeen vielä hieman viimeistellä. Koska laskukaavassa suoritettiin vähennyslasku, muuttuivat pienimmät suolapitoisuuden arvot Suomenlahden ja Perämeren perukoilla negatiivisiksi. Tämä saattaisi aiheuttaa myöhemmissä tutkimuksen vaiheissa vääristymiä, erityisesti makeassa vedessä elävien lajien laskennoissa. Negatiiviset luvut saatiin poistettua Raster Calculator -työkalun avulla, jossa jokaiselle kolmelle skenaariolle suoritettiin seuraava laskukaava, jossa X on suolapitoisuuden skenaarion rasteri:

Con(X<0,0,X)

Tämä laskukaava tarkastaa kaikki rasterin pikselien arvot ja muuttaa jokaisen arvon, joka on alle nollan, arvoksi 0. Tutkimuksen edetessä tuloksissa havaittiin silti

vääristymiä. Pinta-alat olivat vääristyneet siitä huolimatta, että negatiiviset arvot oli muutettu edellä mainitulla laskukaavalla nolliksi. Tarkemman tarkastelun myötä havaittiin, että ArcMap:in laskenta ei tulkinnut nolla-arvojen kuuluvan nolasta alkavien luokitusten sisäpuolelle, jolloin ohjelma kadotti myös nolla-arvot rasteripinnasta ja sen seurauksena pinta-aloissa havaittiin vääristymiä. Edeltävän työvaiheen laskentakaavaa päätettiin muuttaa siten, että negatiiviset arvot muutettiin lähelle nolaa: 0,0001. Uusi laskukaava on muuten edeltävän kaltainen ja toimittaa saman toimenpiteen:

Con(X<0,0.0001,X)

Tämän laskukaavan avulla pinta-alat eivät enää vääristyneet ja suolapitoisuuden arvot pysyivät riittävän lähellä nolaa, ettei se aiheuttanut vääristymiä lajien elinalueiden mallinnuksessa. Tämän korjauksen jälkeen edeltävät työvaiheet toistettiin uudelleen aina suolapitoisuuden uusien skenaarioiden laskemisesta asti, jotta vanhat virhelähteet ja niitä seuranneet laskennat eivät aiheuttaisi virheitä myöhemmissä työvaiheissa.

Edeltävästä työvaiheesta saatujen suolapitoisuuden skenaarioiden avulla voitiin laskea kullekin lajille uudet elinalueet kuvaamaan elinalueissa tapahtuvia muutoksia suolapitoisuuksien muutosten myötä. Toimenpide suoritettiin jälleen Raster Calculator työkalulla vastaavasti, kuten nykyisten elinalueiden laskemisessa. Tarkasteltavien lajien ympäristömuuttujat laskettiin yhteen uusien suolapitoisuutta kuvaavien ympäristömuuttujien kanssa. Näistä laskuista saatiin tuloksiksi kolme erilaista skenaariota kullekin lajille, jotka kuvaavat lajien elinalueita suolapitoisuuden muuttuessa. Tulokset antoivat jo selkeän kuvan skenaarioiden myötä tapahtuvista muutoksista. Seuraavaksi tuloksista haluttiin kuitenkin saada visuaalisesti selkeämmät, sekä selvittää pinta-alojen muutokset eri skenaarioiden välillä, jotka voitiin visualisoida myöhemmin.

Ensimmäiseksi jokaisen lajin neljä eri tilannetta kuvaavaa elinalueen rasteria haluttiin luokitella uudelleen neljään kategoriaan: heikko, kohtalainen, hyvä ja erinomainen elinalue. Koska tutkimuksessa tarkastellaan seitsemän eri ympäristömuuttujan yhteisvaikutusta, on pikselien arvojen maksimimäärä 700, joten se jaettiin neljään osaan: 0 – 175, 176 – 350, 351 – 525 sekä 526 – 700. Uudelleenluokittelu suoritettiin Reclassify -työkalun avulla. Seuraavaksi rasterit muutettiin polygoni -muotoon Raster to Polygon -työkalulla. Tämän jälkeen polygoneille laskettiin pinta-alat. Jokaisen polygoni -aineiston attribuuttitaulukkoon luotiin uusi sarake pinta-alaa varten, johon Calculate Geometry -työkalulla laskettiin kyseisen aineiston pinta-alat jokaiselle aineiston polygonille. Seuraavaksi polygonit ja erityisesti niiden pinta-alat laskettiin yhteen aikaisemmin luotujen neljän luokituksen mukaisesti. Tämä suoritettiin Summary Statistics -työkalulla, jonka avulla voitiin laskea samaan luokitusarvoon kuuluvien polygonien pinta-alat yhteen. Tämä työkalu luo pelkän taulukon, jossa on

vain neljä riviä, kullekin luokitukselle, ja jossa pinta-alat on laskettu yhteen jokaiselle luokitukselle. Toimenpide toistettiin kaikille aineistoille, joten lopuksi käytössä oli 16 taulukkoa, jotka sisälsivät kunkin lajin elinalueiden pinta-alat kustakin skenaariosta. Näiden taulukoiden avulla voitiin valmistaa Excelissä diagrammeja tulosten visualisointia varten.

Tutkimuksen tulokset koostuvat useista kartoista, jotka kuvaavat tarkasteltavien lajien elinalueiden muutoksia erilaisissa suolapitoisuuden alenemisen skenaarioissa. Näiden karttojen avulla pystyttiin myös laskemaan, kuinka suurista muutoksista on kyse kunkin lajin kohdalla. Paikkatietoanalyysien ja -laskujen kautta saatujen arvojen avulla pystyttiin valmistamaan diagrammeja kuvaamaan jokaisen lajin elinalueiden pinta-alojen muutoksia nykytilanteen ja kolmen eri skenaarion välillä.

3.3.2 Expert Assisted Distribution Model, EADM

Tutkimuksessa hyödynnettiin Metsähallituksen GIS -ryhmän luomaa Expert Assisted Distribution Model, EADM, -mallinnustyökalua, jonka avulla kyetään tarkkaan mallinnustyöhön ottaen samalla huomioon kenttätyöskentelyn erilaisia piirteitä (Björkman & Sahla 2018 [luonnos]). EADM:n avulla voidaan tarkastella kenttähavaintojen ja ympäristömuuttujien tilastollisia aineistoja. Kyseisen mallinnustyökalun avulla on myös mahdollista sivuuttaa aineistoissa esiintyviä tilastollisia vääristymiä, jotka ovat aiheutuneet havaintojen epätasaisesta jakautumisesta. Tutkimuksessa käytetyssä aineistoissa tällaisia tilastollisia vääristymiä saattavat aiheuttaa esimerkiksi veneille liian matalat alueet tai ulkomerellä sijaitsevat hankalapääsyiset syvänteet. Tällaisten esteiden vuoksi kyseisiltä alueilta ei välttämättä saada havaintoja. Automaattisissa mallinnusmenetelmissä hyödynnetään tavallisesti tarkastusdataa, jolla pyritään korjaamaan varsinaisen aineiston virheitä ja saamaan tilastolliset korrelaatiot korkeiksi. Tässä menetelmässä on ongelmana kuitenkin se, että myös tarkistusdata on samalla tavalla rajoittunut kuin varsinainen aineisto. EADM:n avulla pystytään sivuuttamaan vastaavat ongelmat muiden aineistojen perusteella ja korjaamaan aineistoissa esiintyviä puutteita. Näistä korjaavista menetelmistä kerrotaan tarkemmin seuraavissa kappaleissa esimerkkitalanteiden avulla. EADM yhdistää muokatut muuttujat ja paikkatiedon mallintaakseen tutkittujen lajien suosimat tai biotoopeille soveltuvat elinalueet.

EADM:n edut nousevat parhaiten esille yksinkertaisen esimerkin avulla. Tarkastellaan tilannetta, jossa näytteenottojen määrät poikkeavat eri ympäristögradienttien kesken. Kyseessä ei aina ole välttämättä virhe, vaan tilanne, jossa useampien näytteenottojen kerääminen ei ole mahdollista. Esimerkkitalanne on seuraava (Björkman & Sahla 2018 [luonnos]):

- 1 metrin syvyydestä 100 näytteenottoa, joissa havaitaan 10 yksilöä lajia A
- 2 metrin syvyydestä 500 näytteenottoa, joissa havaitaan 50 yksilöä lajia A
- 3 metrin syvyydestä 1000 näytteenottoa, joissa havaitaan 100 yksilöä lajia A
- 4 metrin syvyydestä 0 näytteenottoa, joissa havaitaan 0 yksilöä lajia A

Yksilöhavaintojen ja näytteenottojen määrien väliset suhteet ovat jokaisessa tilanteessa samat, joten lajia A on yhtä toden näköistä havaita yhden metrin syvyydessä, kuin kahden tai kolmen metrin syvyydessä. Kirjallisuuden pohjalta tiedämme kuitenkin, että laji A voi menestyä hyvin myös neljän metrin syvyydessä. Useat vanhat mallinnusmenetelmät tulkitsivat kyseisen aineiston siten, että laji A menestyisi parhaiten kolmen metrin syvyydessä ja vähenisi pintaa kohden, koska yksilöhavaintojen määrä vähenee. Kyseinen laji ei myöskään pärjäisi kolmea metriä syvemmällä. EADM:n avulla suoritettuun mallinnukseen voidaan kuitenkin ottaa huomioon sekä tutkimuksen näytteenottojen rakenne, sekä kirjallisuudesta löytyvä tieto kyseisestä lajista. EADM ei siis tee suoraan samankaltaista oletusta tutkimuksesta kuin vanhat mallinnusmenetelmät, vaan arvioi tilanteen niin, että lajia A havaitaan 1-3 metrin syvyydessä samalla todennäköisyydellä. Ulkopuolisen tiedon avulla mallinnukseen voidaan myös syöttää tieto, että lajia havaitaan myös neljässä metrissä, vaikka tutkimus ei sisällä näytteenottoja kyseiseltä syvyydeltä. EADM ei kuitenkaan poista mahdollisuutta, että kyseinen laji esiintyisikin vanhojen mallinnusten oletaman gradientin mukaisesti. EADM luokittelee lajin elinalueet kolmeen eri luokkaan: hyvä-, keskiverto- ja huono soveltuvuus. Alueita, joita kyseinen laji ei voi hyödyntää, ei mallinneta lainkaan.

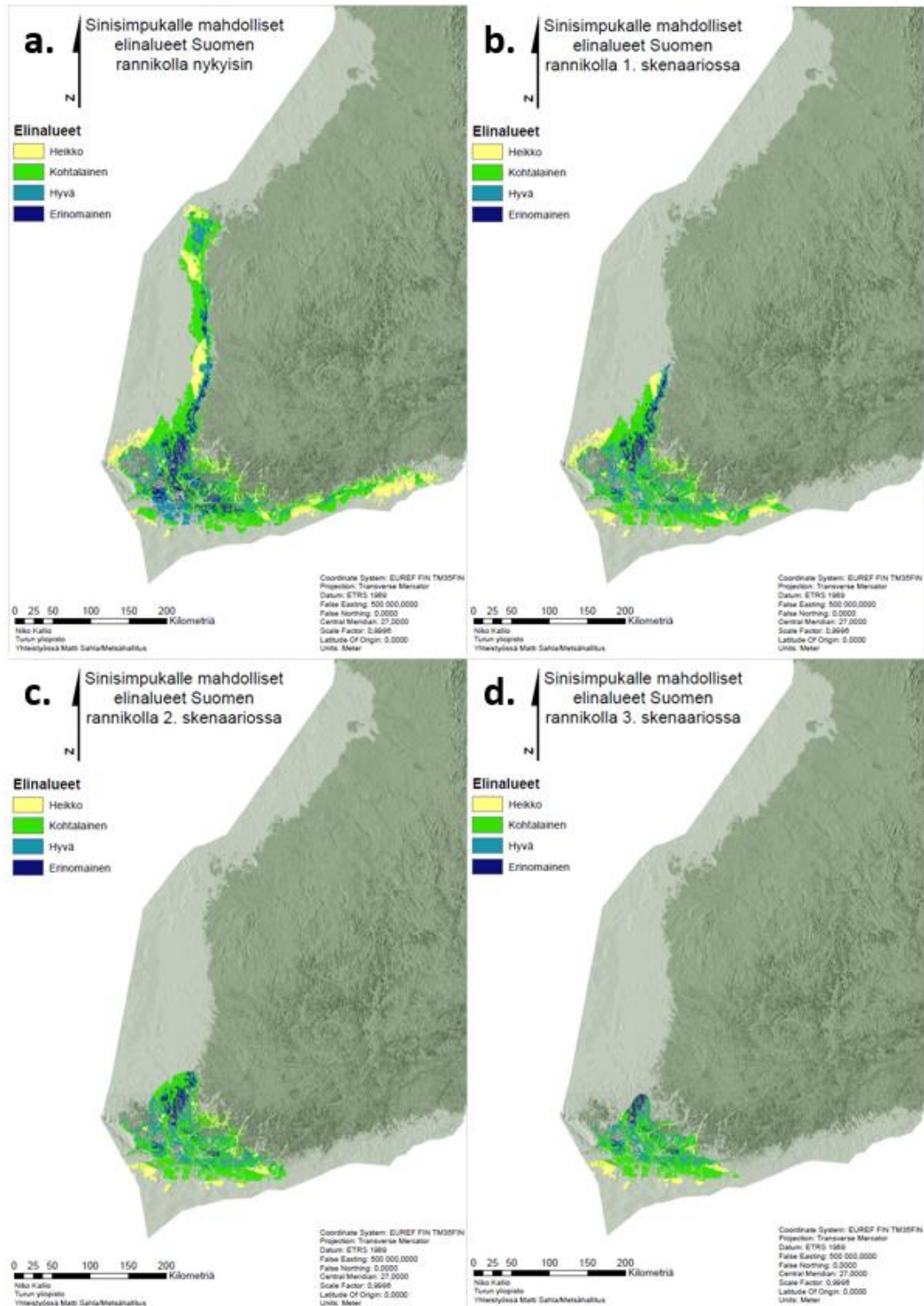
Toinen hyvä esimerkki EADM -mallinnustyökalun hyvistä puolista on tässäkin tutkimuksessa kohdattu tilanne esimerkiksi meriruohon kanssa. Tutkimuksessa hyödynnettiin lajihavaintoja ja ympäristömuuttujia elinalueiden luokittelussa. Käytettävien aineistojen lajihavainnoissa ei kuitenkaan ollut meriruohosta havaintoja 6,09 % suolapitoisuutta korkeammilla alueilla. Vanhat mallinnustyökalut olisivat saattaneet tulkita, että kyseinen laji ei kykene elämään kyseistä suolapitoisuutta suuremmissa pitoisuuksissa. Tiedämme kuitenkin muista lähteistä, että meriruohoa esiintyy esimerkiksi Tanskan salmilla asti ja huomattavasti korkeammassa suolapitoisuuksissa. EADM -mallinnustyökalu mahdollisti aineiston muokkaamisen siten, että voimme merkitä tutkimuksessa tarkasteltavan lajin suolapitoisuuden ylärajan omaan tutkimusalueeseen sopivaksi. Meriruohon elinalueet eivät siis voi tutkimusalueella rajoittua liian korkean suolapitoisuuden vuoksi. Vanhoja menetelmiä käytettäessä se olisi saattanut rajata elinalueita liikaa suolapitoisuuden ylärajan mukaisesti, jolloin tutkimuksen tulokset olisivat olleet vääristyneitä. Sama ilmiö esiintyi tutkimuksessa myös makean veden lajien suhteen, mutta päinvastaisena. Lajihavaintojen ulkopuolisista lähteistä tiedetään, että kyseiset lajit

selviävät suolattomissa olosuhteissa, jolloin niiden suolapitoisuuden alarajoiksi voitiin merkitä 0 ‰. Siten varmistettiin, ettei mallinnusmenetelmä poista elinalueita Suomenlahden ja Perämeren perukoilta suolapitoisuuden laskiessa.

4 Tulokset

4.1 Sinisimpukan elinalueet heikentyvät

Tutkimuksessa saatujen tulosten perusteella sinisimpukan elinalueet tulisivat suolapitoisuuden alentuessa vähentymään runsaasti (Kuva 13). Mikäli Itämeren suolapitoisuus alenee 1,25 ‰, katoaa sinisimpukalta 8 894,02 km² eli 35,2 % sen elinalueista Suomen rannikolla. On kuitenkin syytä muistaa, että vastaavanlaisia muutoksia tapahtuu myös tutkimusalueen ulkopuolella, Ruotsin ja Viron rannikoilla. 1,25 ‰:n muutokset suolapitoisuudessa ovat BACC:n ennusteen marginaalin alimmasta päästä (Meier 2015). Marginaalin keskivaiheilla, 1,5 ‰:n suolapitoisuuden alenemisessa, sinisimpukalta katoaa 13 035,77 km², eli 51,6%, ja marginaalin ylärajalla, 1,75 ‰:n muutoksessa, 17 134,88 km², eli 67,9 %, lajin elinalueista. Nämä muutokset sinisimpukalle ovat suuria näin lyhyellä aikavälillä ja pienillä suolapitoisuuden muutoksilla.



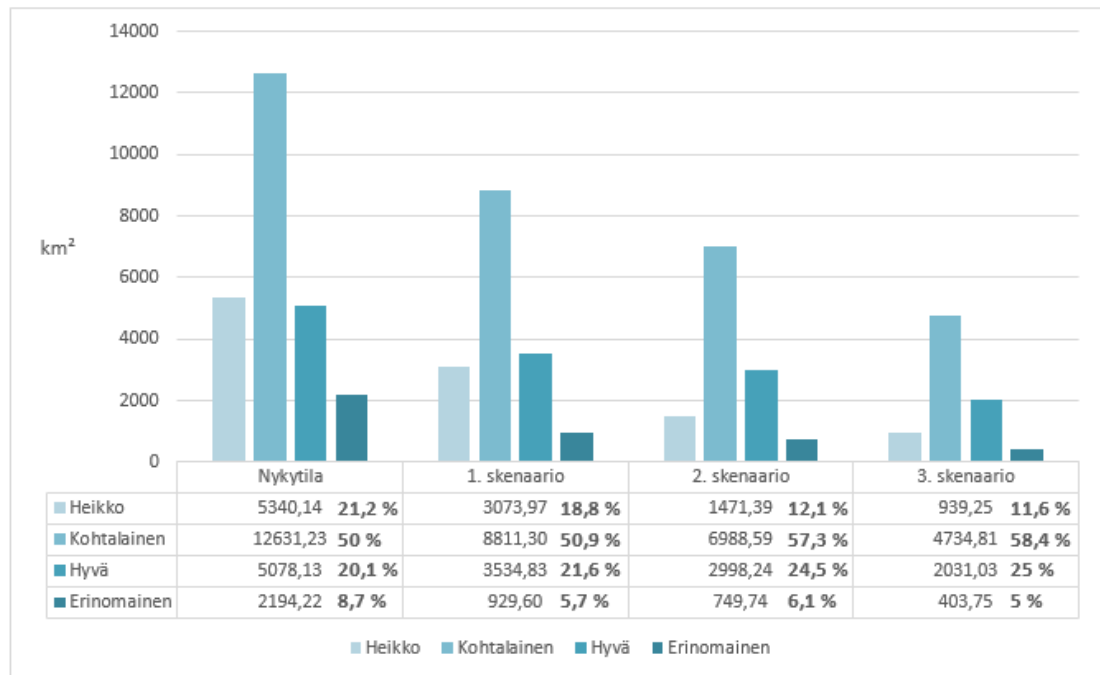
Kuva 13. Sinisimpukan mahdollisten elinalueiden muutokset Suomen rannikolla nykytilanteen ja kolmen skenaarion välillä. Kuva a: Sinisimpukan mahdolliset elinalueet nykyisin. Kuva b: Sinisimpukalle mahdolliset elinalueet 1. skenaarion mukaan. Kuva c: Sinisimpukalle mahdolliset elinalueet 2. skenaarion mukaan. Kuva d: Sinisimpukalle mahdolliset elinalueet 3. skenaarion mukaan. Kartat suurennettuina teoksen liitteissä sivuilla 81-84.

Elinalueiden kokonaisvaltaisen pinta-alan vähenemisen lisäksi kartasta voidaan myös havaita sinisimpukan elinalueiden heikentymistä. Nykytilanteessa esimerkiksi suuri osa Saaristomeren vesistöistä on sinisimpukalle hyvää tai jopa erinomaista elinaluetta. Alueen ympäristömuuttujat ovat sinisimpukalle parhaat mahdolliset Suomen rannikolla. Saaristomeren alueella tapahtuu kuitenkin selkeä muutos jo ensimmäisen skenaarion myötä suolapitoisuuden alentuessa 1,25 %. Suuri osa alueesta heikentyy kohtalaiseksi ja osa jopa heikoksi. Sinisimpukalle erinomaisia elinalueita jää tutkimuksen mukaan vain Pohjanlahden kaakkoisosan rannikolle, Saaristomeren pohjoisosiin sekä yksittäisiä laikkuja Saaristomerelle. Myös ulkosaariston laajat ja suotuisat elinalueet heikentyvät suolapitoisuuden alentuessa vain kohtalaiselle tasolle. Suolapitoisuuden alenemisen jatkuessa Pohjoisen saaristomeren suotuisat elinalueet katoavat lähes kokonaan, jättäen lopuksi vain suhteellisen pienen elinalueen, jossa elinolosuhteet ovat sinisimpukalle otolliset. Myös Saaristomeren sisäsaariston sekä Ahvenanmaan pohjoispuoliset elinalueet alkavat kadota 1,5 %:n suolapitoisuuden alenemisen myötä.

Näitä muutoksia voidaan tarkastella vielä tarkemmin tutkimuksessa valmistetusta diagrammista, jossa esitetään elinalueiden luokitusten muutoksia eri skenaarioissa (Kuva 14). Diagrammista käy selkeästi ilmi, kuinka paljon sinisimpukan elinalueet heikentyvät Suomen rannikolla niin absoluuttisesti kuin suhteellisestikin. Erinomaisten elinalueiden pinta-ala on nykyiseltään 2 194,22 km² ja se kattaa 8,7 % sinisimpukan nykyisistä elinalueista. Näillä elinalueilla tutkimuksessa käytetyt ympäristömuuttujat ovat sinisimpukalle otollisimmat. Suolapitoisuuden alentuessa tämän luokituksen absoluuttinen pinta-ala, kuten myös sen osuus sinisimpukan kokonaisvaltaisesta elinalueesta, vähentyy. 1,25 %:n alenemisessa tämän luokituksen pinta-ala putoaa jo alle 1 000 km² ja sen prosentuaalinen osuus jää jo alle 6 %. Tutkimuksessa oletetun suurimman suolapitoisuuden alenemisen tilanteessa, eli 1,75 % laskussa, erinomaisia elinalueita jää sinisimpukalle vain noin 400 km² jonka osuus koko pinta-alasta putoaa vain 5 %:iin.

Diagrammista voidaan myös havaita, että sinisimpukalle huonoimpien elinalueiden pinta-ala paitsi vähenee, myös sen prosentuaalinen osuus putoaa suurimmillaan jopa n. 10 %. Suolapitoisuuden laskiessa voitaisiin olettaa huonoimpien elinalueiden prosentuaalisen osuuden kasvavan, mutta näin ei kuitenkaan tapahdu. Selvitystä tälle voidaan hakea palaamalla kuvan 13 karttaan, josta voidaan havaita, että suurin osa sinisimpukalle huonoimmista elinalueista sijaitsevat joko Pohjanlahdella, Merenkurkussa, Suomenlahdella tai Ahvenanmaan pohjoisrannikolla. Näiden alueiden heikkolaatuisuus sinisimpukalle johtuu suolapitoisuuden alhaisuudesta, mutta myös Itämeren pH:n happamuudesta, liiallisesta syvyydestä sekä osittain myös veden sameudesta. Oletettujen elinalueiden mallinnukset on suoritettu muokkaamalla suolapitoisuuden arvoja ennusteiden mukaisesti. Tutkimuksessa oletetaan, että muut tutkimuksessa käytettävät ympäristömuuttujat eivät muutu

seuraavan 50 vuoden aikana merkittävästi. Tästä syystä tuloksissa havaitaan vain suolapitoisuuden vaikutukset elinalueille. Tämän seurauksena muista ympäristömuuttujista johtuvat heikot elinalueet jäävät kokonaan sinisimpukalle mahdollisten elinalueiden ulkopuolelle. Pelkkä suolapitoisuuden aleneminen ei välttämättä riitä pudottamaan nykyistä erinomaista elinaluetta heikoksi tai kohtalaiseksi. Suurin osa Saaristomeren erinomaisista elinalueista heikentyy vain hyvään luokitukseen, mikä myös selittää kyseisen luokituksen prosentuaalisen kasvamisen.

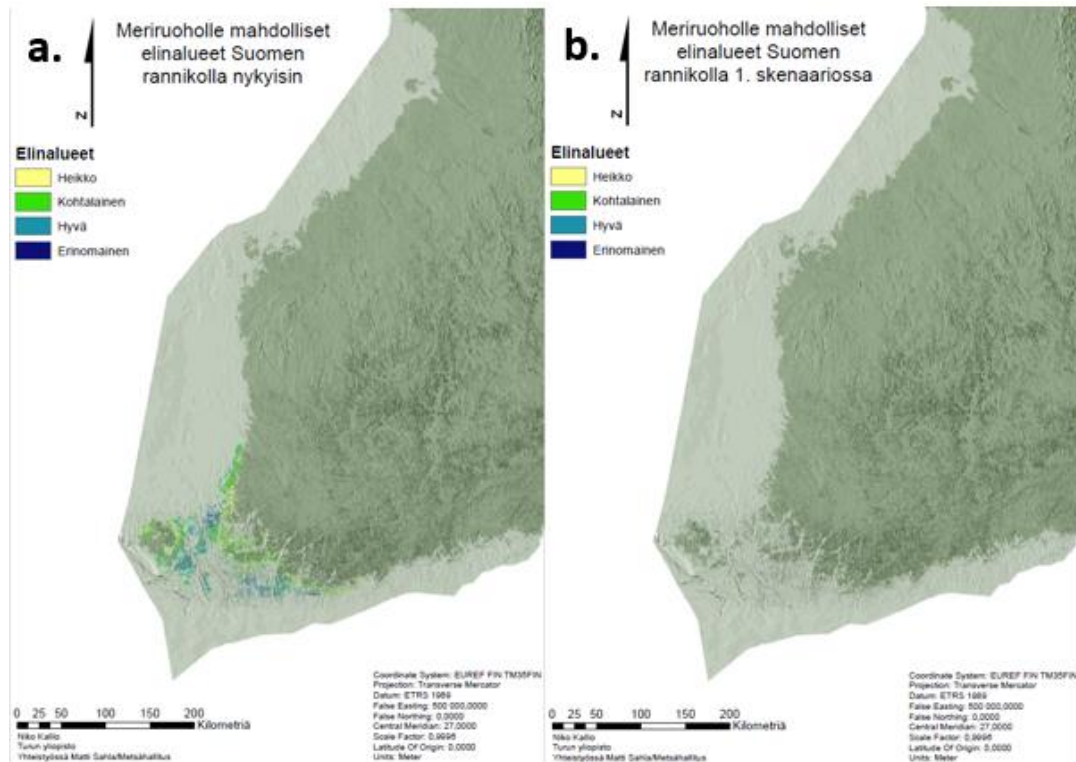


Kuva 14. Sinisimpukan elinalueiden pinta-alojen (km²) muutokset suolapitoisuuden alentuessa nykytilanteen ja kolmen eri skenaarion kesken. Diagrammissa esitetään pinta-alojen muutokset neljässä eri tilanteessa: nykytilanne, 1. skenaario, 2. skenaario ja 3. skenaario. Diagrammi esittää myös neljä eri luokitusta sinisimpukan elinalueista niiden kelpoisuuden mukaisesti, jotka on luokiteltu ympäristömuuttujien avulla: heikko, kohtalainen, hyvä ja erinomainen. Diagrammin taulukossa esitetään myös tarkat pinta-alat kutakin luokitusta kohtaan jokaisesta skenaariosta. Kuvan taulukossa esitetään myös lihavoiduilla arvoilla kunkin luokituksen suhteellinen osuus kyseisen skenaarion elinalueesta.

4.2 Meriruoho katoaa Suomen rannikolta

Sinisimpukan lisäksi tutkimuksessa tarkasteltiin toista Itämeren merellistä lajia, meriruohoa. Kuten sinisimpukan, myös meriruohon elinalueet näyttävät tutkimuksen tulosten perusteella vähenevän runsaasti Suomen rannikolla sekä koko Itämerellä. Meriruohon elinalueet ovat jo nykyisin niukat tutkimusalueella (Kuva 15), sillä nykyinen Itämeren suolapitoisuus rajoittaa meriruohon leviämistä pohjoisemmaksi Perämerellä tai idemmäksi Suomenlahdelle. Nykyisin meriruohon elinalueet kattavat noin 2 440 km², ja suurin osa näistä alueista sijoittuu Saaristomerelle. Meriruoholle erinomaisia elinalueita havaitaan kuitenkin myös

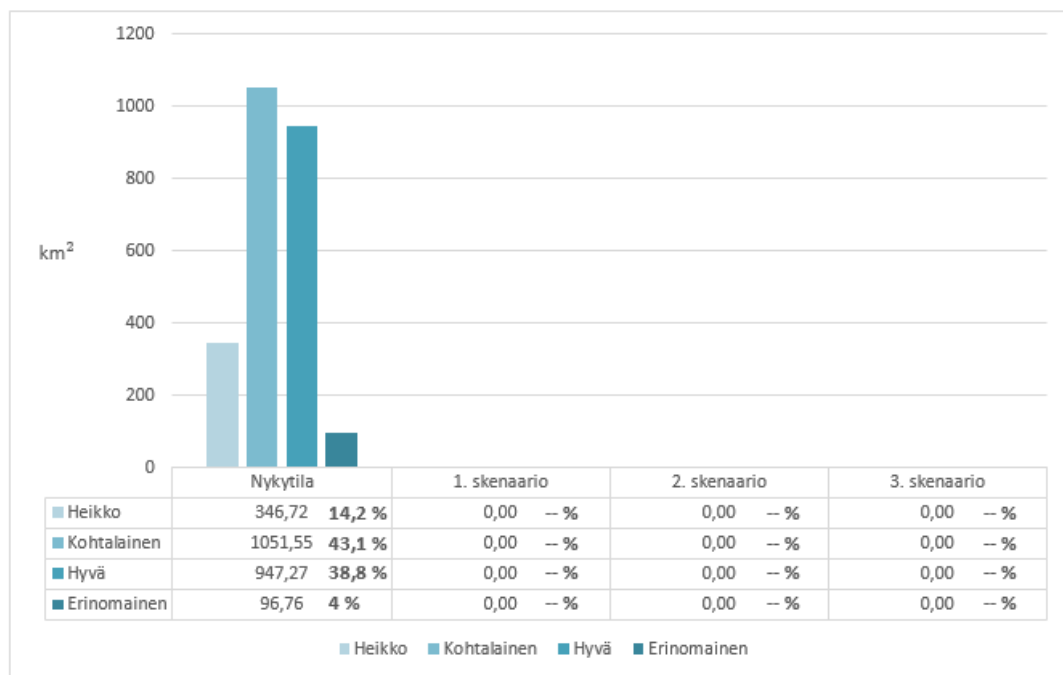
Hangon etelärannikolla sekä aivan Saaristomeren pohjoisosissa. Tarkasteltavien ympäristömuuttujien mukaan meriruoholle on myös mahdollista levitä itään lähes Helsinkiin asti Suomen rannikkoa pitkin sekä pohjoiseen noin Rauman korkeuksille Perämerellä. Nämä elinalueet ovat meriruoholle kuitenkin pääasiassa heikkoja tai kohtalaisia.



Kuva 15. Meriruohon mahdollisten elinalueiden muutokset Suomen rannikolla nykytilanteen ja kolmen skenaarion välillä. Kuva a: Meriruoholle mahdolliset elinalueet nykyisin. Kuva b: Meriruoholle mahdolliset elinalueet 1. skenaarion mukaan. Kartat suurennettuina teoksen liitteissä sivuilla 85-86.

Noin 1 000 km² koko tutkimusalueen mahdollisista meriruohon nykyisistä elinalueista jää kohtalaiselle tasolle tarkasteltavien ympäristömuuttujien perusteella, ja noin 900 km² on hyviä elinalueita. Heikot elinalueet sijoittuvat nykyisin lähimmäksi rannikkoa, mikä johtuu jokien valunnan aiheuttamasta suolapitoisuuden vähäisyydestä sekä veden sameudesta, jolloin meriruoho ei saa tarpeeksi valoa yhteyttämiseen. Heikkoja elinalueita meriruoholle koko sen mahdollisista elinalueista on noin 14,2 %, eli noin 346 km². Koska tutkimuksessa tarkasteltava alue on meriruohon esiintymisalueiden ääri rajoilla, ei tutkimusalueelta löydy kovinkaan runsaasti meriruoholle erinomaisia elinalueita. Koko elinalueesta vain 4%, eli noin 96 km² on tarkasteltavien ympäristömuuttujien mukaisesti erinomaisia elinalueita meriruoholle. Meriruohon elinalueiden muutoksia kuvaavasta diagrammista voidaan jälleen havaita selkeästi, miten meriruohon nykyisten elinalueiden luokitukset jakautuvat keskenään (Kuva 16).

Meriruohon elinalueet muuttuvat erittäin merkittävästi Suomen rannikolla seuraavan 50 vuoden aikana. Ilmastonmuutosta seuraava suolapitoisuuden aleneminen poistaa meriruohon elinalueet tutkimusalueelta jo ensimmäisen tutkimuksessa tarkasteltavan skenaarion jälkeen. Kuten jo edellä mainittiin, tarkasteltava tutkimusalue sijoittuu meriruohon pohjoisimpiin elinalueisiin Itämerellä, minkä vuoksi jo 1,25 ‰ aleneminen suolapitoisuudessa riittää lajin katoamiseen Suomen rannikolta. Meriruohon elinalueet vetäytyvät etelämmäksi Itämerellä, ja suolapitoisuuden alenemisen myötä skenaarioissa 2. ja 3. elinalueet ajautuvat vieläkin kauemmaksi.

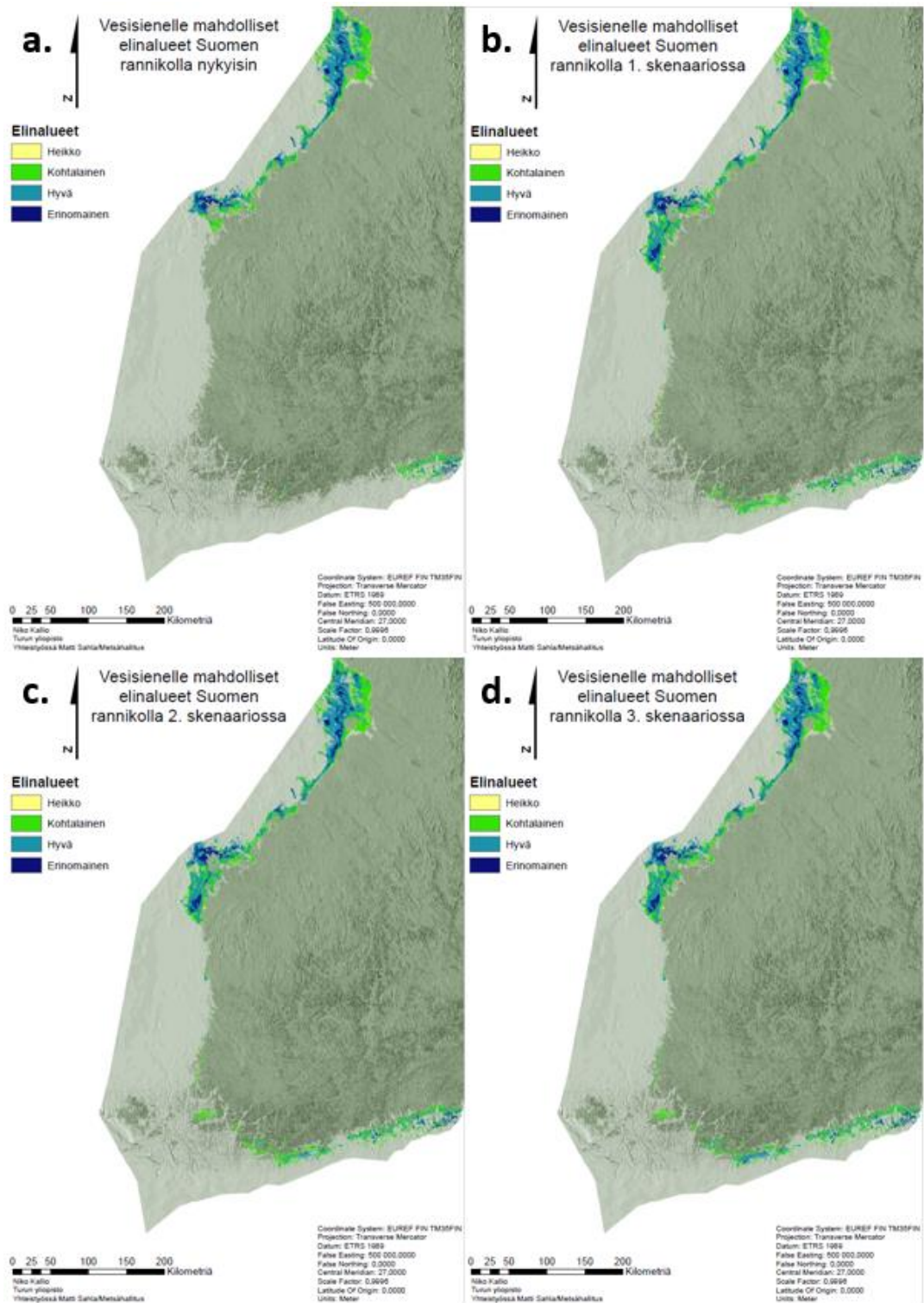


Kuva 16. Meriruohon elinalueiden pinta-alojen (km²) muutokset suolapitoisuuden alentuessa nykytilanteen ja kolmen eri skenaarion kesken. Diagrammissa esitetään pinta-alojen muutokset neljässä eri tilanteessa: nykytilanne, 1. skenaario, 2. skenaario ja 3. skenaario. Diagrammi esittää myös neljä eri luokitusta sinisimpukan elinalueista niiden kelpoisuuden mukaisesti, jotka on luokiteltu ympäristömuuttujien avulla: heikko, kohtalainen, hyvä ja erinomainen. Diagrammin taulukossa esitetään myös tarkat pinta-alat kutakin luokitusta kohtaan jokaisesta skenaariosta. Kuvan taulukossa esitetään myös lihavoituilla arvoilla kunkin luokituksen suhteellinen osuus kyseisen skenaarion elinalueesta.

4.3 Murtovesisieni levittäytyy uusille elinalueille asteittain

Merellisten lajien ohella tutkimuksessa tarkasteltiin myös makeassa vedessä viihtyviä lajeja, joiden tilanne suolapitoisuuden alenemisen myötä on sinisimpukkaan ja meriruohon verrattuna päinvastainen. Vesisienelle mahdollisten elinalueiden määrä lisääntyy tutkimuksen tulosten perusteella suolapitoisuuden alentuessa (Kuva 17). Mahdollisten elinalueiden pinta-ala kasvaa tutkimusalueella noin 37 % jo 1,25 ‰ suolapitoisuuden alenemisen myötä. Nykyisin vesisienien mahdolliset elinalueet kattavat 8 885 km², ja muutoksen myötä luku nousee 12 189 km². Elinalueet

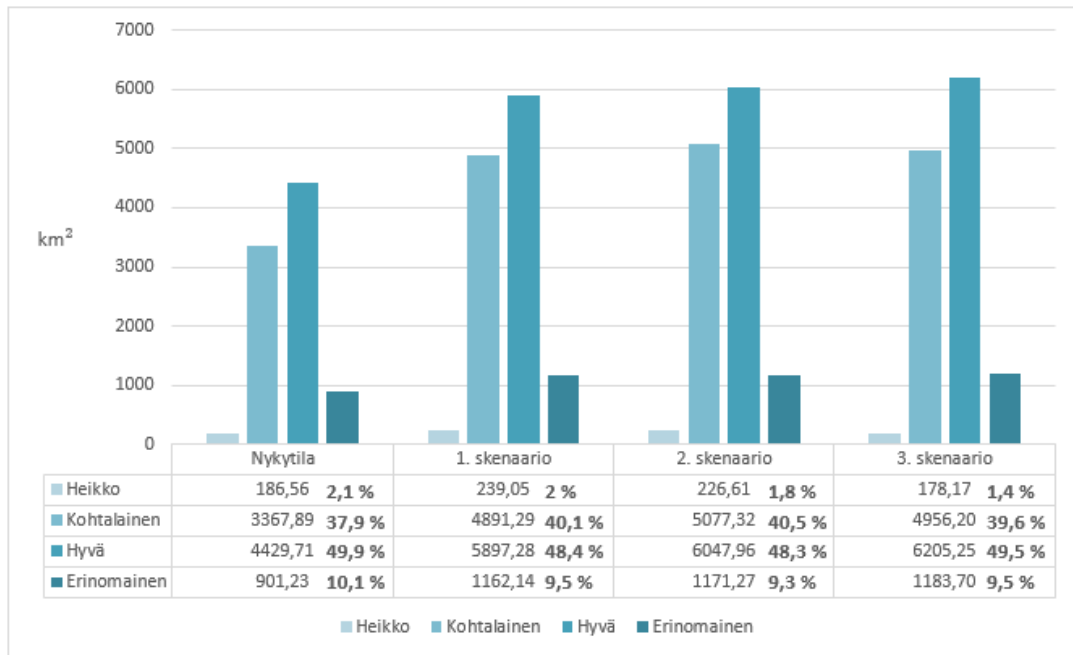
levittäytyvätkin jo 1. skenaarion myötä Saaristomeren reunamille. Suolapitoisuuden alenemisen myötä seuraavissa skenaarioissa elinalueet levittäytyvät Saaristomeren keskiosiin, ja samalla niiden laatu vesisienelle parantuu. Varsinaisen pinta-alan lisääntyminen ei ensimmäisen skenaarion jälkeen ole kovinkaan merkittävää tutkimusalueella Saaristomerellä tapahtuvia muutoksia lukuun ottamatta. Vesisien elinalueita kuvaavasta kartasta ja elinalueiden laatua kuvaavasta diagrammista (Kuva 18) havaitaan selvästi, että suurimmat pinta-alan muutokset tapahtuvat nykytilanteen ja suolapitoisuuden 1,25 ‰ alenemisen välillä. Tämän jälkeen suurimmat muutokset keskittyvät erityisesti Saaristomerelle, jossa elinalueiden laatu vesisienelle paranee. Perämeren, Pohjanlahden ja Suomenlahden elinalueissa ei tapahdu myöhemmissä skenaarioissa muutoksia juuri lainkaan, sillä suolapitoisuus ei ole enää elinalueiden rajoittavana tekijänä, vaan kyseisillä alueilla vesisien elinalueita rajoittavat muut tutkimuksessa tarkasteltavat ympäristömuuttajat.



Kuva 17. Vesisien mahdollisten elinalueiden muutokset Suomen rannikolla nykytilanteen ja kolmen skenaarion välillä. Kuva a: Vesisienelle mahdolliset elinalueet nykyisin. Kuva b: Vesisienelle mahdolliset elinalueet 1. skenaarion mukaan. Kuva c: Vesisienelle mahdolliset elinalueet 2. skenaarion mukaan. Kuva d: Vesisienelle mahdolliset elinalueet 3. skenaarion mukaan. Kartat suurennettuina teoksen liitteissä sivuilla 87-90.

Vesisien elinalueiden laatua kuvaavasta diagrammista ja taulukosta (Kuva 18) voidaan tehdä tarkempia havaintoja vesisien elinalueiden muutoksista eri skenaarioiden ja luokitusten välillä. Ensimmäisen, toisen ja kolmannen skenaarion muutokset elinalueissa keskittyvät lähes täysin Saaristomerelle. Vesisienelle heikkojen elinalueiden määrä tutkimusalueella on jo nykyiseltään hyvin vähäinen, vain 2,1 % elinalueista, eli noin 186 km². Elinalueiden lisääntymisen myötä myös tämän luokituksen pinta-ala kasvaa, mutta samalla sen prosentuaalinen osuus koko elinalueesta pienenee. Kuitenkin kolmannessa skenaariossa, jossa suolapitoisuuden oletetaan alenevan 1,75 ‰, heikkojen elinalueiden pinta-ala lähtee laskuun ja putoaa jopa alemmas kuin mitä se on nykyisellä tasollaan. Myös kohtalaisten elinalueiden määrä kasvaa niin absoluuttisesti kuin suhteellisesti kahdessa ensimmäisessä skenaariossa, joissa suolapitoisuuden muutos on 1,25 – 1,5 ‰. Kuitenkin kolmannessa skenaarioissa tämän luokituksen pinta-ala ja prosentuaalinen osuus tutkimusalueella lähtee laskuun.

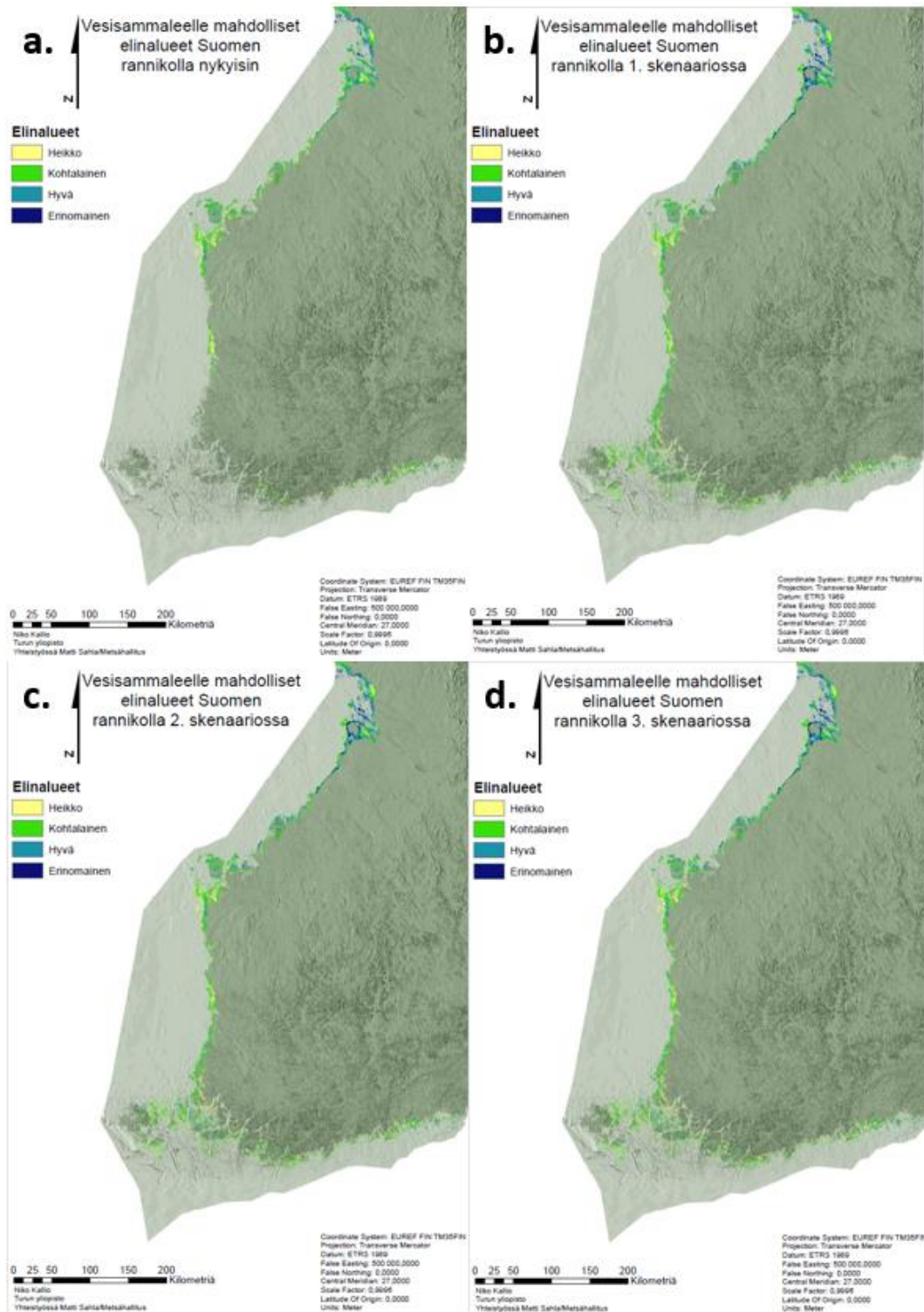
Luokitusten parhaimmat elinalueet, hyvä ja erinomainen, vähenevät suhteellisesti muihin luokituksiin verrattuna suolapitoisuuden alentuessa. Vasta viimeisessä skenaariossa niiden osuus lähtee kasvuun heikon ja kohtalaisen luokituksen kustannuksella. Selitystä tämän kaltaisille muutoksille elinalueissa voidaan hakea elinalueiden muutoksia kuvaavista kartoista, joissa voidaan tarkastella tarkemmin Perämeren ja Suomenlahden rannikoilla sekä Saaristomerellä tapahtuvia muutoksia. Varsinkin Pohjanlahdella vesisien elinalueet lähtevät levittäytymään kapeina kaistaleina rannikkoa pitkin suolapitoisuuden alentuessa 1,25 ‰. Samaan aikaan levittäytyminen Suomenlahdella on huomattavasti runsaampaa. Varsinkin Pohjanlahden alhaisempi pH rajoittaa vesisien leviämistä alueella. Suomenlahdella pH on otollisempi eikä se rajoita lajin leviämistä samalla tavalla kuin Pohjanlahdella. Suolapitoisuuden alentuessa uudet elinalueet ovat ensimmäisessä ja toisessa skenaariossa vielä heikkoja tai kohtalaisia. Kun suolapitoisuuden aleneminen lisääntyy seuraavissa skenaarioissa, parantaa se samalla uusien elinalueiden luokitusta vesisien elinalueena. Vaikka murtovesisieni kykeneekin leviämään Saaristomerelle asti jo ensimmäisessä skenaariossa, ei suolapitoisuus ole sille vielä kovinkaan otollinen. Vasta suolapitoisuuden alentuessa tarpeeksi kolmannessa skenaariossa alkavat elinalueiden parhaimpien luokitusten suhteelliset osuudet kasvaa.



Kuva 18. Vesisien elinalueiden pinta-alojen (km²) muutokset suolapitoisuuden alentuessa nykytilanteen ja kolmen eri skenaarion kesken. Diagrammissa esitetään pinta-alojen muutokset neljässä eri tilanteessa: nykytilanne, 1. skenaario, 2. skenaario ja 3. skenaario. Diagrammi esittää myös neljä eri luokitusta sinisimpukan elinalueista niiden kelpoisuuden mukaisesti, jotka on luokiteltu ympäristömuuttujien avulla: heikko, kohtalainen, hyvä ja erinomainen. Diagrammin taulukossa esitetään myös tarkat pinta-alat kutakin luokitusta kohtaan jokaisesta skenaariosta. Kuvan taulukossa esitetään myös lihavoiduilla arvoilla kunkin luokituksen suhteellinen osuus kyseisen skenaarion elinalueesta.

4.4 Vesisammal levittäytyy koko Suomen rannikolle

Myös vesisammaleen elinalueiden muutos on täysin erilainen sinisimpukkaan ja meriruohon verrattuna. Elinalueiden muutoksissa on kuitenkin selkeä ero myös vesisieneen. Tarkastellessa vesisammaleen elinalueisiin kohdistuvia muutoksia kuvaavaa karttaa (Kuva 19), voidaan havaita, miten runsaasti vesisammaleen elinalueet leviävät jo ensimmäisessä skenaariossa, jossa suolapitoisuuden muutos on vain 1,25 %. Vesisammaleelle mahdolliset elinalueet lisääntyvät lähes 50 %:lla ja alueet levittäytyvät Saaristomeren ulkosaaristoon asti. Elinalueet kattavat jo siis ensimmäisen skenaarion myötä käytännössä koko tutkimusalueen, eli Suomen rannikkoalueet. Elinalueet kasvavat nykyisestä 4 374 km²:stä 6 489 km²:iin. Elinalueet ovat kuitenkin suhteellisen rikkonaisia ja pysyttelevät lähellä rannikkoa. Syynä tälle on vesisammaleen suosimat matalat vesistöt. Tutkimuksessa vesisammaleelle otollisimmiksi elinympäristöiksi on merkitty alueet, joiden syvyys on 1 – 4 metrin välillä.



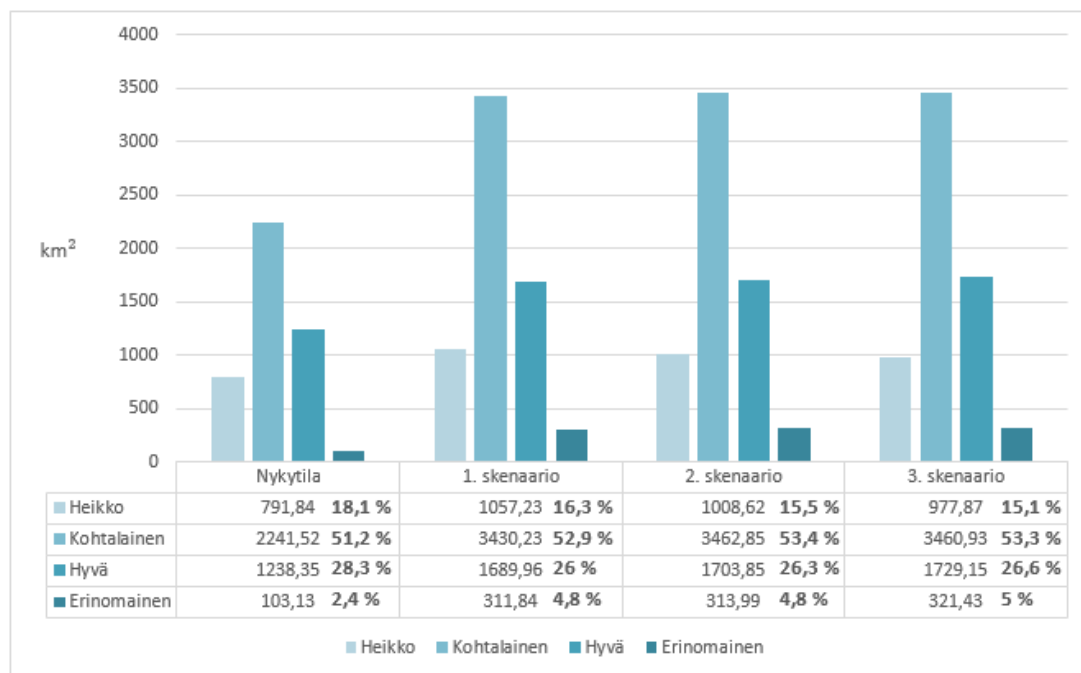
Kuva 19. Vesisammaleen mahdollisten elinalueiden muutokset Suomen rannikolla nykytilanteen ja kolmen skenaarion välillä. Kuva a: Vesisammaleelle mahdolliset elinalueet nykyisin. Kuva b: Vesisammaleelle mahdolliset elinalueet 1. skenaarion mukaan. Kuva c: Vesisammaleelle mahdolliset elinalueet 2. skenaarion mukaan. Kuva d: Vesisammaleelle mahdolliset elinalueet 3. skenaarion mukaan. Kartat suurennettuina teoksen liitteissä sivuilla 91-94.

Kartasta voidaan kuitenkin myös havaita, että skenaarioiden 1, 2 ja 3 välillä ei ole keskenään kovinkaan suuria eroja elinalueiden koossa. Tutkimuksen tuloksista havaittiin, että vesisammaleen elinalueet eivät tosiaan kasva enää 1,25 ‰:n suolapitoisuuden alenemisen jälkeen. Seuraavissa skenaarioissa, joissa suolapitoisuus alenee 1,5 – 1,75 ‰, ei tapahdu käytännössä muutoksia elinalueiden kokonaispinta-alassa. Muutokset koko pinta-alan suhteen jäävät alle 0,1 km²:n suuruiseksi kumpaakin skenaariota kohden, mutta muutos on kuitenkin positiivinen. Tämä havainto todistaa sen, että suolapitoisuus ei rajoita vesisammaleen elinalueita 1,25 ‰:n muutoksen jälkeen. Sillä on toki vielä vaikutusta elinympäristön laatuun, mutta ei alueellisia rajoituksia.

Elinalueissa tapahtuvat muutokset keskittyvät toisessa ja kolmannessa skenaariossa pääasiassa elinalueiden laadun muutoksiin. Näitä muutoksia voidaan tarkastella vesisammaleen elinalueiden laatua kuvaavasta diagrammista ja taulukosta (Kuva 20). Kuvasta voidaan havaita, minkälaisia muutoksia elinalueiden laadussa tulisi suolapitoisuuden vähentyessä tapahtumaan. Diagrammista ja taulukosta havaitaan myös laaja elinalueen lisääntyminen ensimmäisessä skenaariossa nykytilanteeseen verrattuna ja kuinka elinalueiden muutos tasaantuu seuraavissa skenaarioissa. Vesisammaleen nykyisillä elinalueilla tutkimusalueen pohjois- ja itäosissa ei juurikaan tapahdu muutoksia elinalueiden laadussa ensimmäisen skenaarion jälkeen. Elinalueet kehittyvät suolapitoisuuden alentuessa 1,25 ‰ parhaimpaan mahdolliseen tilaansa kyseisiä ympäristömuuttujia tarkastellessa. Saaristomeren uusilla elinalueilla muutokset ovat hieman pidempikestoisia.

1. skenaariossa voidaan havaita, että heikkojen elinalueiden absoluuttinen ja suhteellinen määrä koko elinalueesta alkaa vähentyä elinolosuhteiden parantuessa vesisammaleelle. Tämä muutos jatkuu kaikkien skenaarioiden läpi ja heikot elinalueet vähenevät koko mahdollisen muutoksen ajan. Samalla voidaan myös havaita, että erinomaisten elinalueiden koko kaksinkertaistuu suhteellisesti ja jopa kolminkertaistuu absoluuttisesti ensimmäisessä skenaariossa. Suuri osa tästä erinomaisen elinalueen lisääntymisestä tapahtuu Pohjanlahdella Hailuodon ympäristössä. Myös rannikkoalueet etelämpänä muuttuvat vesisammaleen kannalta erinomaisiksi elinalueiksi. Suomenlahdella muutokset ovat puolestaan huomattavasti vähäisempiä, sillä suolapitoisuuden ohella muut ympäristömuuttujat rajoittavat elinalueiden leviämistä. 1. skenaarion suurimpana muutoksena on kuitenkin kohtalaisen elinalueen muutos, mikä kasvaa noin 1 200 km²:llä. Saaristomerellä vallitseva suolapitoisuus ja muut ympäristömuuttujat eivät ole vesisammaleelle vielä otollisimmat, ja siksi suuri osa uusista elinalueista jää kohtalaiselle tasolle. 2. skenaariossa kohtalaiset elinalueet kasvavat vielä hiukan heikkojen elinalueiden pienentyessä, mutta kolmannessa skenaariossa myös kohtalaiset elinalueet lähtevät pieneen laskuun. Hyvien elinalueiden määrä kasvaa

myös luonnollisesti eniten ensimmäisessä skenaariossa, jonka jälkeen se jatkaa kasvuaan suhteellisen tasaisesti seuraavissa skenaarioissa.



Kuva 20. Vesisammaleen elinalueiden pinta-alojen (km²) muutokset suolapitoisuuden alentuessa nykytilanteen ja kolmen eri skenaarion kesken. Diagrammissa esitetään pinta-alojen muutokset neljässä eri tilanteessa: nykytilanne, 1. skenaario, 2. skenaario ja 3. skenaario. Diagrammi esittää myös neljä eri luokitusta sinisimpukan elinalueista niiden kelpoisuuden mukaisesti, jotka on luokiteltu ympäristömuuttujien avulla: heikko, kohtalainen, hyvä ja erinomainen. Diagrammin taulukossa esitetään myös tarkat pinta-alat kutakin luokitusta kohtaan jokaisesta skenaariosta. Kuvan taulukossa esitetään myös lihavoiduilla arvoilla kunkin luokituksen suhteellinen osuus kyseisen skenaarion elinalueesta.

5 Keskustelu

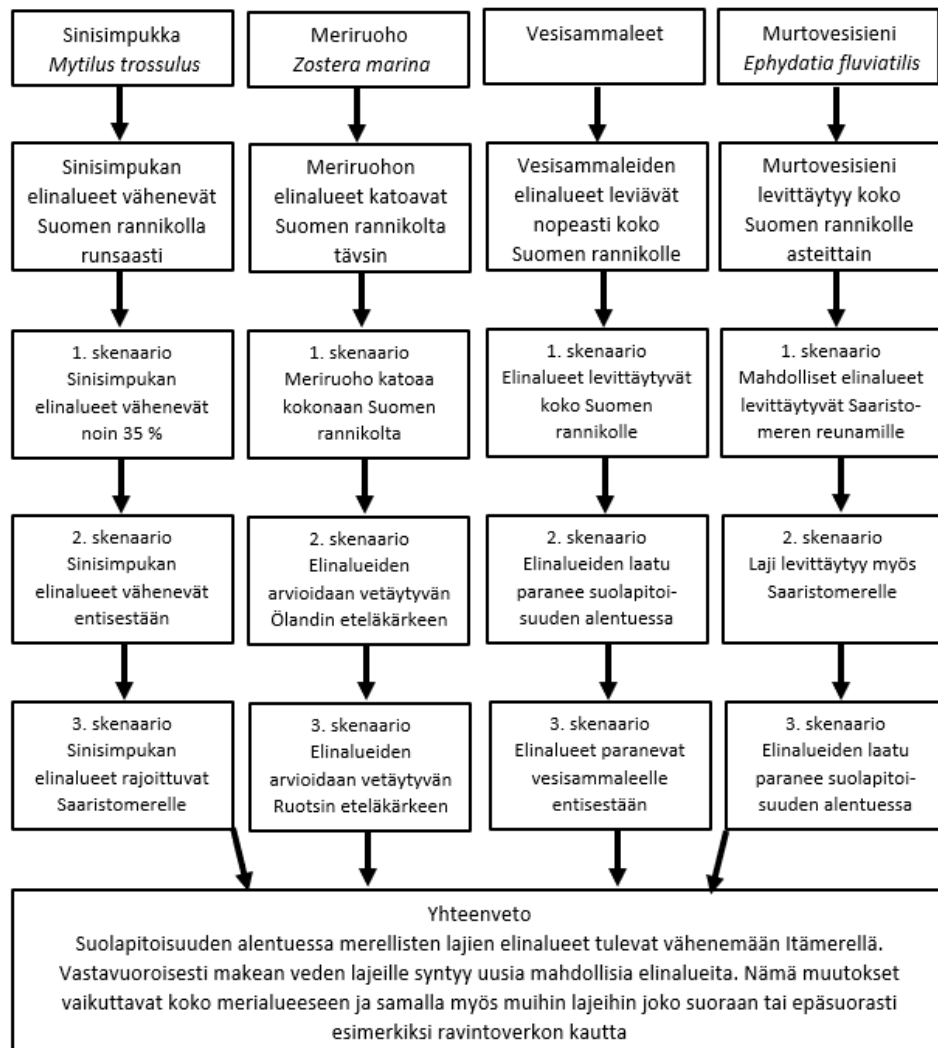
5.1 Tulosten merkitys

Tutkimuksen tulokset osoittivat, että lajien elinalueet muuttuvat Suomen rannikolla, mikäli BACC:n arviot ilmastonmuutoksesta johtuvasta suolapitoisuuden alenemisestä käyvät toteen (Kuva 21). Tulosten mukaan merellisten lajien elinalueet vähenevät huomattavasti Suomen rannikolla, kun taas makeassa vedessä viihtyvät lajit pääsevät levittäytymään uusille elinalueille. Merellisistä lajeista sinisimpukan elinalueet rajoittuvat suurimman suolapitoisuuden alenemisen myötä ainoastaan Saaristomeren ympäristöön, ja myös meriruoho menettää runsaasti elinalueitaan. Meriruoho katoaa tutkimusalueeltaan täysin jo ensimmäisessä skenaariossa, ja sen elinalueet vetäytyvät Itämerellä huomattavasti etelämmäksi suolapitoisuuden alenemisen myötä. Makean veden lajistolle tilanne on puolestaan päinvastainen. Kummallekin tutkimuksessa tarkasteltavalle makean veden lajille, murtovesisienelle ja vesisammaleelle, on mahdollista levitä jo ensimmäinen skenaarion myötä

Saaristomerelle asti. Tämän jälkeen lajien elinalueiden kokonaispinta-ala ei enää juurikaan muutu suolapitoisuuden alenemisen voimistuessa, mutta elinalueiden luokitusten välillä tapahtuu muutoksia. Suotuisimmat elinalueet kasvavat huonompien kustannuksella.

Suolapitoisuuden lasku ja lajiston muutokset eivät rajoitu pelkästään Suomen rannikkoalueelle, vaan voidaan olettaa, että Suomen rannikolla havaitut muutokset pätevät myös muualla Itämerellä. Ilmastonmuutoksesta mahdollisesti aiheutuvalla suolapitoisuuden alenemisella onkin merkittäviä vaikutuksia koko Itämeren lajiston elinalueisiin. Monilla lajeilla, kuten sinisimpukalla ja meriruoholla, on vaikutuksia myös monen muun lajin selviytymiseen ja elinkiertoön ympäristössä, ja nämä lajit ovat avainlajeja Itämerellä. Avainlajeihin kohdistuvat muutokset saattavat olla erittäin merkittäviä koko Itämeren ekosysteemiä ajatellen. Lajeihin kohdistuvien vaikutusten lisäksi suolapitoisuuden muutokset vaikuttavat koko Itämeren hydrologiaan ja erityisesti vesimassan kerroksellisuuteen. Vesimassan hydrologisilla muutoksilla saattaa myös olla vaikutuksia Itämeren lajiston elinalueisiin. Näin suurien muutosten ohella olisi myös varmasti syytä pohtia merialueiden suunnittelua. Mikäli lajien elinalueet muuttuvat tutkimuksessa havaituissa mittasuhteissa, tulisi esimerkiksi luonnonsuojelualueiden sijoittelua ja rannikkoalueille rakentamista arvioida uudelleen pitäen mahdolliset muutokset mielessä.

Tuloksista on syytä muistaa, että tutkimuksessa ei ole tarkasteltu kaikkia elinalueisiin vaikuttavia tekijöitä, kuten esimerkiksi pohjanlaatua, ravinteiden määrää tai ihmisen vaikutusta ympäristöön. Tulokset ovat arvioita mahdollisista muutoksista seuraavalle 50 vuodelle. Siitä huolimatta ne antavat kuitenkin selvän kuvan Itämeren lajistollisista ja hydrologisista muutoksista sekä Itämeren tulevaisuudesta, mikäli suolapitoisuus laskee näiden arvioiden mukaan.



Kuva 21. Vuokaavio tutkimuksen tuloksista

5.2 Lajiston muutokset

Tutkimuksessa tuotettujen karttojen avulla saatiin selkeä käsitys jokaisen lajin alueellisista muutoksista seuraavan 50 vuoden aikana suolapitoisuuden alenemisen myötä. Karttojen ja saatavilla olevien ympäristömuuttuja-aineistojen avulla on myös mahdollista tarkastella syitä lajien elinalueiden jakautumisen takana, esimerkiksi minkä vuoksi jokin tarkasteltava laji levittäytyy tai ei levittäydy tietylle alueelle. Vaikka tutkimuksessa tarkasteltava alue käsittää vain Suomen rannikon, on syytä muistaa, että suolapitoisuuden muutokset koskevat koko Itämeren. Tutkimuksesta saatujen tulosten perusteella voidaan siis pohtia myös koko Itämerellä tapahtuvia muutoksia. Tutkimuksessa tarkasteltavat lajit eivät myöskään ole ainoita, joihin suolapitoisuuden muutokset vaikuttavat. Itämerellä elää monia lajeja, joiden elinalueita suolapitoisuus rajoittaa ja joihin sen muutokset vaikuttavat joko suoraan tai esimerkiksi ravintoverkon kautta. Esimerkiksi sinisimpukka ja meriruoho ovat

erittäin tärkeitä avainlajeja Itämerellä, joiden katoamisella voi olla suuriakin vaikutuksia alueella esiintyville muille lajeille.

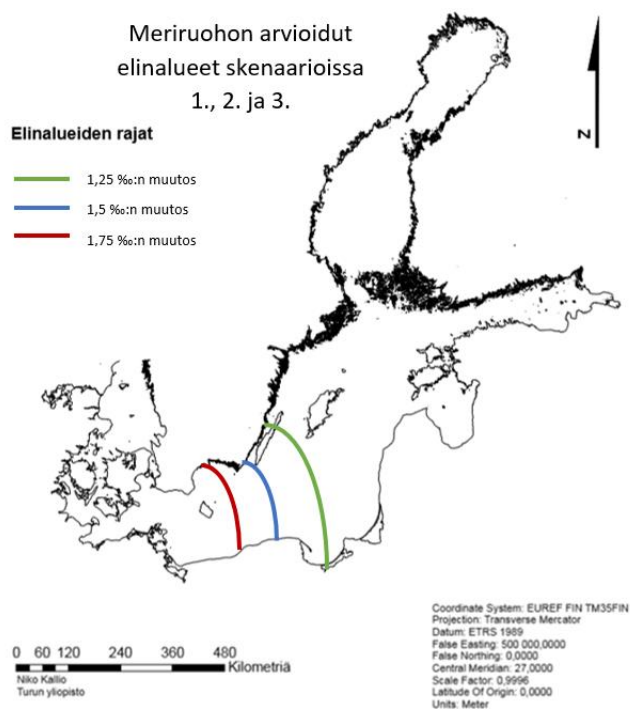
Kuten tutkielman teoreettisessa viitekehyksessä mainittiin, sinisimpukka on erittäin tärkeä laji koko Itämeren ekosysteemille. Joillekin lajeille sinisimpukka on merkittävä osa ravinnonlähdeä, ja toisille lajeille se luo elinkelpoisemman ympäristön. Kostamo ym. (2017) toteaa, että sinisimpukka tarjoaa yli 40 muulle lajille suotuisan elinympäristön toiminnallaan, kuten suodattamalla elinympäristön vesimassaa tai tarjoamalla kasvualustan kuorillaan tai suojapaikan tyhjissä simpukankuorissa. Sinisimpukat ovat myös erittäin tärkeä osa ravintoverkkoa. Monet vesilinnut, kuten haahkat ja allit hyödyntävät sinisimpukoiden esiintymiä ravinnokseen ja myös kampelat ja särkikalat saavat näistä esiintymistä oman ravintonsa. Laajat sinisimpukkayhteisöt pitävät yllä erittäin lajirunsaita ja biodiversiteetiltään elinvoimaisia alueita (Kostamo ym. 2017).

Mikäli Itämeren suolapitoisuus laskee ilmastonmuutoksen myötä, katoaa sinisimpukoilta erittäin laajoja elinalueita koko Itämerellä. Tämä puolestaan asettaa Itämeren biodiversiteetin muutostilanteeseen, sillä muutos vaikuttaa myös moniin lajeihin, jotka ovat hyödyntäneet sinisimpukkaa ravintonaan tai elinympäristönsä ylläpitäjänä. Toki lajit ovat tehokkaita sopeutumaan uusiin tilanteisiin, eivätkä nämä lajit välttämättä menetä yhtä lailla elinalueitaan kuten sinisimpukka. Muutos on kuitenkin nopea 50 vuoden aikavälillä, ja se vaikuttaa mitä luultavimmin kyseisten lajien kantaan ja elinkiertoa merkittävästi.

Muiden lajien lisäksi sinisimpukalla on myös vaikutus koko Itämeren ja erityisesti rannikkoalueiden veden laatuun. Kuten sinisimpukan omassa luvussa teoreettisessa viitekehyksessä todettiin, on sinisimpukoiden kanta Itämerellä kykenevä teoreettisesti suodattamaan koko Itämeren vesimassan kerran vuodessa (Kostamo ym. 2017). Sinisimpukkaa on myös hyödynnetty rannikkoalueiden vedenlaadun parantamiseen erityisesti Ruotsissa ja Tanskassa, joten suolapitoisuuden muutoksilla voi olla vaikutusta myös vedenlaadun heikentymiseen rannikkoalueilla. Suomen, Ruotsin ja Viron rannikoilla sinisimpukan elinalueet vähenevät tutkimuksen tulosten perusteella. Näillä alueilla vesistöt saattavat samentua, kun sinisimpukan vettä suodattava vaikutus katoaa. Tämän puolestaan vaikuttaa erityisesti vesikasvien selviytymiseen kyseisillä alueilla, sillä auringonvalo ei pääse tunkeutumaan samean veden läpi merenpohjaan, missä kasvit tarvitsisivat sitä yhteyttämiseen. Myös sinisimpukoiden hyödyntäminen Ruotsin rannikolla vedenlaadun parantamiseen vähentyy, sillä simpukat eivät enää selviydy kyseisillä alueilla suolapitoisuuden vähäisyyden vuoksi. Toki Ruotsin eteläisillä rannikoilla toiminta on vielä tulosten perusteella mahdollinen, sillä suolapitoisuuden aleneminen ei vielä vaikuta näiden rannikoiden sinisimpukkakantojen elinalueisiin yhtä merkittävästi. Elinalueen laatu sinisimpukalle saattaa kuitenkin heikentyä.

Sinisimpukan ohella myös meriruoho on monille muille lajeille tärkeä osa elinympäristöä ja toimii Itämerellä avainlajina. Kuten sinisimpukan, myös meriruohon elinalueet vähenevät tutkimuksen tulosten perusteella Itämerellä runsaasti. Tämän seurauksena myös meriruohoa hyödyntävät lajit joutuisivat joko sopeutumaan uusiin olosuhteisiin tai siirtymään sen perässä kokonaan uusille elinalueille. Itämerellä meriruoho tarjoaa elinympäristöjä siiroille, ahvenille, kampeloille, ankeriaille ja muille pieneliöille (Baden ym. 2003). Itämeren ulkopuolella meriruohoa hyödyntävien lajien määrä moninkertaistuu. Biotooppina meriruoho tarjoaa korkean tuottavuutensa lisäksi laadukkaan biodiversiteetin, joka on huomattavasti voimakkaampi verrattuna samoilla syvyyksillä esiintyviin paljaisiin pohjiin.

Tutkimuksessa meriruoho katosi tutkimusalueelta jo ensimmäisessä skenaariossa, jossa suolapitoisuus laski vain 1,25 ‰. Tämän tutkimuksen avulla ei kuitenkaan saada tarkempaa tietoa meriruohon elinalueiden muutoksista koko Itämeren ajatellen, sillä poistuessaan tutkimusalueelta, ei tilannetta pystytä vertaamaan Itämerellä kuten sinisimpukan tilanteessa. Koska meriruohon elinalueet katoavat tutkimusalueelta kokonaan ensimmäisessä skenaariossa, koettiin tutkimuksen kannalta tärkeäksi esittää arvioita, kuinka



Kuva 22. Meriruohon arvioidut elinalueet Itämerellä Suolapitoisuuden vähentyessä.

eteläksi elinalueet saattaisivat vetäytyä (Kuva 22). Kartassa esitetyt arviot perustuvat Leppärannan ja Myrbergin (2009: 80) esittämään karttaan Itämeren suolapitoisuuksien jakaumasta pintakerroksissa sekä BACC:n julkaisemiin arviointeihin Itämeren altailta tapahtuvista suolapitoisuuden alenemisistä (Meier 2015). Vaikka meriruoho kasvaakin pohjassa, voidaan pintakerrosten suolapitoisuutta pitää luotettavampana arviona elinalueiden muutoksissa. Tutkimusalueella meriruohon elinalueet rajoittuivat enimmillään noin 6 metriin, ja erinomaiset elinalueet sijoittuivat noin 2 – 4 metrin välille. Meriruoholle otolliset syvyudet saattavat toki poiketa muualla Itämerellä riippuen esimerkiksi veden kirkkaudesta ja otollisten kasvualustojen sijainneista. Leppärannan ja Myrbergin (2009: 80) teoksessa julkaistua karttaa voidaan siis hyödyntää arvioidessa, kuinka

etäälle meriruohon elinalueet saattaisivat suolapitoisuuden alentuessa vetäytyä. Arvion mukaan 1,25 ‰ muutoksella meriruohon nykyiset elinalueet Saaristomereltä saattaisivat vetäytyä jopa Gotlannin saaren eteläpuolelle. Syyinä näin suurelle harppaukselle elinalueiden muutoksissa on Gotlannin altaan suolapitoisuus ja erityisesti sen hidas vaihtuminen Suomen rannikon alhaisista suolapitoisuuksista lähes Tanskan salmille asti, missä vallitsevat huomattavasti suuremmat suolapitoisuudet. Seuraavissa skenaarioissa suolapitoisuus laskee vielä 0,25 ‰ lisää kummassakin tilanteessa, jolloin elinalueet perääntyvät vielä kauemmaksi kohti Tanskan salmia. Näin laajoilla elinalueiden katoamisilla voi olla merkittäviä vaikutuksia Itämeren ekosysteemissä. On kuitenkin pidettävä mielessä, että tutkimuksessa esitetyt muutokset meriruohon elinalueissa koko Itämeren osalta ovat puhtaasti arvioita mahdollisesta muutoksesta. Tätä muutosta arvioidessa ei ole hyödynnetty ympäristömuuttujien aineistoja eikä lajihavaintoja esitetyiltä alueilta.

Tämä arvio paljastaa myös sen, että lajit, joilla suolapitoisuuden vaatimukset ovat meriruohon ohella samankaltaisia, kokevat mitä luultavimmin vastaavanlaisen elinalueen muutoksen suolapitoisuuden laskiessa. BACC:n suolapitoisuuden muutoksia kuvaavan arviointien mukaan Gotlannin ja Bornholmin altaalla suolapitoisuuden muutokset saattavat olla jopa vielä voimakkaampia kuin Suomen rannikolla (Smith ym. s.a.). Heidän julkaisemissaan diagrammeissa suolapitoisuuden aleneminen Itämeren pääaltaalla ja lähempänä Tanskan salmia saattaisi olla lähempänä 2 ‰ laskua. Tämä siirtäisi meriruohon alueita esitettyjä arvioita kauemmaksi kohti Pohjanmerta ja mahdollisesti jopa kokonaan Tanskan salmien ulkopuolelle.

Ilmastonmuutoksen lisäksi meriruohon, kuten myös monen muunkin lajin, elinalueet ovat uhattuina ihmisen toiminnan takia. Waycott ym. (2008) tutki meriruohon elinalueiden heikentymisiä globaalisti. Tutkimuksessa selvitettiin Euroopan, Australian ja Pohjois-Amerikan meriruohoekosysteemien tilaa ja muutosta vuosien 1879-2006 välisten havaintojen perusteella 215 eri havaintopisteeltä. 58 %:lla havaintopisteistä havaittiin meriruohon vähentymistä, 17 %:lla puolestaan meriruohon määrä pysyi lähes muuttumattomana ja 25 %:lla meriruohon määrä lisääntyi. 77 havaintopisteellä pystyttiin tunnistamaan lajin vähenemisen syy: 21 paikalla syyksi havaittiin rannikkoalueiden rakentaminen ja 35 paikalla vedenlaadun heikentyminen. Ainoastaan kuudella havaintopisteellä syyksi voitiin tunnistaa luonnon aiheuttamat muutokset. Samankaltaisia havaintoja on myös tehty Ruotsin ja Tanskan rannikolla, Skagerrakin alueella, tehdystä tutkimuksesta, jossa meriruohon havaittiin kadonneen suurilta alueilta viimeisen kahden vuosikymmenen aikana (Baden ym. 2003). Tutkimuksessa havaittiin, että lisääntynyt ravinteiden määrä lisäsi alueella elävien levien määrää, jotka samensivat vettä ja syrjäyttivät meriruohon sen elinalueilta. Näillä leväkasvustoilla havaittiin olevan vaikutusta pohjan vesimassan hapettomuuteen sekä lisääntyneeseen rikkivedyn määrään

sedimenteissä. Tämä myös selittää osaltaan, miksi meriruoho on kadonnut kyseisiltä alueilta. Meriruoholla on siis havaittu jo entuudestaan elinalueiden vähentymistä Itämerellä sekä muualla maailmassa. Suolapitoisuuden vähentyessä elinalueet kuitenkin vähenevät ja heikentyvät entisestään.

Näin valtavilla muutoksilla elinalueissa on merkittäviä vaikutuksia Itämeren ympäristöön. Kuten aiemmin mainittiin, on meriruoho myös tärkeä osa Itämeren ekosysteemiä ja toimii avainlajina sen ympäristössä. Kiviluoto ym. (2017) mainitsee, että meriruohon elinalueet saattavat olla lajirunsaudeltaan Itämeren suurimpia. Laji tarjoaa otollisen elinympäristön pienille kaloille ja muille pieneläimille suojaisissa niityissään ja samalla myös hyvän elinympäristön monille kotiloille ja katkoille. Sitoessaan maa-aineista meriruoho myös tarjoaa monille pohjaeläimille hyvän elinympäristön, ja myös monet muut vesikasvit viihtyvät meriruohon läheisyydessä. Mikäli meriruoho toimii avainlajina näin monelle lajille, saattaisi sen katoaminen laajoilta merialueilta Itämerellä suuri menetys lajirunsauden kannalta. Toki osa meriruohon rinnalla elävistä lajeista kykenisi mahdollisesti sopeutumaan elämään ilman meriruohoa, mutta osa näistä lajikannoista saattaa joutua siirtymään meriruohon perässä. Lajien kanta entisillä meriruohon elinalueilla tuskin säilyy entisen kaltaisena.

Vaikka meriruoho ja sinisimpukka katoaisivatkin kokonaan suurilta alueilta Itämerellä, ei se kuitenkaan tarkoita, että merenpohjat jäisivät tyhjiksi ja hylätyiksi elinympäristöiksi. Luonnossa tyhjiöt eivät säily pitkään, sillä vapautuneille elinalueille siirtyy nopeasti uusia lajeja. Elinalueiden vapautuminen ja suolapitoisuuden aleneminen antavat makeassa vedessä eläville lajeille mahdollisuuden levittäytyä tehokkaasti uusille elinalueille ja mahdollisesti jopa korvata esimerkiksi sinisimpukan tai meriruohon roolin ekosysteemissä. Suolapitoisuuden alentuessa esimerkiksi järvisimpukka saattaa levitä nykyisiltä elinalueiltaan jokisuistoilta ja vähäsuolaisista lahdista kauemmaksi merelle ja tarjota sinisimpukan rinnalla eläville lajeille vastaavanlaisen elinympäristön. Järvisimpukka myös mitä luultavimmin toimisi uutena ravinnonlähteenä haahkoille, alleille ja pohjakaloille. Myös meriruohon elinalueet tulisivat varmasti nopeasti hyötykäyttöön. Meriekosysteemeillä saattaisi olla toivoa, vaikka meriruoho katoaisikin Itämerellä (Kiviluoto ym. 2017). Kiviluoto ym. (2017) mukaan meriruohon kasvupaikoilla elää jo nykyisin monivuotisia vesikasveja. Meriruohon kadottua elinalueet vapautuvat ja nämä kasvit hyödyntävät varmasti tilanteen. On mahdollista, että nämä kyseiset kasvit voisivat paikata meriruohon paikan ekosysteemissä, ainakin osittain.

Elinalueiden vapautuessa ja suolapitoisuuden alentuessa Itämerellä tapahtuu selkeitä muutoksia lajikannoissa. Tutkimuksessa tarkasteltiin myös uusille alueille mahdollisesti levittäytyviä makean veden lajeja ja havaittiin, että näiden lajien levittäytyminen uusille elinalueille saattaisi olla erittäinkin nopeaa ja tehokasta.

Vesisien ja vesisammaleen elinalueet näyttäisivät tutkimuksen tulosten perusteella levittäytyvän erittäin tehokkaasti uusille elinalueille. Vain 1,25 %:n suolapitoisuuden vähenemisen myötä molemmat lajit kykenisivät mahdollisesti levittäytymään Saaristomerelle asti. Levittäytymistä nopeuttaisi myös elinalueiden vapautuminen merellisten lajien käytöstä, sillä esimerkiksi meriruoho katoaa Suomen rannikolta saman suolapitoisuuden vähenemisen myötä. Vesisien ja vesisammaleen ohella uusille elinalueille voisivat mahdollisesti levittäytyä myös monet muut makeassa vedessä viihtyvät lajit, jotka kestävät alhaisia suolapitoisuuksia.

Uusien lajien mukana alueille saattaa myös levitä lajeja, jotka elävät esimerkiksi vesisammaleen tai murtovesisien yhteydessä. Kuten monet muutkin vesikasvit, ovat myös vesisammaleet tärkeitä ravinnonlähteitä ja suojapaikkoja selkärangattomille eläimillä ja pienille kaloille (Kostamo ym. 2018). Vesisammaleiden yhteyksistä muihin Itämeren lajeihin ei kuitenkaan tiedetä vielä kovin tarkasti, sillä laji on suhteellisen uusi tulokas murtovesialtaissa. Sen leviäminen Saaristomerelle asti saattaa kuitenkin osittain korvata alueelta katoavien merikasvien vaikutusta. Myös muiden makean veden vesikasvien levittäytyminen uusille elinalueille on täysin mahdollista, mikä saattaisi edesauttaa kadonneiden merikasvien korvaamista. Uusien makean veden kasvien leviäminen Suomen rannikolla ja muualla Itämerellä saattaa kuitenkin aiheuttaa myös kilpailua elintiloista, mikä mahdollisesti syrjäyttää joitakin lajeja vanhoilta elinalueiltaan.

Kuten vesisammal, myös murtovesisieni on suhteellisen uusi tulokas Itämeren ympäristössä, ja sen elintila suolapitoisuuden alentuessa lisääntyy huomattavasti. Nykyisin murtovesisieni joutuu kilpailemaan sinisimpukoiden kanssa elintilasta, sillä molemmat lajit suosivat kovapintaista pohjaa, mutta sinisimpukoiden vähentyessä murtovesisienelle avautuu uusia elinalueita (Holopainen ym. 2018: 259). Vesisien elinkierrosta Itämerellä ja sen vaikutuksista alueen ekosysteemiin ei ole vielä paljoa tutkimustietoa, sillä laji esiintyy pääasiassa sisävesistöissä. Suolapitoisuuden alentuessa sen levittäytyminen suuremmille alueille on kuitenkin mahdollista, millä saattaa olla vaikutuksia alueella entuudestaan eläville lajeille. Vesisien leviäminen saattaa myös mahdollistaa muiden lajien kulkeutumisen uusille alueille.

Makean veden lajien levittäytymisestä Itämerellä ja sen vaikutuksesta alueen ekosysteemiin ei ole vielä kovinkaan selvää käsitystä. Itämerellä mahdollisesti tapahtuva muutos on ainutlaatuinen tilaisuus tutkia makean veden lajien levittäytymistä entuudestaan mereiselle alueelle, jossa ne joutuvat kohtaamaan uusia lajeja ja sopeutumaan uusiin olosuhteisiin. Mielenkiintoiseksi tilanteen tekee myös kahden saman lajin eri populaatioiden kohtaaminen. Esimerkiksi vesisammaleen ja murtovesisien nykyiset elinalueet kattavat pääasiassa vain Suomenlahden ja Pohjanlahden alueita. Nämä populaatiot ovat olleet kauan erillään

toisistaan ja vaikka ne ovatkin samaa lajia, niiden ominaisuudet ovat saattaneet kehittyä hieman erilaisiksi. Suolapitoisuuden vähentyessä näiden kahden populaation välille saattaa avautua väylä Saaristomeren kautta. Näiden populaatioiden kohtaaminen saattaa voimistaa lajiin kohdistuvaa valintapainetta tai mahdollisesti jopa kasvattaa lajin populaatiotiheyden liian suureksi. Esimerkiksi Suomenlahdella elävä populaatio saattaa olla lajin sisäisessä kilpailussa tehokkaampi, ja populaatioiden kohdatessa saattaa Suomenlahden populaatio vähitellen syrjäyttää Pohjanlahdella elävää kantaa kilpailussa. Tämä antaa mielenkiintoisen kohteen jatkotutkimuksille tarkastella, minkälaisia muutoksia uusien lajien saapuminen ja vanhojen katoaminen aiheuttaa alueen ekosysteemille. Jatkotutkimuksissa voitaisiin pohtia, miten lajien väliset vuorovaikutussuhteet muuttuvat ja kuinka uudet makean veden lajit täyttävät merellisten lajien ekologisia lokeroita. Nämä aiheet vaativat vielä lisää jatkotutkimuksia, jotta Itämeren mahdollisesta tulevaisuudesta saataisiin entistä tarkempi käsitys.

Tuloksia tarkastellessa on syytä muistaa, että tutkimuksen tulokset voivat hieman poiketa todellisesta tilanteesta Itämerellä 50 vuoden kuluttua. Arviot suolapitoisuuden muutoksista perustuvat ilmastonmuutoksesta aiheutuvien muutosten arviointiin, mikä aiheuttaa jo tietynlaista epävarmuutta. Suurin osa tutkimuksista on kuitenkin sitä mieltä, että Itämeren suolapitoisuus laskee lisääntyneen sadannan ja valunnan seurauksena (Meier 2015). Ilmasto- ja hydrologisten mallien epätarkkuus aiheuttaa kuitenkin epätarkkuuksia myös suolapitoisuuden vähentymisen suuruuksissa. Myös tässä tutkimuksessa esitetyt suolapitoisuuden muutokset ovat mallinnuksia tulevasta, eivätkä välttämättä kuvaa koko totuutta. Merialueilla tapahtuva suolapitoisuuden vähentyminen tapahtuu tuskin yhtä tasaisesti, kuin mitä tutkimuksen tulokset antavat ymmärtää. Suojaisissa lahdissa ja jokisuistoilla suolapitoisuus saattaa laskea enemmän kuin mitä tulokset osoittavat. Toisaalta joillakin merialueilla suolapitoisuus saattaa säilyä pitkäänkin oletettua korkeampana. Vaikka tulokset eivät välttämättä kuvaa tarkasti todellista tilannetta 50 vuoden kuluttua, antavat ne silti selkeän kuvan muutoksista Itämerellä suolapitoisuuden laskiessa ilmastonmuutoksen myötä.

5.3 Hydrologiset muutokset

Lajikantoihin kohdistuvien muutosten lisäksi suolapitoisuuden aleneminen vaikuttaa myös Itämeren hydrologiaan ja sen kautta muuttaa Itämerellä tapahtuvien ajallisten muutosten vaikutuksia. Itämeren vesimassan kerroksellisuus on pitkälti suolapitoisuuden harppauskerroksesta, halokliinistä, johtuvaa. Suolapitoisuuden alentuessa tämä kerroksellisuus saattaa muuttua Itämeren ekosysteemin ohella. Tällä hydrologisella muutoksella saattaa myös olla merkittäviä vaikutuksia lajikantoihin. Mikäli Itämeren lajisto muuttuu tulevaisuudessa makean vesistöjen

ekosysteemien kaltaiseksi, saattaa tulevaisuudessa myös suolapulsseilla on merkittäviä vaikutuksia lajistoon.

Nykyisin Itämeren halokliini sijaitsee avomerellä noin 40 – 80 metrissä, riippuen alueen syvyydestä (Leppäranta & Myrberg 2009). Matalissa lahdissa halokliini sijaitsee lähempänä pintakerroksia. Suolapitoisuudessa tapahtuvat muutokset saattavat häiritä tätä Itämeren kerroksellisuutta tai jopa mahdollisesti poistaa sen kokonaan pohjoiselta Itämereltä. Tämän tutkimuksen skenaarioissa tarkasteltiin suolapitoisuuden muutoksia 1,25 ja 1,75 ‰ välillä. Nämä muutokset ovat kuitenkin arvioitu tapahtuvan vesimassan pintakerroksissa Suomen- ja Pohjanlahdella. Syvemmällä vesimassassa suolapitoisuuden arvioidaan laskevan jopa lähes 3 ‰ Suomenlahdella ja Gotlannin altaalla (Smith ym. s.a.). Pohjanlahdella suolapitoisuuden arvioidaan laskevan lähemmäksi 2,5 ‰ ja Perämerellä yli 2 ‰ syvemmässä vesimassassa. Kun näitä arvioita verrataan Leppärannan ja Myrbergin (2009) julkaisemaan karttaan Itämeren pohjakerrosten suolapitoisuuksista, voidaan havaita, että Perämerellä syvän veden suolapitoisuus saattaa laskea nykyisestä 4 – 3,5 ‰:sta jopa 2 – 1,5 ‰:een. Pohjanlahdella muutos olisi nykyisestä 6 ‰:sta enimmillään 3 ‰:een ja Suomenlahdella 8 – 7 ‰:sta 5 – 4 ‰:een. Näillä muutoksilla suolapitoisuus ei siis katoaisi täysin Itämeren syvänteistä, mutta kerroksellisuuden vaikutus saattaisi heikentyä. Matalammilla alueilla halokliinin aiheuttama kerroksellisuus saattaisi kadota jopa kokonaan. Kerroksellisuuden heikentyminen mahdollistaisi kuitenkin halokliinin ajoittaisen katoamisen sopivissa olosuhteissa (Leppäranta & Myrberg 2009). Voimakkaat tuulet saattavat lisätä vesimassan advektiota siinä määrin, että halokliinin vaikutus katoaa ja myös syvemmät vesimassat ajautuvat vedenkiertoon. Itämeren pohjakerroksia ajatellen kerroksellisuuden heikentymisestä voisi jopa olla hyötyä. Nykyinen vesimassan kerroksellisuus häiritsee vesimassan sekoittumista, mistä Itämeren hapettomat pohjat ovat osittain seurausta. Mikäli kerroksellisuus heikentyisi tai katoaisi kokonaan, voisivat vesimassat sekoittua tehokkaammin sitä myöten Itämeren pohjien kunto jopa parantua.

Halokliinin heikentymisellä tai katoamisella saattaisi myös olla vaikutuksia Itämeren lajikantaan. Mikäli halokliinin vaikutus heikentyy tai katoaa, sekoittuisivat pohja- ja pintakerrosten vesimassat keskenään herkemmin. Tästä seuraisi suolapitoisuuden muutoksia molemmissa kerroksissa pitoisuuksien tasaantuessa vesimassassa: pohjakerroksissa suolapitoisuus laskisi ja pintakerroksissa suolapitoisuus nousisi. Vaikka muutokset olisivat pieniä, voi niillä silti olla vaikutuksia lajien elinalueisiin pohja- ja pintakerroksissa. Kuten tässäkin tutkimuksessa havaittiin, suhteellisen pienillä suolapitoisuuden muutoksilla voi olla merkittäviä vaikutuksia elinalueisiin, kun tarkastellaan lajien elinalueiden ääriolosuhteita. Tämän perusteella voidaan siis päätellä, että halokliinin vaikutuksen mahdollinen heikentyminen saattaisi vaikuttaa

Itämeren vesimassan suolapitoisuuteen, millä saattaisi olla vaikutusta lajien elinalueisiin.

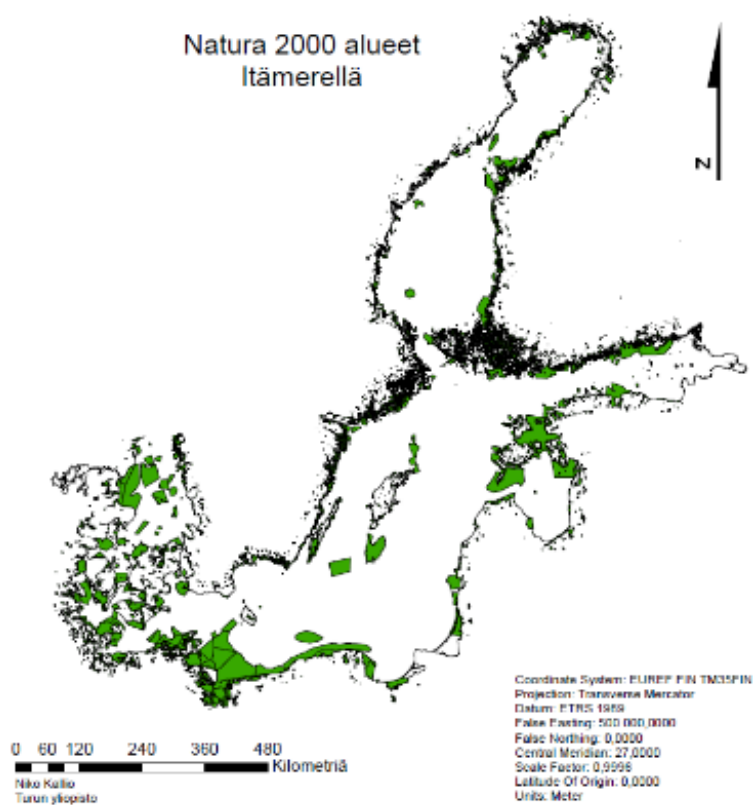
Alenevalla suolapitoisuudella voi olla myös mielenkiintoisia vaikutuksia suolapulssien yhteydessä. Itämerellä ajoittain ilmenevät suolapulssit kuljettavat Itämerelle suolapitoista vettä Pohjanmereltä sopivien olosuhteiden vallitessa. Suolapulsseja edeltävät yleensä voimakkaat läntiset tuulet, jotka työntävät Pohjanmeren suolapitoista vettä kohti Tanskan salmia ja työntävät samalla Itämeren vesimassoja kohti itää (Leppäranta & Myrberg 2009). Tämän seurauksena Pohjanmereltä työntyvän vesimassan virtaus on voimakkaampaa kuin Itämereltä ulos virtaavan vesimassan, jonka seurauksena syntyy suolapulssi. Suolapitoisuuden aleneminen Itämerellä perustuu kuitenkin sadannan ja sitä myöten jokien valunnan lisääntymiseen, minkä seurauksena myös Itämereltä ulos virtaavan veden määrä on suurempi kuin nykyisin. Tämä saattaa vähentää tulevaisuudessa esiintyvien suolapulssien määrää, sillä ilmiön tulisi olla voimakkaampi, jotta suolapulssi kykenisi kulkeutumaan Tanskan salmien läpi ulosvirtaavaa vettä vastaan. Tämä saattaisi aiheuttaa Itämeren syvimpien osien, kuten Gotlannin syvänteen, tilan heikentymisen, sillä suolapulssit ovat ainoita tekijöitä Itämerellä, jotka kykenevät vaihtamaan syvänteiden vesimassan.

Erityisen voimakkaita suolapulsseja on kuitenkin esiintynyt historian aikana, ja niillä on ollut merkittävä vaikutus Itämeren ekosysteemissä, olivat ne sitten hyödyllisiä vaikutuksia syvänteissä tai haitallisia vaikutuksia Itämeren pohjoisosissa. Nykyisin Tanskan salmien kautta kulkeutuu Itämereen normaalisti vettä pohjakerroksia myöten, jonka suolapitoisuus on 12 – 16 ‰ (Leppäranta & Myrberg 2009). Suolapulssien aikana tämän virtauksen suolapitoisuus voisi kuitenkin nousta jopa 22 – 25 ‰:een. Suolapulsseilla on siis merkittävä vaikutus Itämeren suolapitoisuuden ajallisiin muutoksiin. Vaikkakin suurin vaikutus keskittyy Itämeren pohjakerrokseen, on suolapulsseilla vaikutusta myös pintakerrosten suolapitoisuuteen nostaessaan vanhemman ja suolapitoisen vesimassan syvänteissä pintakerrokseen. Mikäli Itämeren suolapitoisuus laskee tulevaisuudessa, ovat nämä muutokset sen hetkisen normaalin tilanteen ja suolapulssien aikaisen tilanteen välillä suuremmat kuin nykyisin. Vaikka suolapulssien vaikutukset Itämerellä ovat vain ajallisia, eivätkä pysyviä, saattavat ne silti vaikuttaa merkittävästi lajikantaan, mikäli Itämeren lajisto on muuttunut makean vesistön kaltaiseksi. Suolapulssien nostama suolapitoisuus voi olla kyseisille lajeille liian suuri, ja se saattaa mahdollisesti aiheuttaa lajeille suurta osmoottista stressiä tai jopa yksilöiden menehtymisiä.

5.4 Merialueiden suunnittelu

Näin suurien muutosten ohella on syytä muistaa ihmisen vaikutus ympäristöön ja miten tämänkaltaisiin muutoksiin Itämerellä voitaisiin reagoida. Ihmisen vaikutus ilmastoon ja ilmastonmuutosta seuraavaan suolapitoisuuden alenemiseen Itämerellä on jo selvää, eikä tässä osiossa aiota keskittyä ilmastonmuutosta ehkäiseviin tekijöihin. Tässä osiossa pohditaan, minkälaisia muutoksia merialueiden suunnittelussa voitaisiin tehdä, jotta Itämeren merellistä ympäristöä voitaisiin ylläpitää mahdollisimman hyvin.

Kuten jo aikaisemmin todettiin, suolapitoisuuden alentuessa ja lajikantojen muuttuessa Itämeren merellisyyden käsite saattaa olla katoamassa, ja murtovesialtaasta on muuttumassa makean veden allas. Suolapitoisuuden alenemista on erittäin vaikea tai lähes mahdoton estää, mutta lajikantojen muuttumiseen on mahdollista reagoida. Luonnonsuojelualueiden lisäämisellä tai siirtämisellä voidaan vaikuttaa lajien ja ympäristön suojeluun alueilla, jotka saattaisivat tulevaisuudessa olla näiden merellisten lajien viimeisiä elinalueita Suomen rannikolla. Natura 2000 -alueet ovat tällä hetkellä merkittäviä luonnonsuojelualueita Suomen rannikoilla, ja erityisesti merialueiden lisäämisellä verkostoon on suuri tarve (Kuva 23). Natura 2000 -verkosto



Kuva 23. Itämeren Natura 2000 alueet.

on Euroopan unionin aloittama hanke, jonka tarkoituksena on pyrkiä pysäyttämään ympäristön biodiversiteetin katoamista. EU:n jäsenmaat voivat ehdottaa uusien alueiden liittämistä verkostoon, joiden valinta perustuu EU:n määäämiin kriteereihin. Hankkeen alkuvaiheissa suojelualueiden valintoja määräävät kriteerit eivät olleet selkeitä, mutta tutkimusten, seminaarien ja aiempien suojelualueiden hyödyntämisen kautta alueiden valintaan kohdistuvat kriteerit ovat tarkentuneet, ja Natura 2000 -verkosto on saatu lähes valmiiksi maa-alueilla (Evansin

(2012) katsauksen mukaan merialueiden hitaan lisäämisen vuoksi EU:n biodiversiteettistrategia ei tule kuitenkaan luultavasti saavuttamaan tavoitettaan vuoteen 2020 mennessä. Esillä on ollut myös paljon kritiikkiä alueiden valintaan perustuviin lajeihin ja habitaatteihin sekä kysymyksiä alueiden muutoksista.

Merialueiden Natura 2000 -alueet ovat merkittävästi esillä Suomen rannikolla, mutta kuten Evansin (2012) katsauksessa nousi esille, näitä alueita olisi syytä tarkastella myös niiden perustamisen jälkeen. Vaikka nämä Natura 2000 -verkostoon kohdistuvat kriittisyydet perustuvatkin pääasiassa joidenkin maiden suojelualueisiin, jotka ajavat samalla myös muita etuja kuin luonnonsuojelua, olisi myös luonnonsuojelualueiden tarpeellisuutta syytä tarkastella ympäristön muuttuessa. Tämän tutkimuksen tulosten perusteella Itämerellä tulee seuraavan 50 vuoden aikana mahdollisesti tapahtumaan suuria muutoksia, jotka muuttavat alueen biodiversiteettiä ja habitaatteja. Näiden mahdollisten muutosten perusteella olisi syytä miettiä esimerkiksi Natura 2000 -alueiden mahdollisia muutoksia ja lisäämisiä. Esimerkiksi Vaasan edustalla on suuria Natura 2000 -alueita, joilla nykyisin esiintyy Suomen rannikon pohjoisimmat sinisimpukkaesiintymät ja niiden mukana myös monia muita lajeja. Mikäli suolapitoisuus laskee odotetusti Itämerellä, katoavat kyseiset sinisimpukkayhdyskunnat Vaasan edustalta. Vielä on toki mahdotonta arvioida tarkasti, mitä alueen biodiversiteetille tapahtuu, sillä alueelle siirtyy mitä luultavimmin enemmän makean veden lajeja täyttämään merellisten lajien elinalueet. Tämän kaltaiset muutokset koko Itämerellä herättävät kuitenkin kysymyksiä suojelualueiden tarpeellisuudesta vanhoilla sijainneillaan.

Uusien suojelualueiden perustaminen saattaa puolestaan olla huomattavasti tarpeellisempaa muutosten myötä, esimerkiksi Saaristomerellä, josta näyttäisi tutkimuksen tulosten perusteella tulevan monen merellisen lajin viimeinen elinalue Suomen rannikolla. Saaristomerellä on toki jo nykyiseltään runsaasti luonnonsuojelualueita, mutta ne ovat nykyiseltään sijoittuneet Saaristomeren reunamille. Tulevaisuudessa näiden alueiden tarpeellisuus saattaa lisääntyä entisestään. Siksi olisikin hyvä pohtia jo nyt alueen rakenteellista suunnittelua ja uusien luonnonsuojelualueiden perustamista. Samat pohdinnat koskevat samalla myös muita Itämeren maita. Esimerkiksi meriruohon elinalueet saattavat tutkimuksen mukaan vetäytyä erittäin kauas etelään Bornholmin saaren edustalle, jolloin erityisesti Ruotsin, Puolan, Saksan ja Tanskan tulisi pohtia omien Natura 2000 -alueiden muutoksia ja lisäämisiä. Meriruohon elinalueet ovat myös UNESCO:n Rio-sopimuksessa vuonna 1992 julistettu habitaateiksi, joita on syytä suojella (Baden ym. 2003). Tämä myös rannikkoalueille suunnitelluissa rakennushankkeissa olisi syytä ottaa tulevaisuudessa mahdollisesti tapahtuvat muutokset huomioon.

Itämereen ja erityisesti sen biodiversiteettiin kohdistuvia muutoksia on kuitenkin syytä tarkastella vielä uusilla jatkotutkimuksilla. Aihe on erittäin ajankohtainen ja

vaikuttaa todella suurelle alueelle merkittävästi. Jatkotutkimusten myötä olisi myös mahdollisuus arvioida ja suunnitella tarkemmin Itämeren suojelualueiden ja rakennushankkeiden muutoksia.

6 Johtopäätökset

Tutkimuksessa tarkasteltujen aineistojen perusteella Itämereen kohdistuu merkittäviä muutoksia suolapitoisuudessa ilmastonmuutoksen myötä. Tutkimuksessa hyödynnettyjen aineistojen ja paikkatietomenetelmien avulla saatujen tulosten perusteella suolapitoisuuden muutoksilla on merkittäviä vaikutuksia Suomen rannikon ja samalla myös koko Itämeren lajiston elinalueisiin ja merialueiden biodiversiteettiin. Tutkimuksessa saatujen tulosten perusteella havaittiin, että tutkimukseen asetettu hypoteesi pitää paikkansa: merellisten lajien elinalueet vähenevät suolapitoisuuden alentuessa ja samalla makean veden lajien mahdolliset elinalueet lisääntyvät. Tulosten avulla pystyttiin myös vastaamaan kaikkiin tutkimuksessa asetettuihin tutkimuskysymyksiin.

Miten suolapitoisuuden muutokset vaikuttavat Itämerellä ja erityisesti Suomen rannikolla elävien merellisten lajien elinalueisiin?

Suolapitoisuuden alenemisella havaittiin olevan merkittäviä vaikutuksia merellisten lajien elinalueisiin. Tutkimuksessa tarkasteltiin merellisinä lajeina sinisimpukkaa ja meriruohoa, joiden elinalueet Suomen rannikolla ja koko Itämerellä vähenevät runsaasti. Sinisimpukan elinalueet vähenevät 35,2 % - 67,9 % riippuen suolapitoisuuden alenemisen suuruudesta. 3. skenaariossa sinisimpukan viimeiset elinalueet Suomen rannikolla sijoittuisivat Saaristomerelle. Vastaavanlaisia muutoksia sinisimpukan elinalueille tapahtuu myös Ruotsin ja Viron rannikoilla. Meriruohon elinalueet puolestaan katoavat Suomen rannikolta kokonaan jo ensimmäisessä skenaariossa. Tutkimuksessa arvioitiin kuitenkin myös meriruohon tilannetta koko Itämerellä, jolloin arviot osoittivat elinalueiden vetäytymisen jopa Bornholmin saaren läheisyyteen.

Mahdollistaako suolapitoisuuden aleneminen makean veden lajien levittäytymisen Suomen rannikolla ja muualla Itämerellä?

Tutkimuksesta saatujen tulosten perusteella havaittiin, että makean veden lajien mahdolliset elinalueet lisääntyvät huomattavasti Itämerellä suolapitoisuuden alentuessa. Tutkimuksessa tarkasteltiin vesisammalta ja murtovesisientä makean veden lajien edustajina. Vesisammaleelle mahdolliset elinalueet levittäytyivät erittäin nopeasti jo ensimmäisessä skenaariossa koko Suomen rannikolle. Myös

murtovesisieni levittäytyi asteittain kattamaan koko Suomen rannikolla sijaitsevat otolliset elinalueet suolapitoisuuden laskiessa.

Miten suolapitoisuuden muutokset vaikuttavat Itämeren mereisyyden käsitteeseen ja minkälaisia hydrologisia muutoksia sillä saattaa olla Itämerellä?

Itämerellä tapahtuvat muutokset suolapitoisuudessa ja sitä myöten lajikannoissa näyttäisivät heikentävän Itämeren merellisyyden käsitettä. Koko Itämerellä esiintyvä lajisto alkaa muistuttaa enemmän sisävesien lajikantaa mereisten lajien vetäytyessä kohti Tanskan salmia. Biodiversiteettiin ja habitaatteihin kohdistuvien muutosten lisäksi suolapitoisuuden muutoksilla saattaa olla merkittäviä vaikutuksia koko Itämeren hydrologiaan. Itämeren kerroksellisuus perustuu lähes täysin suolapitoisuuden harppauskerrokseen, halokliiniin. Suolapitoisuudessa tapahtuvat muutokset saattavat heikentää halokliinin vaikutusta. Tämä muutos saattaisi edistää Itämeren syvänteiden vesimassan vaihtuvuutta. Makean veden määrän lisääntyminen Itämerellä saattaa kuitenkin vaikuttaa myös tulevaisuudessa esiintyvien suolapulssien tiheyden vähentymiseen. Lisääntyneen sadannan vuoksi Itämeren vesimassa kasvaa, jolloin tarvitaan voimakkaampi suolapulssi, jotta Pohjanmeren suolapitoiset vesimassat jaksavat kulkeutua Itämerelle. Mikäli Itämeren suolapitoisuus alentuu odotetusti ja makean veden lajit levittäytyvät laajemmille alueille, saattaa suolapulssien aiheuttamilla väliaikaisilla suolapitoisuuden muutoksilla olla haitallisia vaikutuksia Itämeren lajistoon.

Kiitokset

Haluaisin kiittää ohjaajaani Risto Kalliola tuesta ja opastuksesta pro gradu - tutkielman kirjoittamisessa. Suuret kiitokset myös toiselle ohjaajalleni Matti Sahlalle kaikista neuvoista, aineistoista sekä avustuksesta paikkatietomenetelmien käytössä. Kiitokset myös Metsähallituksen tutkijoille tutkimuksen kuvamateriaalista.

Lähteet

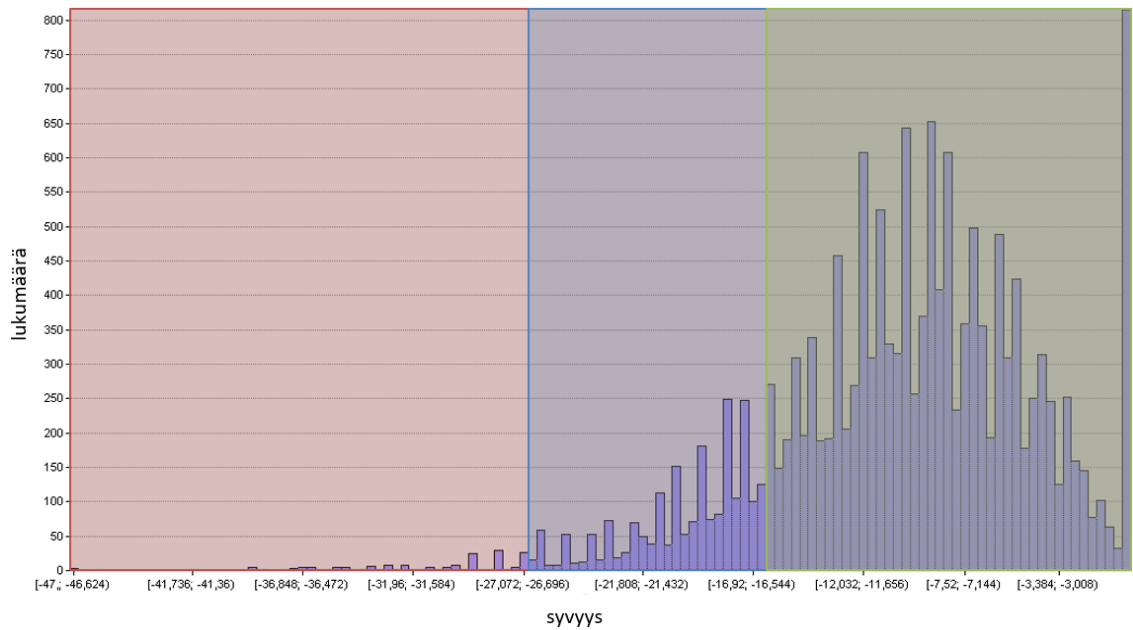
- Baden, S. , M. Gullström, B. Lundén, L. Pihl & R. Rosenberg. (2003). Vanishing Seagrass (*Zostera marina*, L.) in Swedish Coastal Waters. *A Journal of the Human Environment* 32: 354-377.
- Björkman U. & M. Sahla. (2018). SeaGIS 2 -project report [draft/luonnos], Parks & Wildlife Finland, Botnia Atlantica Interreg.
- Dippner, J. W. , I. Vuorinen, D. Daunys, J. Flinkman, A. Halkka, F. W. Köster, E. Lehtikainen, B. R. MacKenzie, C. Möllmann, F. Møhlenberg, S. Olenin, D. Schiedek, H. Skov & N. Wasmund. (s.a.). Climate-related Marine Ecosystem Change. *Teoksessa* Bolle, H-J. , M. Menenti, & S. I. Rasool. (toim.) *Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin*, 309-378. Springer-Verlag, Berlin.
- Duarte, C. M. (2002). The future of seagrass meadows. *Environmental Conservation* 29(2), 192-206.
- Evans, D. (2012). Building the European Union´s Natura 2000 network. *Nature Conservation* 1: 11-26
- Graham, L. P. , D. Chen, O. B. Christensen, E. Kjellström, V. Krysanova, H. E. M. Meier, M. Radziejewski, J. Räisänen, B. Rockel & K. Ruosteenoja. (s.a.). Projections of Future Anthropogenic Climate Change. *Teoksessa* Bolle, H-J. , M. Menenti, & S. I. Rasool. (toim.) *Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin*, 133-220. Springer-Verlag, Berlin.
- Grimenes, AA. & Ø. Nissen. (2004). Mathematical modelling of the annual temperature wave based on monthly mean temperatures, and comparisons between local climate trends at seven Norwegian stations. *Theor. Appl. Climatol.* 78: 229-246.
- Hallanaro, E-L. , K. Kostamo & S. Kiviluoto. (2017). Elämää meressä. *Teoksessa* Viitasalo, M. , K. Kostamo, E-L. Hallanaro, W. Viljanmaa, S. Kiviluoto, J. Ekebon & P. Blankett. (toim.). *Meren arteet*, 220-232. Gaudeamus, Tallinna.
- Hauxwell, J. , J. Cebrian, & I. Valiela. (2003). Eelgrass *Zostera marina* loss in temperate estuaries: relationship to land-derived nitrogen loads and effect of light limitation imposed by algae. *MARINE ECOLOGY PROGRESS SERIES* 247: 59-73.
- Heino, R. , H. Tuomenvirta, V. S. Vuglinsky, B. G. Gustafsson, H. Alexandersson, L. Bärring, A. Briede, J. Cappelen, D. Chen, M. Falarz, E. J. Fjorland, J. Haapala, J. Jaagus, L. Kitaev, A. Kont, E. Kuusisto, G. Lindström, H. E. M. Meier, M. Miętus, A. Moberg, K. Myrberg, T. Niedzwiedz, Ø. Nordli, A. Omstedt, K. Orviku, Z. Pruszk, E. Rimkus, V. Russak, C. Schrum, Ü. Suursaar, T. Vihma, R. Weisse & J. Wibig. (s.a.). Past and Current Climate Change. *Teoksessa* Bolle, H-J. , M. Menenti, & S. I. Rasool. (toim.) *Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin*, 35-132. Springer-Verlag, Berlin.
- HELCOM. (2013a). *Climate change in the Baltic Sea Area: HELCOM thematic assessment in 2013*. Balt. Sea Environ. Proc. 137.
- HELCOM. (2013b). *HELCOM HUB – Technical Report on the HELCOM Underwater Biotope and habitat classification*. Balt. Sea Environ. Proc. 139.
- Herkül, A. & J. Kotta. (2009). Effects of eelgrass (*Zostera marina*) canopy removal and sediment addition on sediment characteristics and benthic communities in the Northern Baltic Sea. *Marine Ecology* 30: 74-82.
- Hill, R. W. , G. A. Wyse & M. Anderson. (2008). *Animal physiology*. Sinauer Associates, Inc, Sunderland, Massachusetts

- Holopainen, R. , M. Lanki, A. O. Laine, K. Könönen & M. Lehtiniemi. (2017). Syvänteiden pimeät korttelit. *Teoksessa* Viitasalo, M. , K. Kostamo, E-L. Hallanaro, W. Viljanmaa, S. Kiviluoto, J. Ekebom & P. Blankett. (toim.). *Meren aarteet*, 236- 263. Gaudeamus, Tallinna.
- Hyvärinen, V. & J. Korhonen. (2003). *Hydrologinen vuosikirja 1996-2000*. Suomen Ympäristö 599. Suomen Ympäristökeskus, Helsinki.
- Jaagus, J. & R. Ahas. (2000). Space-time variations of climatic seasons and their correlation with the phenological development of nature in Estonia. *CLIMATE RESEARCH* 15: 207-219
- Kautsky, L. & N. Kautsky. (2000). *The Baltic Sea, including Bothnian Sea and Bothnian Bay*. Elsevier Science Ltd.
- Kharlamenko, V. I. , S. I. Kiyashko, A. B. Imbs & D. I. Vyshkvartzev. (2001). Identification of food sources of invertebrates from the seagrass *Zostera marina* Community using carbon and sulfur isotope ratio and fatty acid analyses. *MARINE ECOLOGY PROGRESS SERIES* 220:103-117.
- Kiviluoto, S. , K. Kostamo, R. Holopainen, H. Arponen, M. Lanki, V. Karvinen, K. Könönen & R. Laaksonen. (2017). Hiekkapohjien niityt. *Teoksessa* Viitasalo, M. , K. Kostamo, E-L. Hallanaro, W. Viljanmaa, S. Kiviluoto, J. Ekebom & P. Blankett. (toim.). *Meren aarteet*, 362-397. Gaudeamus, Tallinna.
- Kostamo, K. , R. Holopainen, H. Arponen, M. Westerbom, K. Könönen, E. Keskinen, M. Lanki, S. Kiviluoto, S. Salovius-Laurén, M. Lehtiniemi & A. O. Laine. (2017). Kalliorantojen vedenalaiset metsät. *Teoksessa* Viitasalo, M. , K. Kostamo, E-L. Hallanaro, W. Viljanmaa, S. Kiviluoto, J. Ekebom & P. Blankett. (toim.). *Meren aarteet*, 264-361. Gaudeamus, Tallinna.
- Leppäranta, M. & K. Myrberg. (2009). *Physical oceanography of the Baltic sea*. Praxis Publishing Ltd, Chichester, UK.
- McClatchey, J. (2012). Global climate and weather. *Teoksessa* J. Holden. (toim.). *Physical Geographdy and the Environment*, 117-156. Pearson Education Limited, London
- Meier, H. E. M. , E. Kjellström & L. P. Graham. (2006). Estimating uncertainties of projected Baltic Sea salinity in the late 21st century. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS* 33.
- Meier, H. E. M. (2015). Projected Change—Marine Physics. *Teoksessa* Bolle, H-J. , M. Menenti, & S. I. Rasool. (toim.) *Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin*, 243-252. Springer, Heidelberg.
- Prevodnik, A. , J. Garderstöm, K. Lilja, T. Elfwing, B. Mcdonagh, N. Petrović, M. Tedengren, D. Sheehan & T. Bollner. (2007). Oxidative stress in response to xenobiotics in the blue mussel *Mytilus edulis* L.: Evidence for variation along a natural salinity gradient of the Baltic Sea. *Aquatic Toxicology* 82: 63-71
- Reece, J. B. , L. A. Urry, M. L. Cain, S. A. Wasserman, P. V. Minorsky & R. B. Jackson. (2011). *Campbell Biology*. Pearson Education, Inc. San Francisco
- Remane, A. (1940) *Einführung in die zoologische Ökologie der Nord- und Ostsee. Die Tierwelt der Nord- und Ostsee*. Becker & Ehler, Leipzig. Vol 1: 1-238.
- Rutgersson, A. , J. Jaagus, F. Schenk, M. Stendel, L. Barring, A. Briede, B. Claremar, I. Hanssen-Bauer, J. Holopainen, A. Moberg, Ø. Nordli, E. Rimkus & J. Wibig. (2015). Recent Change Atmosphere. *Teoksessa* Bolle, H-J. , M. Menenti, & S. I. Rasool. (toim.) *Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin*, 69-98. Springer, Heidelberg.

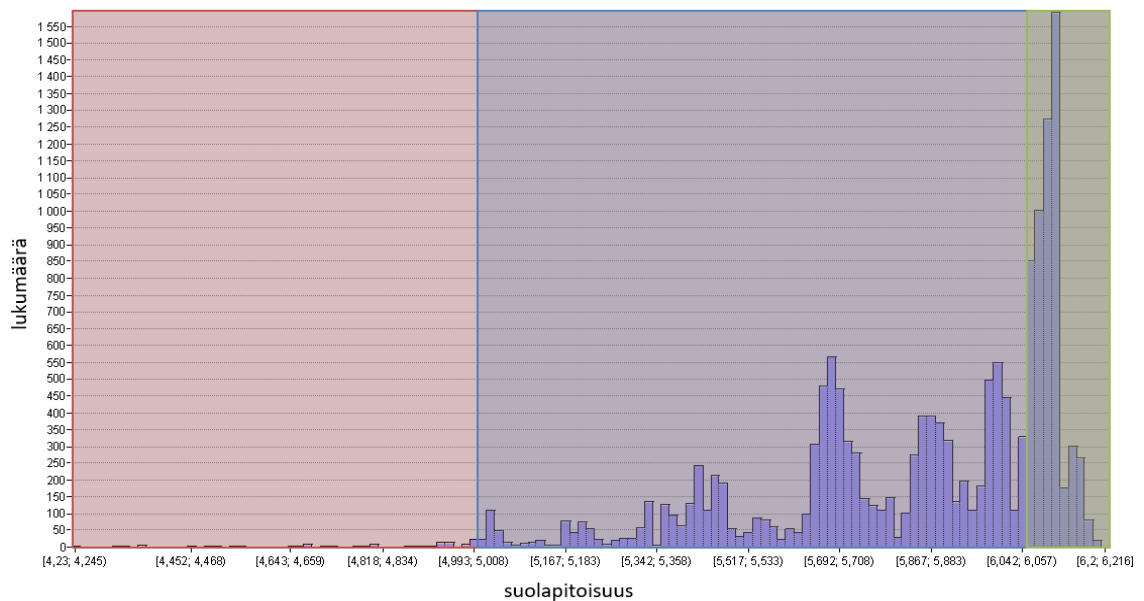
- Smith, B. , A. Aasa, R. Ahas, T. Blenckner, T. V. Callaghan, J. de Chazal, C. Humborg, A. M. Jönsson, S. Kellomäki, A. Kull, E. Lehtikainen, Ü. Mander, P. Nöges, T. Nöges, M. Rounsevell, M. Sofiev, P. Tryjanowski, A. Wolf. (s.a.). Climate related Change in Terrestrial and Freshwater Ecosystems. *Teoksessa* Bolle, H-J. , M. Menenti, & S. I. Rasool. (toim.) *Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin*, 221-308. Springer Verlag, Berlin.
- Snoeijs-Leijonmalm, P. & E. Andrén. (2017). Why is the Baltic Sea so special to live in?. *Teoksessa* Snoeijs-Leijonmalm, P. , H. Schubert & T. Redziejewska. (toim.) *Biological Oceanography of the Baltic Sea*. Springer Science+Business Media, Dordrecht.
- Storch von, H. & A. Omstedt. (2006). Introduction and Summary. *Teoksessa* Bolle, H-J. , M. Menenti, & S. I. Rasool. (toim.) *Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin*, 1-36. Springer Verlag, Berlin.
- Suominen, T. , H. Tolvanen & R. Kalliola. (2010). Surface layer salinity gradients and flow patterns in the archipelago coast of SW Finland, northern Baltic Sea. *Marine Environmental Research* 69: 216-226.
- Viitasalo, M. , A. O. Laine & M. Westerbom. (2017a). Elämän edellytykset. *Teoksessa* Viitasalo, M. , K. Kostamo, E-L. Hallanaro, W. Viljanmaa, S. Kiviluoto, J. Ekebom & P. Blankett. (toim.). *Meren aarteet*, 78-89. Gaudeamus, Tallinna.
- Viitasalo, M. , R. Holopainen, K. Kostamo, A. O. Laine, E. Virtanen & M. Westerbom. (2017b). Sopeutumiskyky ratkaisee. *Teoksessa* Viitasalo, M. , K. Kostamo, E-L. Hallanaro, W. Viljanmaa, S. Kiviluoto, J. Ekebom & P. Blankett. (toim.). *Meren aarteet*, 90-107. Gaudeamus, Tallinna.
- Virtasalo, J. J. , T. Kohonen, I. Vuorinen & T. Huttula. (2005). Sea bottom anoxia in the Archipelago Sea, northern Baltic Sea—Implications for phosphorus remineralization at the sediment surface. *Marine Geology* 224: 103-122.
- Vuorinen, I. , J. Hänninen, M. Viitasalo, U. Helminen & H. Kuosa. (1998). Proportion of copepod biomass declines with decreasing salinity in the Baltic Sea. *Journal of Marine Science* 55: 767-774.
- Waycott, M. , C. M. Duarte, T. J. B. Carruthers, R. J. Orth, W. C. Dennison, S. Olyarnik, A. Caaladine, J. W. Fourqurean, K. L. Heck, Jr. , A. R. Hughes, G. A. Kendrick, W. J. Kenworthy, F. T. Short & S. L. Williams. (2008). *Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems*. University of Washington, Seattle.
- Westerbom, M. , Kilpi, M. & O. Mustonen. (2001) Blue mussels, *Mytilus edulis*, at the edge of the range: population structure and biomass along a salinity gradient in the north eastern Baltic Sea. *Marine Biology* 140: 991-999.
- Winsor, P. , J. Rodhe. & A. Omstedt. (2001). Baltic Sea ocean climate: an analysis of 100 yr of hydrographic data with focus on the freshwater budget. *CLIMATE RESEARCH* 18: 5-15.

Liitteet

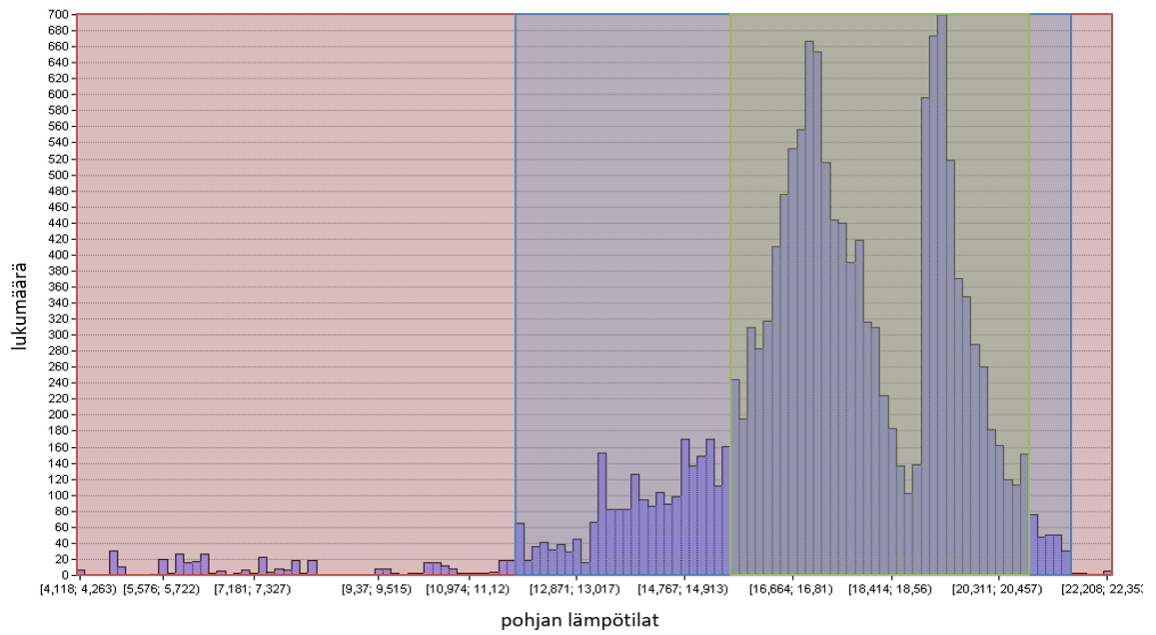
Liite 1: Sinisimpukan ympäristömuuttujien histogrammit.



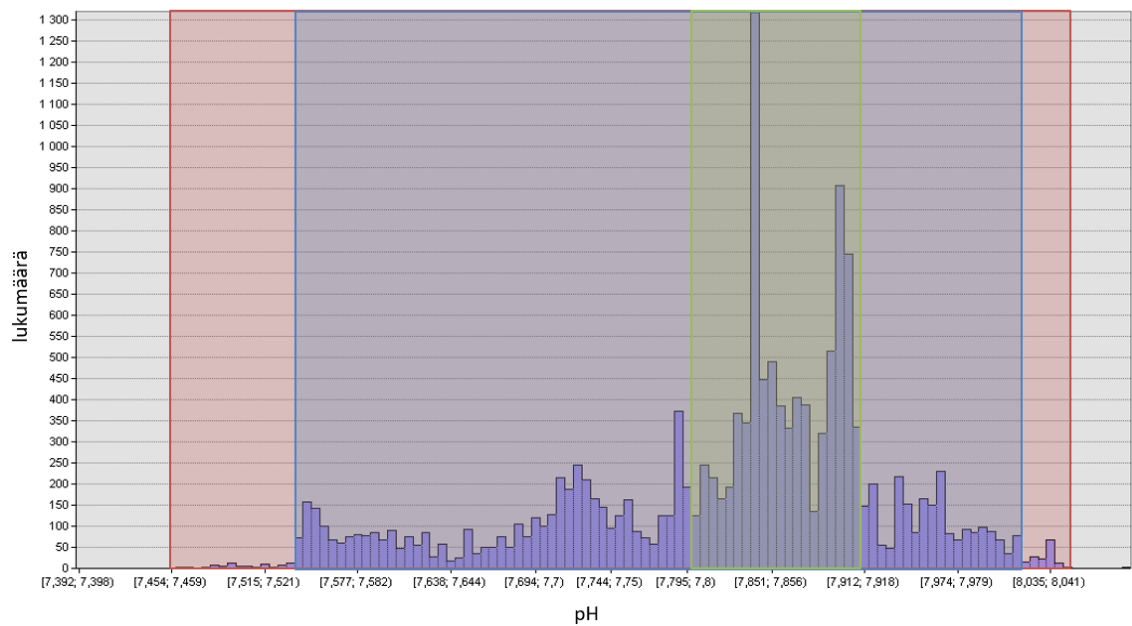
Kuva 24. Sinisimpukan syvyyden ympäristömuuttuja. Punainen alue esittää mahdollista elinaluetta, sininen soveliasta ja vihreä erittäin soveliasta. Luokitukset menevät limittäin, eli erittäin soveliaat alueet sisältyvät myös luokkiin: sovelias ja mahdollinen.



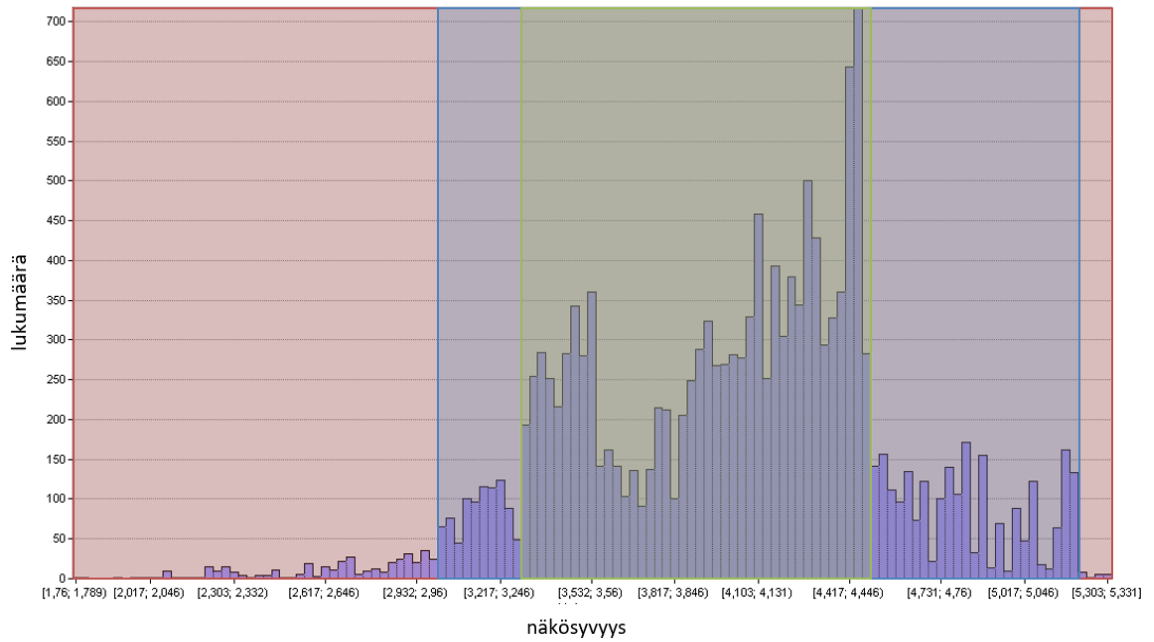
Kuva 25. Sinisimpukan suolapitoisuuden ympäristömuuttuja. Punainen alue esittää mahdollista elinaluetta, sininen soveliasta ja vihreä erittäin soveliasta. Luokitukset menevät limittäin, eli erittäin soveliaat alueet sisältyvät myös luokkiin: sovelias ja mahdollinen.



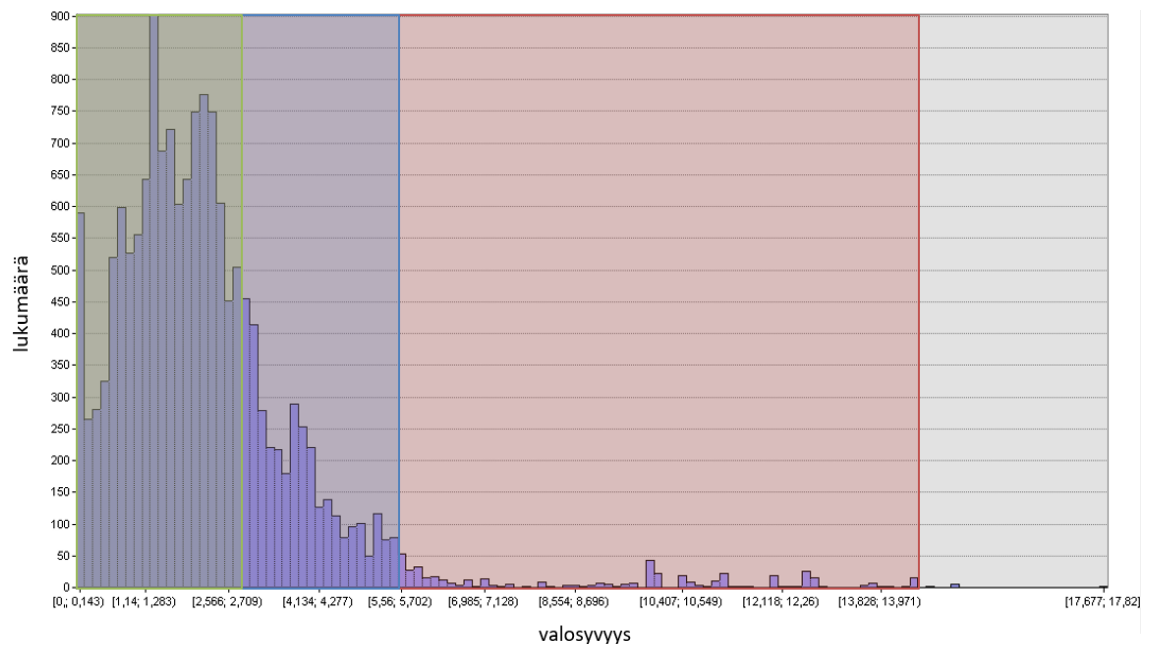
Kuva 26. Sinisimpukan pohjan lämpötilan ympäristömuuttuja. Punainen alue esittää mahdollista elinaluetta, sininen soveliasta ja vihreä erittäin soveliasta. Luokitukset menevät limittäin, eli erittäin soveliaat alueet sisältyvät myös luokkiin: sovelias ja mahdollinen.



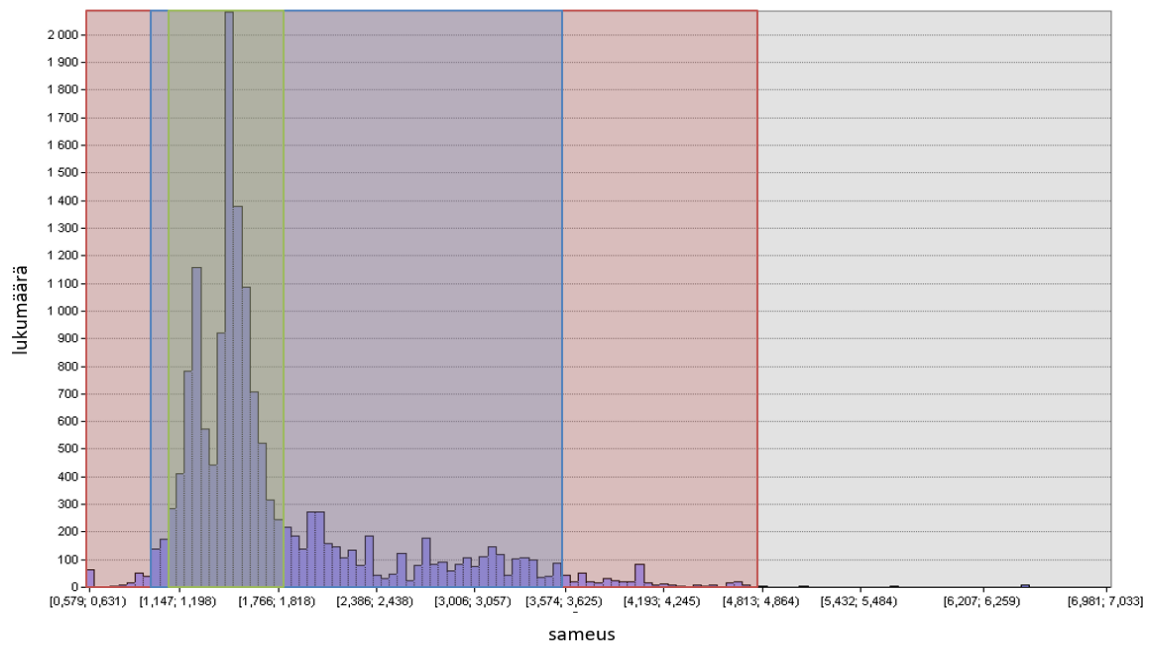
Kuva 27. Sinisimpukan pH:n ympäristömuuttuja. Punainen alue esittää mahdollista elinaluetta, sininen soveliasta ja vihreä erittäin soveliasta. Luokitukset menevät limittäin, eli erittäin soveliaat alueet sisältyvät myös luokkiin: sovelias ja mahdollinen.



Kuva 28. Sinisimpukan näkösyvyyden ympäristömuuttuja. Punainen alue esittää mahdollista elinaluetta, sininen soveliaasta ja vihreä erittäin soveliaasta. Luokitukset menevät limittäin, eli erittäin soveliaat alueet sisältyvät myös luokkiin: sovelias ja mahdollinen.

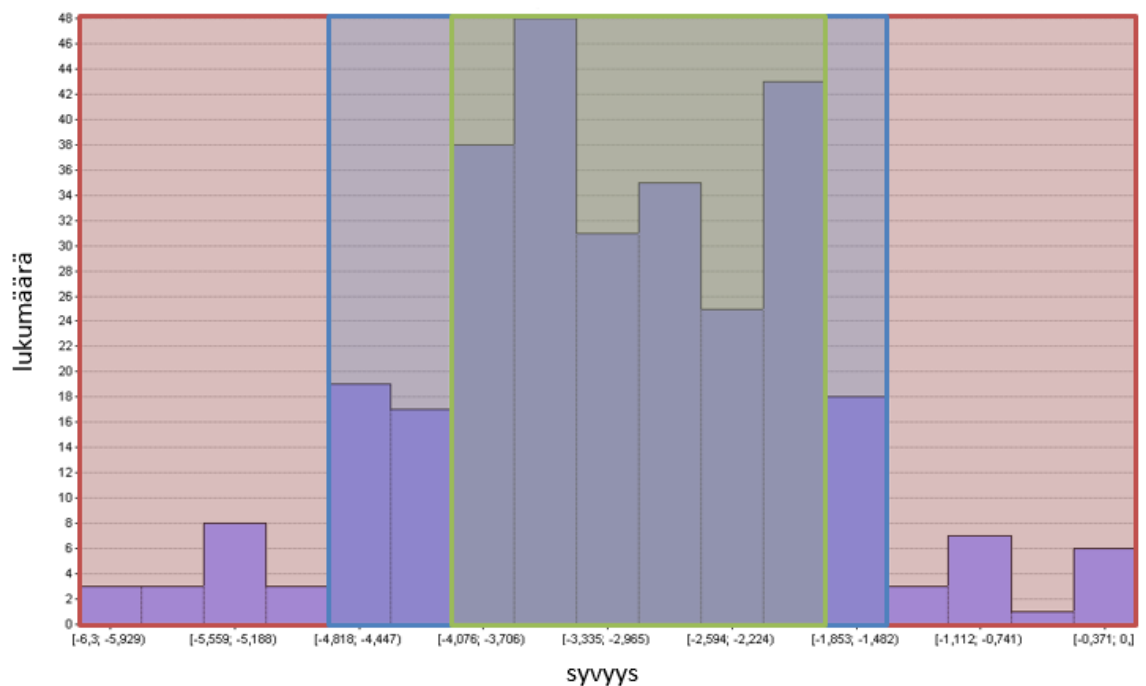


Kuva 29. Sinisimpukan valosyvyyden ympäristömuuttuja. Punainen alue esittää mahdollista elinaluetta, sininen soveliaasta ja vihreä erittäin soveliaasta. Luokitukset menevät limittäin, eli erittäin soveliaat alueet sisältyvät myös luokkiin: sovelias ja mahdollinen.

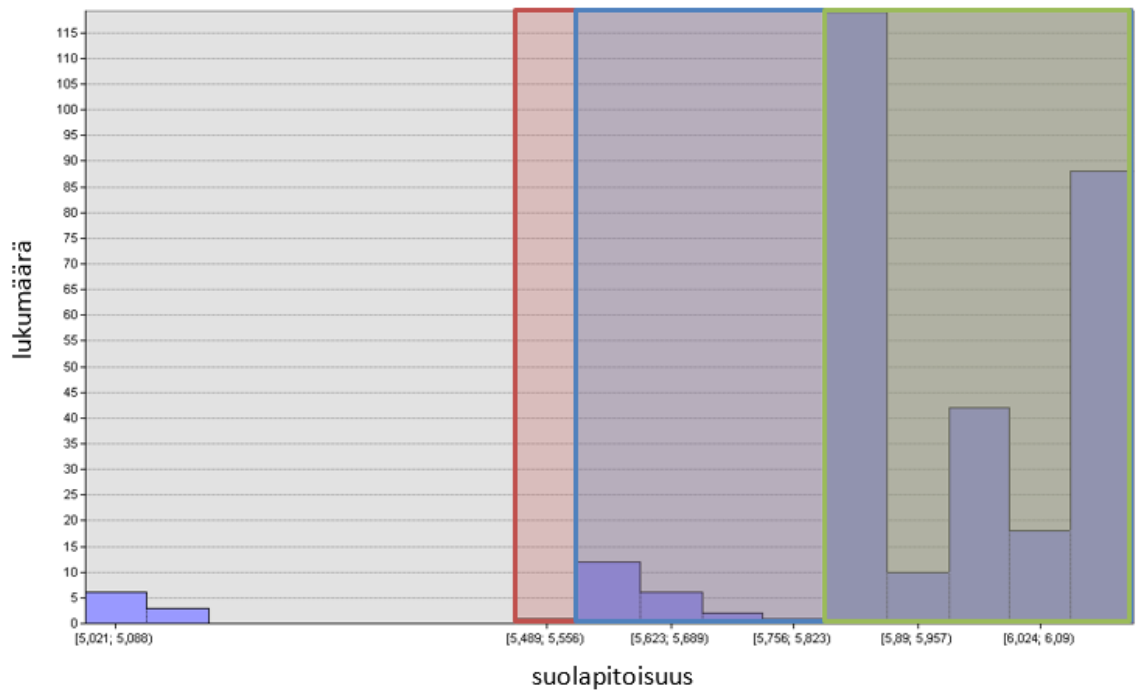


Kuva 30. Sinisimpukan sameuden ympäristömuuttuja. Punainen alue esittää mahdollista elinaluetta, sininen soveliaasta ja vihreä erittäin soveliaasta. Luokitukset menevät limittäin, eli erittäin soveliaat alueet sisältyvät myös luokkiin: sovelias ja mahdollinen.

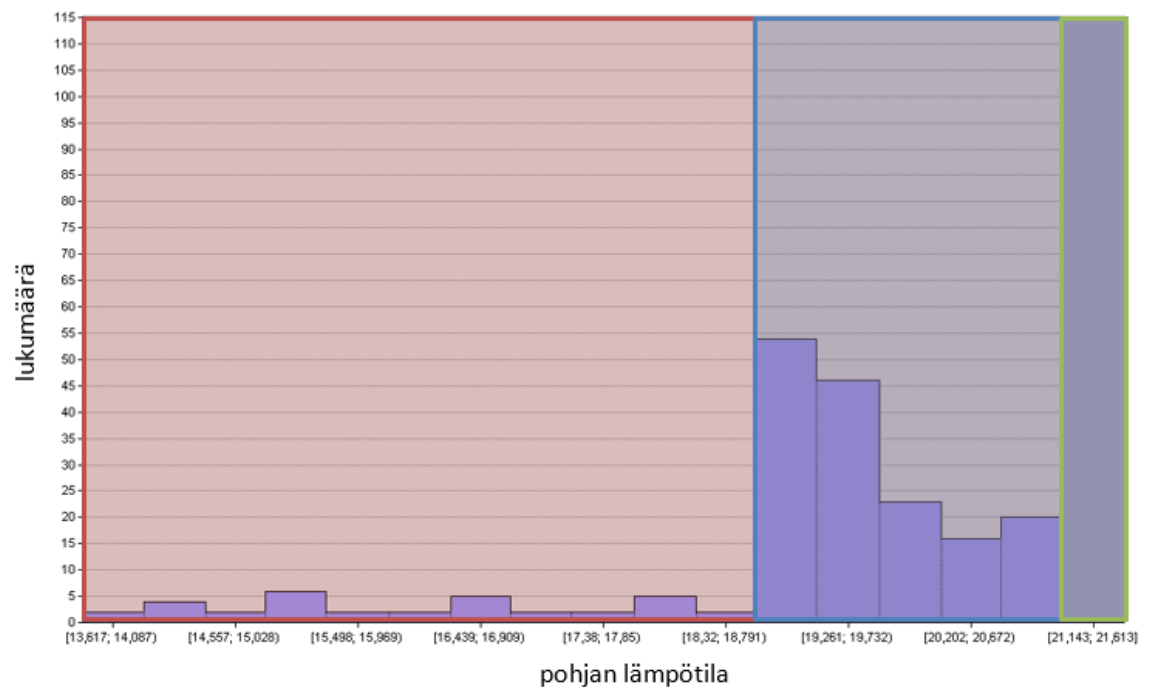
Liite 2: Meriruohon ympäristömuuttujien histogrammit.



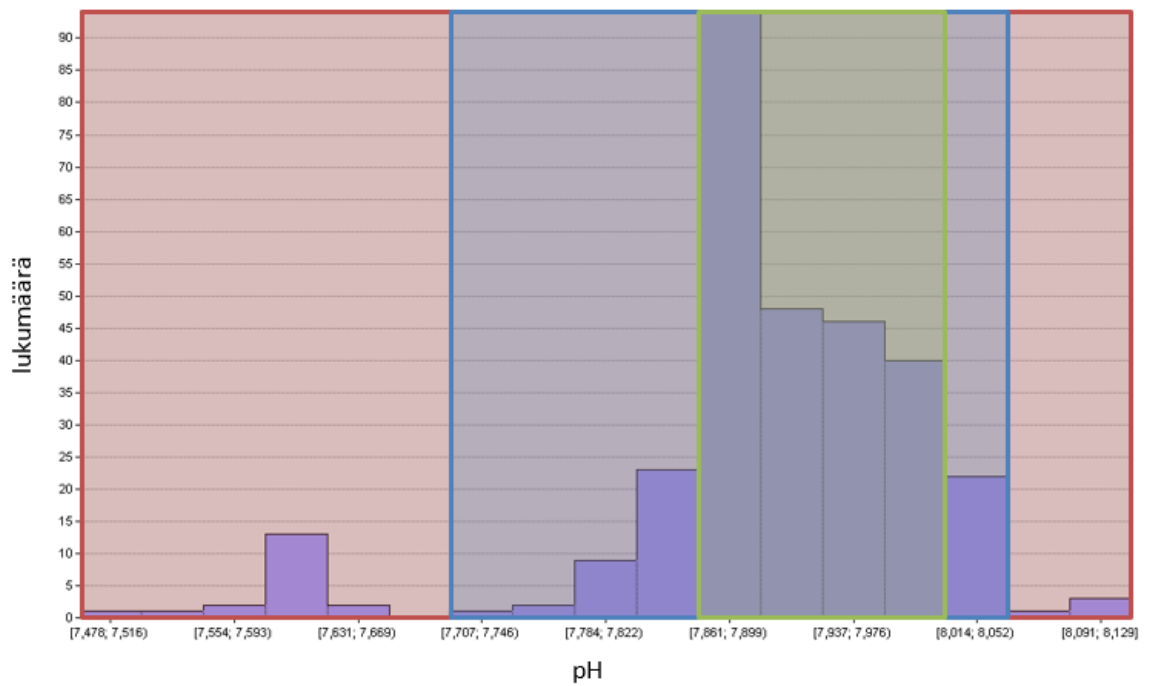
Kuva 31. Meriruohon syvyyden ympäristömuuttuja. Punainen alue esittää mahdollista elinaluetta, sininen soveliaasta ja vihreä erittäin soveliaasta. Luokitukset menevät limittäin, eli erittäin soveliaat alueet sisältyvät myös luokkiin: sovelias ja mahdollinen.



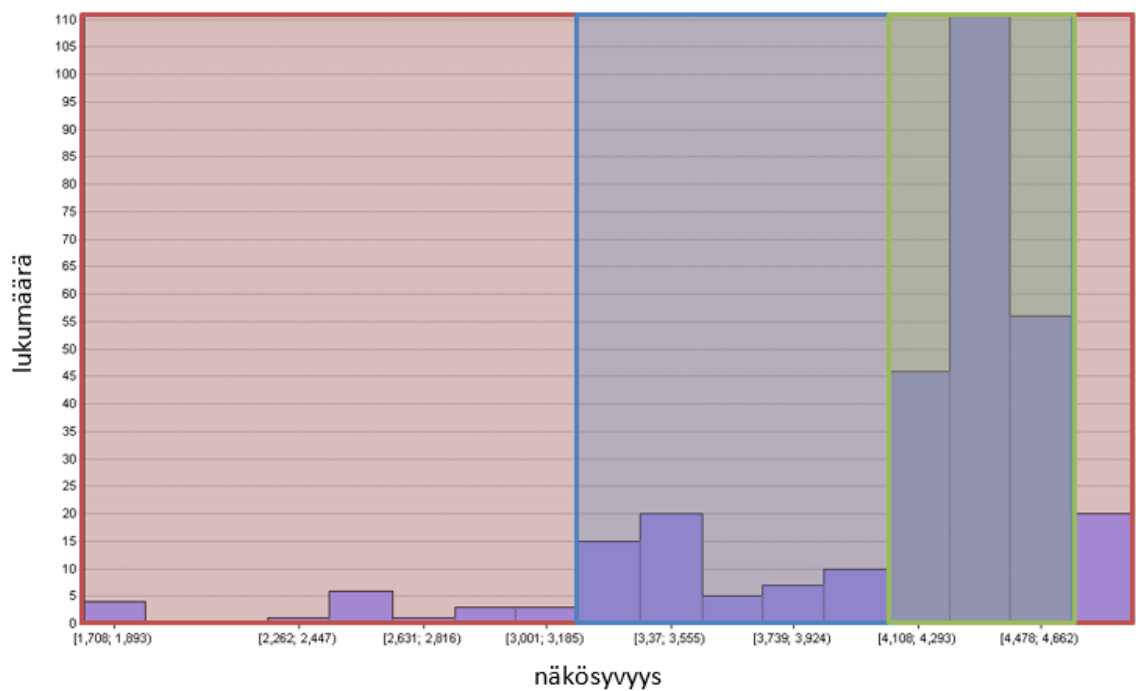
Kuva 32. Meriruohon suolapitoisuuden ympäristömuuttuja. Punainen alue esittää mahdollista elinaluetta, sininen soveliaasta ja vihreä erittäin soveliaasta. Luokitukset menevät limittäin, eli erittäin soveliaat alueet sisältyvät myös luokkiin: sovelias ja mahdollinen.



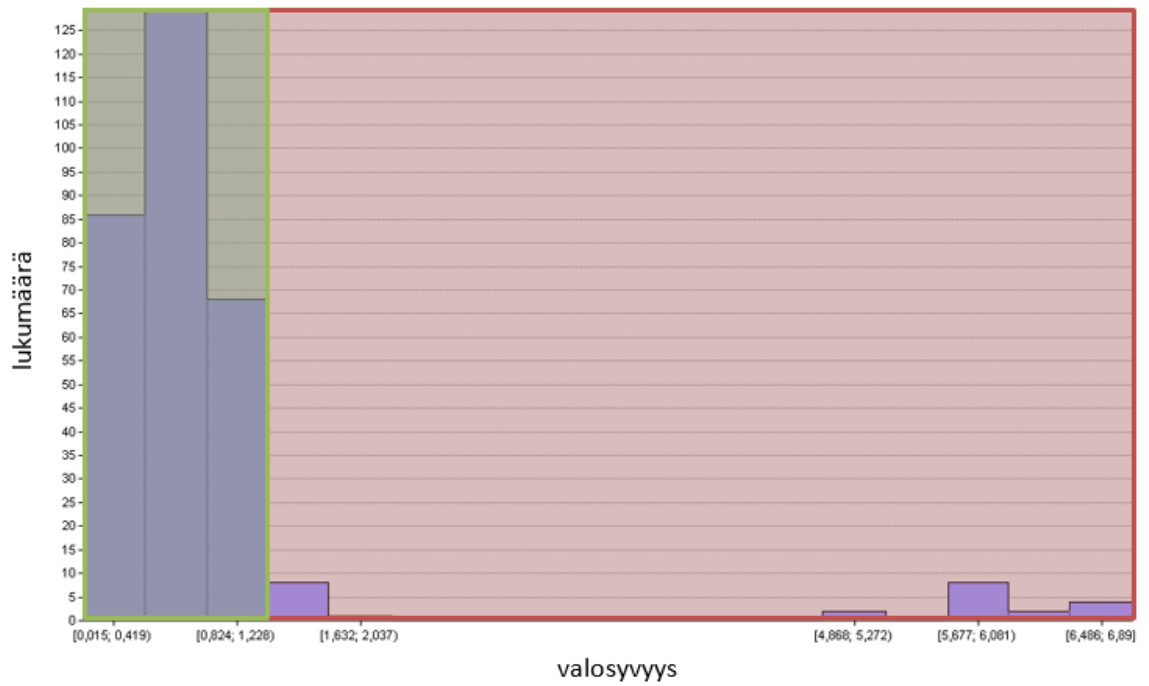
Kuva 33. Meriruohon pohjan lämpötilan ympäristömuuttuja. Punainen alue esittää mahdollista elinaluetta, sininen soveliaasta ja vihreä erittäin soveliaasta. Luokitukset menevät limittäin, eli erittäin soveliaat alueet sisältyvät myös luokkiin: sovelias ja mahdollinen.



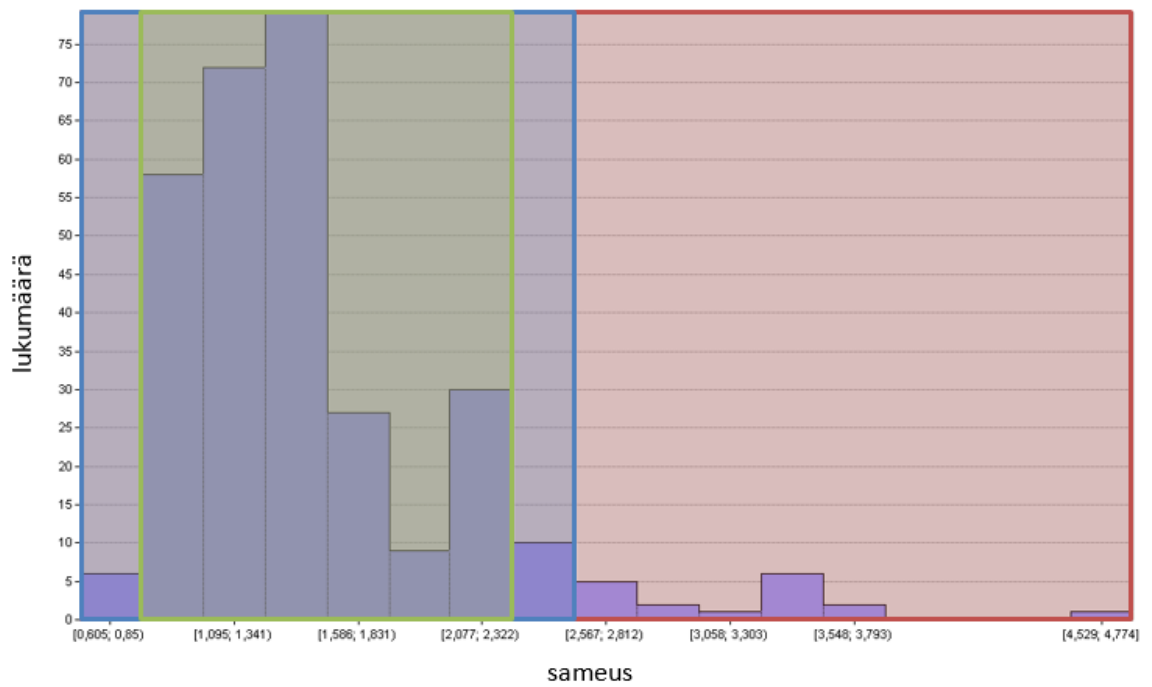
Kuva 34. Meriruohon pH:n ympäristömuuttuja. Punainen alue esittää mahdollista elinaluetta, sininen soveliaasta ja vihreä erittäin soveliaasta. Luokitukset menevät limittäin, eli erittäin soveliaat alueet sisältyvät myös luokkiin: sovelias ja mahdollinen.



Kuva 35. Meriruohon näkösyvyyden ympäristömuuttuja. Punainen alue esittää mahdollista elinaluetta, sininen soveliaasta ja vihreä erittäin soveliaasta. Luokitukset menevät limittäin, eli erittäin soveliaat alueet sisältyvät myös luokkiin: sovelias ja mahdollinen.

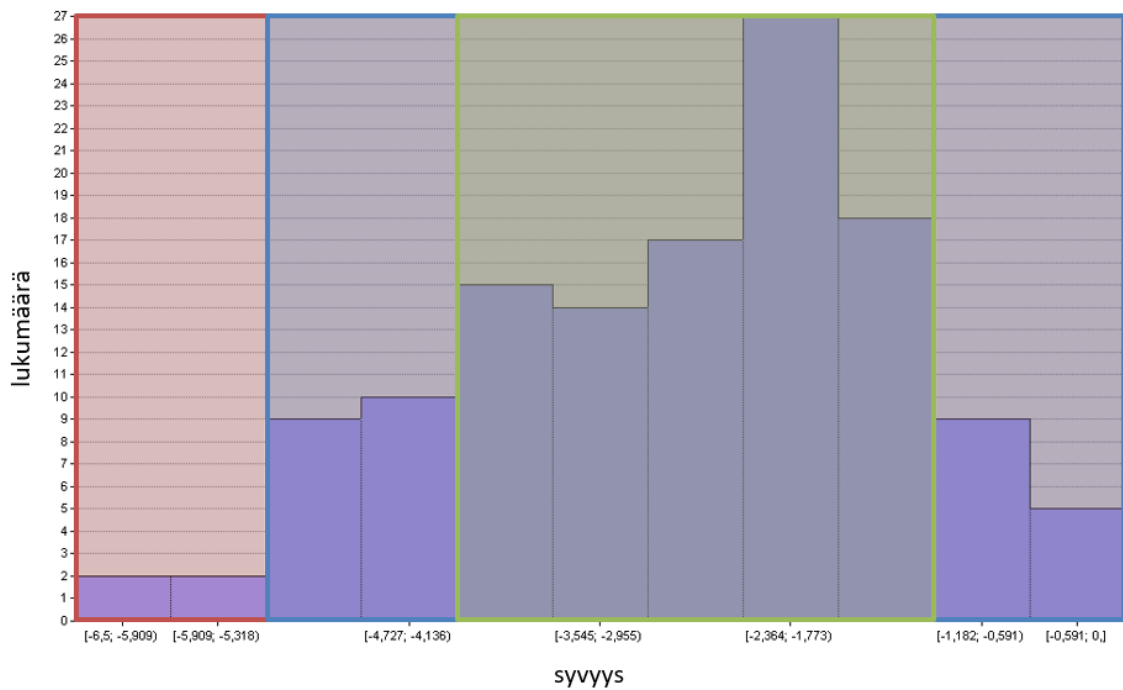


Kuva 36. Meriruohon valosvyvyyden ympäristömuuttuja. Punainen alue esittää mahdollista elinaluetta, sininen soveliasta ja vihreä erittäin soveliasta. Luokitukset menevät limittäin, eli erittäin soveliaat alueet sisältyvät myös luokkiin: sovelias ja mahdollinen.

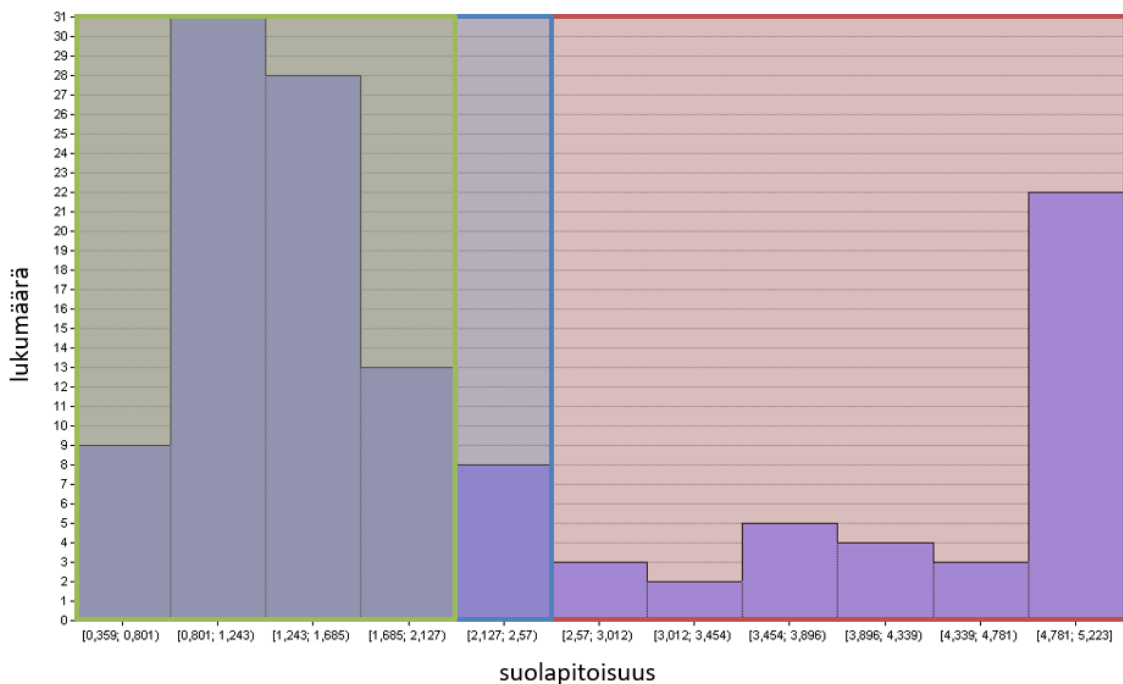


Kuva 37. Meriruohon sameuden ympäristömuuttuja. Punainen alue esittää mahdollista elinaluetta, sininen soveliasta ja vihreä erittäin soveliasta. Luokitukset menevät limittäin, eli erittäin soveliaat alueet sisältyvät myös luokkiin: sovelias ja mahdollinen.

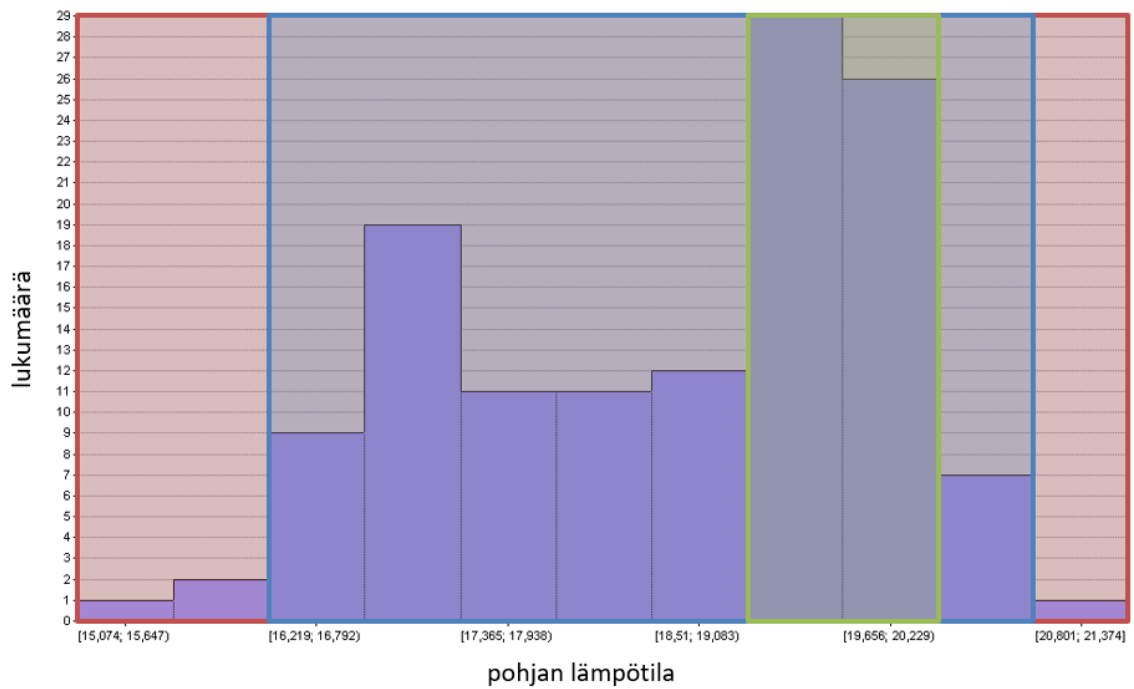
Liite 3: Vesisammaleen ympäristömuuttujien histogrammit.



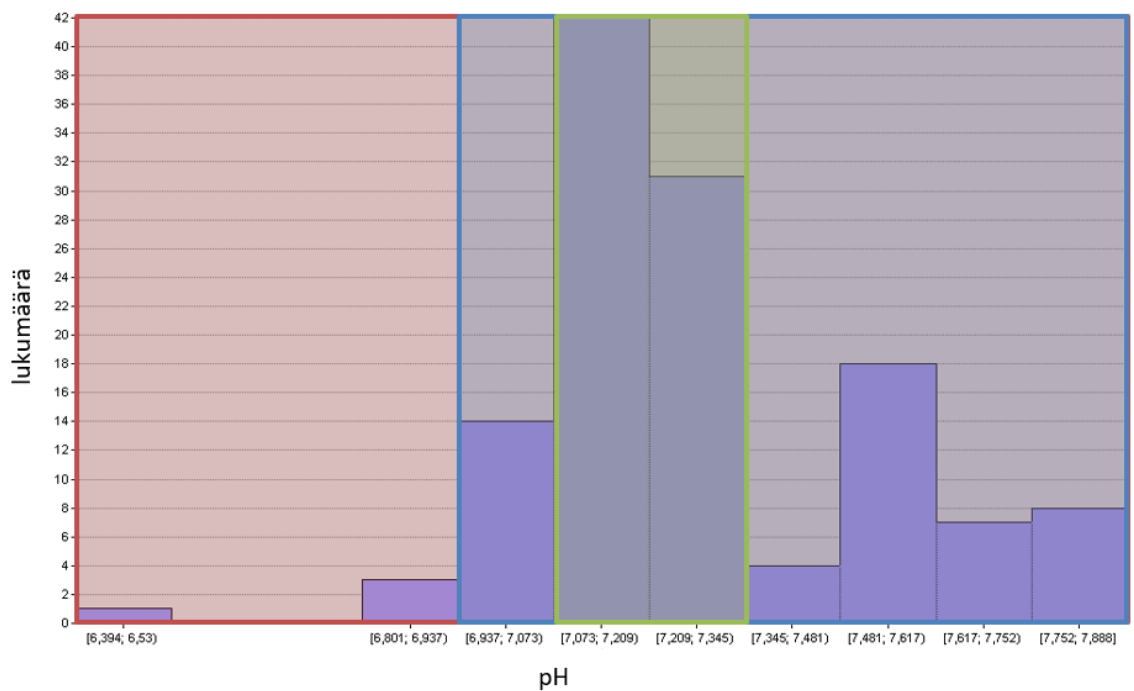
Kuva 38. Vesisammaleen syvyyden ympäristömuuttuja. Punainen alue esittää mahdollista elinaluetta, sininen soveliaasta ja vihreä erittäin soveliaasta. Luokitukset menevät limittäin, eli erittäin soveliaat alueet sisältyvät myös luokkiin: sovelias ja mahdollinen.



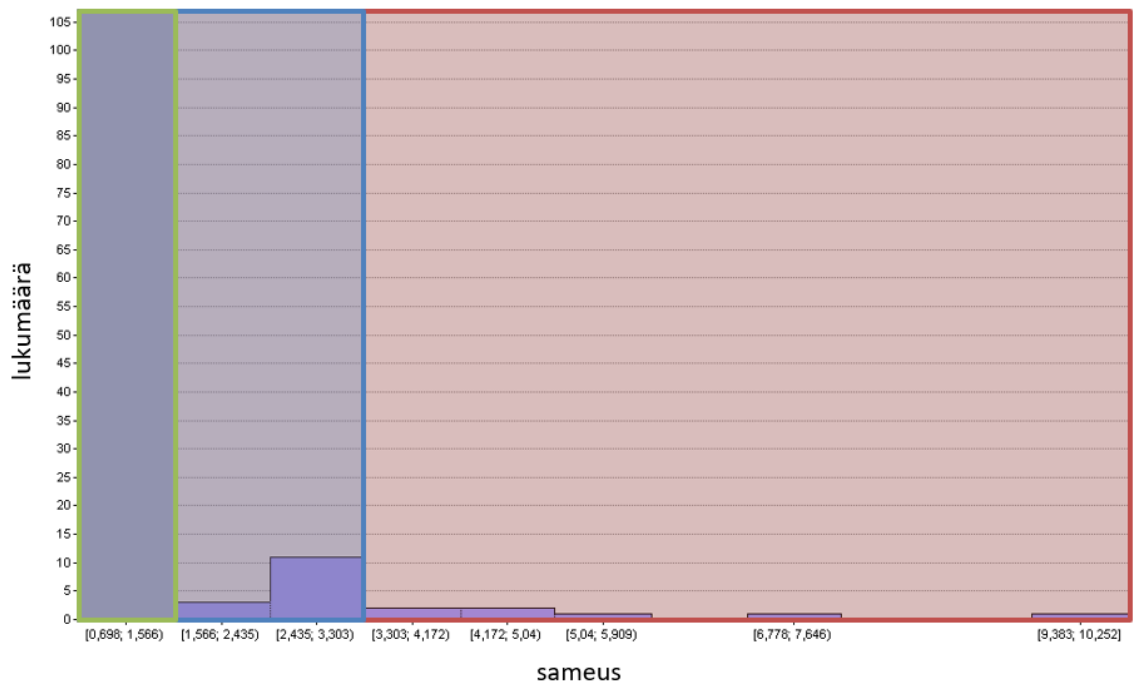
Kuva 39. Vesisammaleen suolapitoisuuden ympäristömuuttuja. Punainen alue esittää mahdollista elinaluetta, sininen soveliaasta ja vihreä erittäin soveliaasta. Luokitukset menevät limittäin, eli erittäin soveliaat alueet sisältyvät myös luokkiin: sovelias ja mahdollinen.



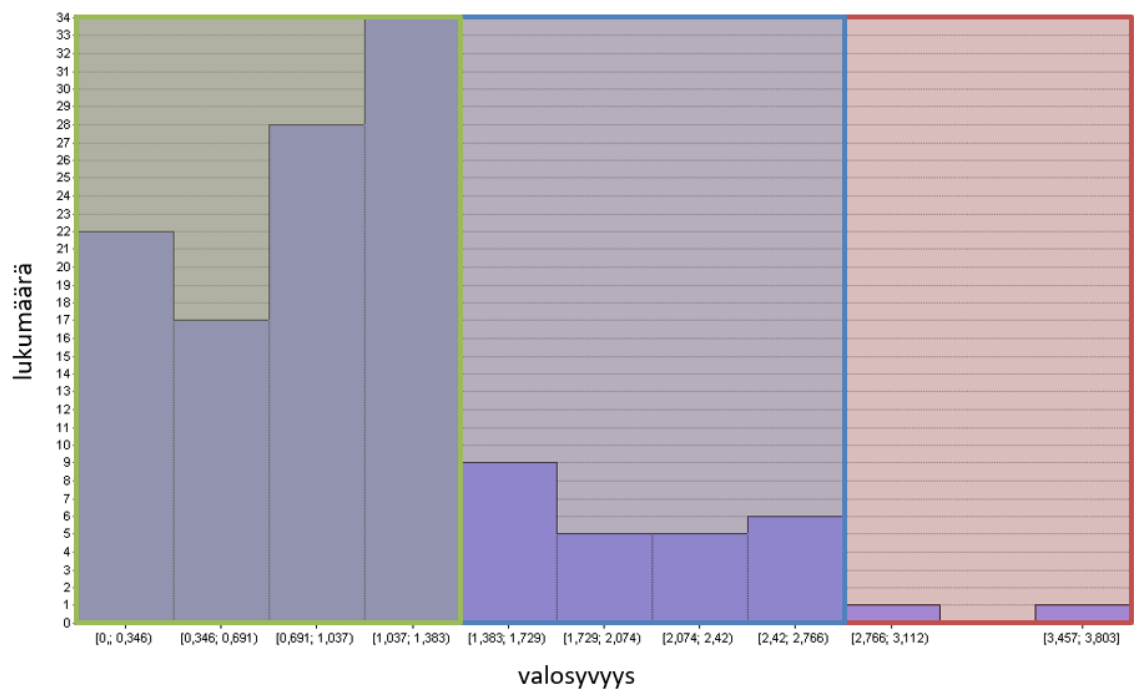
Kuva 40. Vesisammaleen pohjan lämpötilan ympäristömuuttuja. Punainen alue esittää mahdollista elinaluetta, sininen soveliaasta ja vihreä erittäin soveliaasta. Luokitukset menevät limittäin, eli erittäin soveliaat alueet sisältyvät myös luokkiin: sovelias ja mahdollinen.



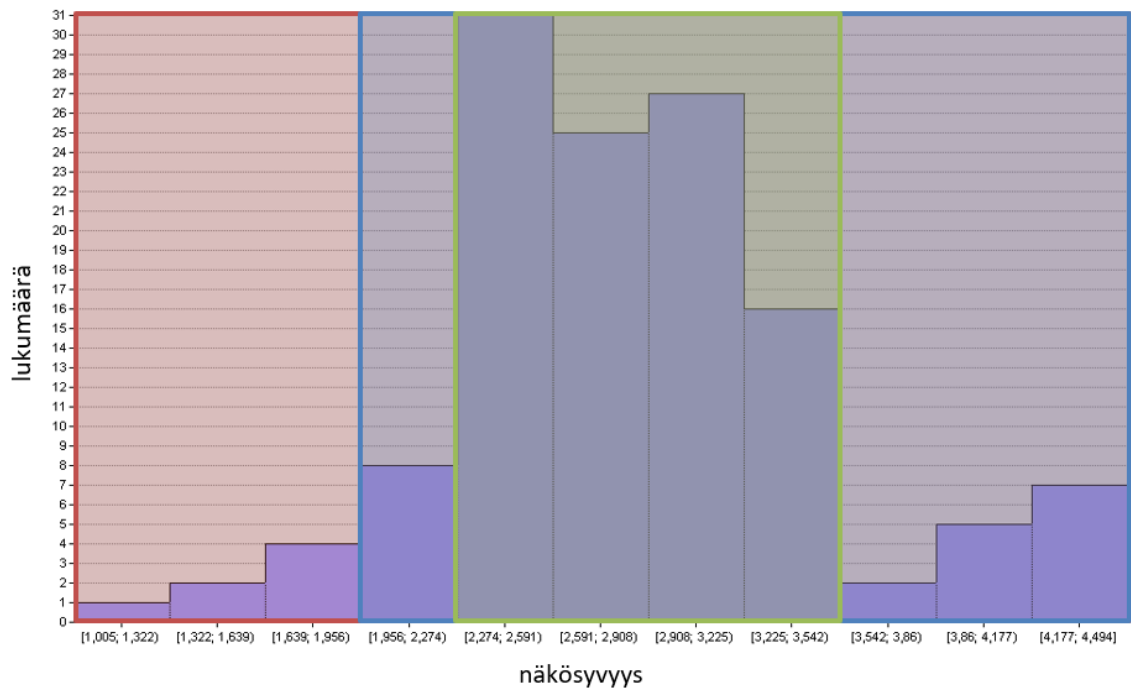
Kuva 41. Vesisammaleen pH:n ympäristömuuttuja. Punainen alue esittää mahdollista elinaluetta, sininen soveliaasta ja vihreä erittäin soveliaasta. Luokitukset menevät limittäin, eli erittäin soveliaat alueet sisältyvät myös luokkiin: sovelias ja mahdollinen.



Kuva 42. Vesisammaleen sameuden ympäristömuuttuja. Punainen alue esittää mahdollista elinaluetta, sininen soveliaasta ja vihreä erittäin soveliaasta. Luokitukset menevät limittäin, eli erittäin soveliaat alueet sisältyvät myös luokkiin: sovelias ja mahdollinen.

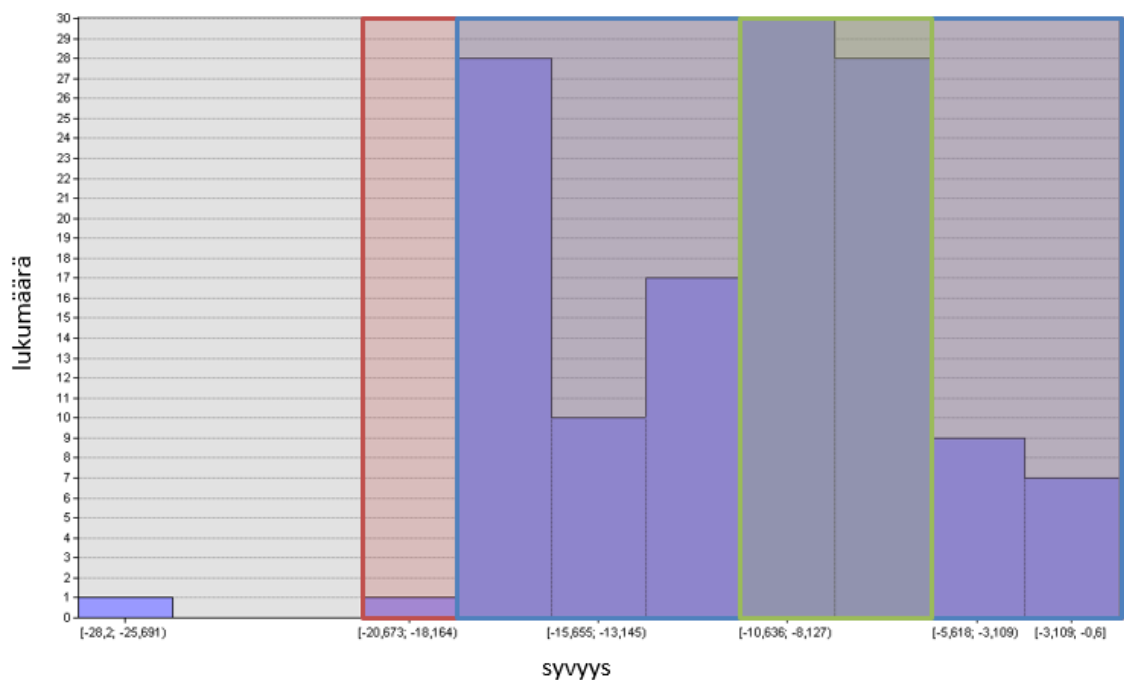


Kuva 43. Vesisammaleen valosyvyyden ympäristömuuttuja. Punainen alue esittää mahdollista elinaluetta, sininen soveliaasta ja vihreä erittäin soveliaasta. Luokitukset menevät limittäin, eli erittäin soveliaat alueet sisältyvät myös luokkiin: sovelias ja mahdollinen.

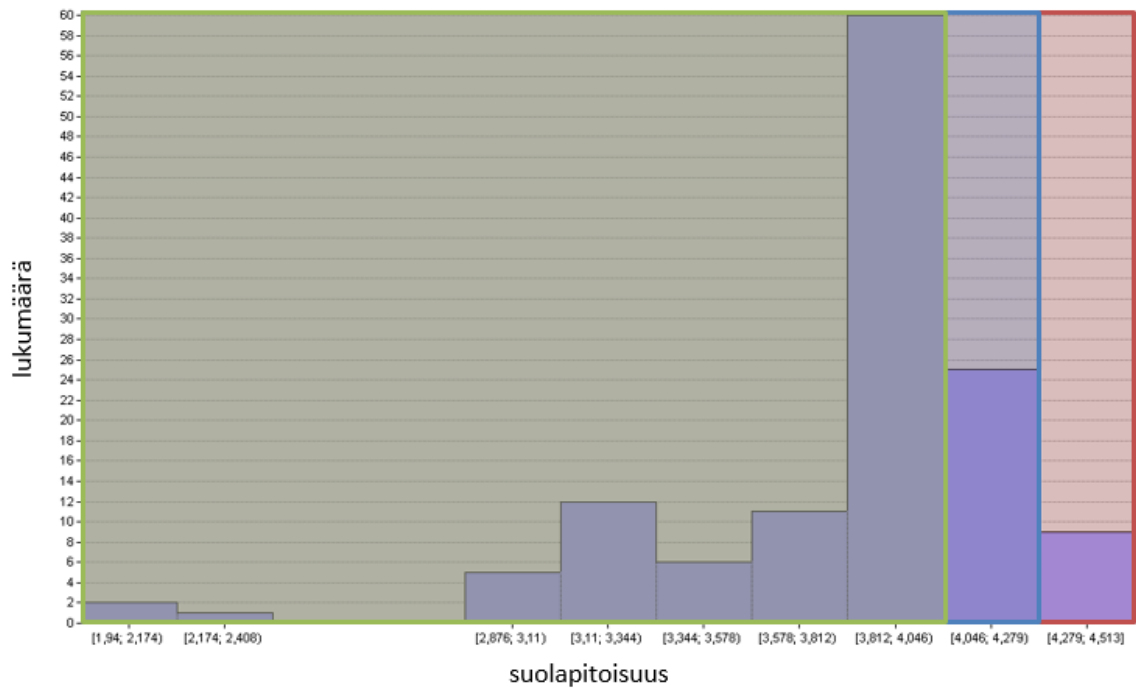


Kuva 44. Vesisammaleen näkösyvyyden ympäristömuuttuja. Punainen alue esittää mahdollista elinaluetta, sininen soveliasta ja vihreä erittäin soveliasta. Luokitukset menevät limittäin, eli erittäin soveliaat alueet sisältyvät myös luokkiin: sovelias ja mahdollinen.

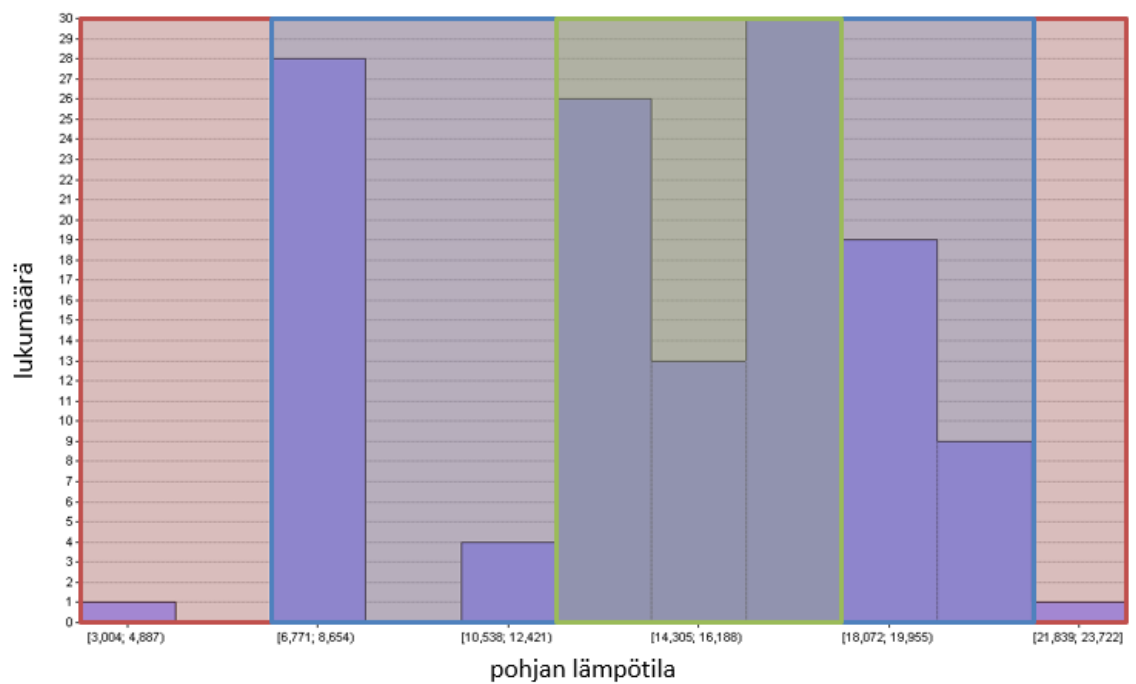
Liite 4: Murtovesisien ympäristömuuttujien histogrammit.



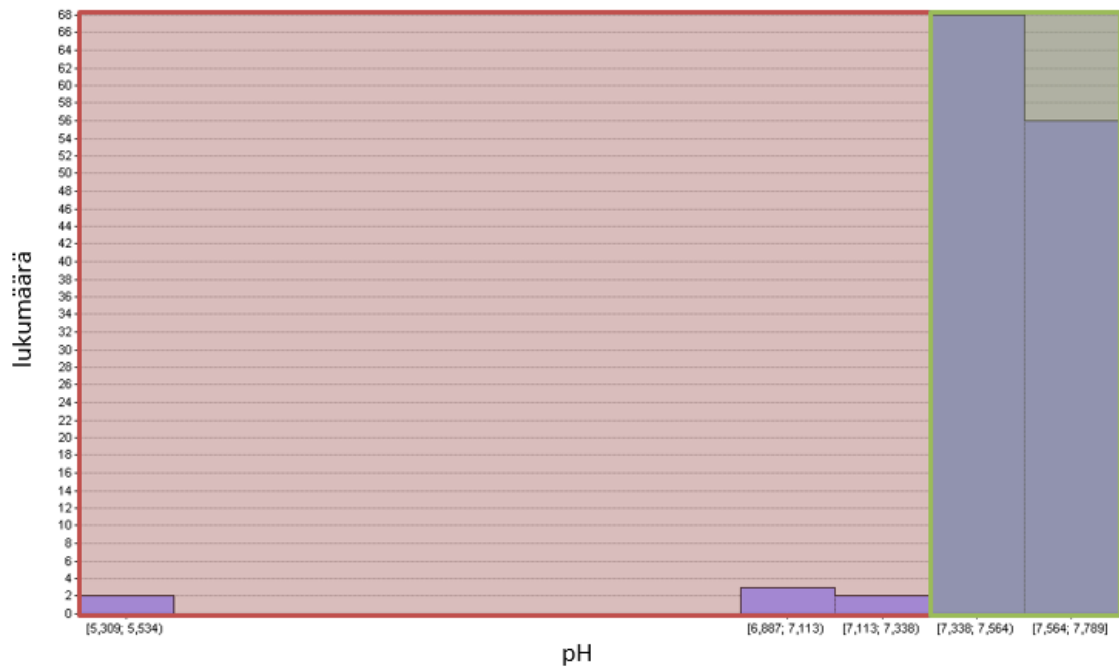
Kuva 45. Murtovesisien syvyyden ympäristömuuttuja. Punainen alue esittää mahdollista elinaluetta, sininen soveliasta ja vihreä erittäin soveliasta. Luokitukset menevät limittäin, eli erittäin soveliaat alueet sisältyvät myös luokkiin: sovelias ja mahdollinen.



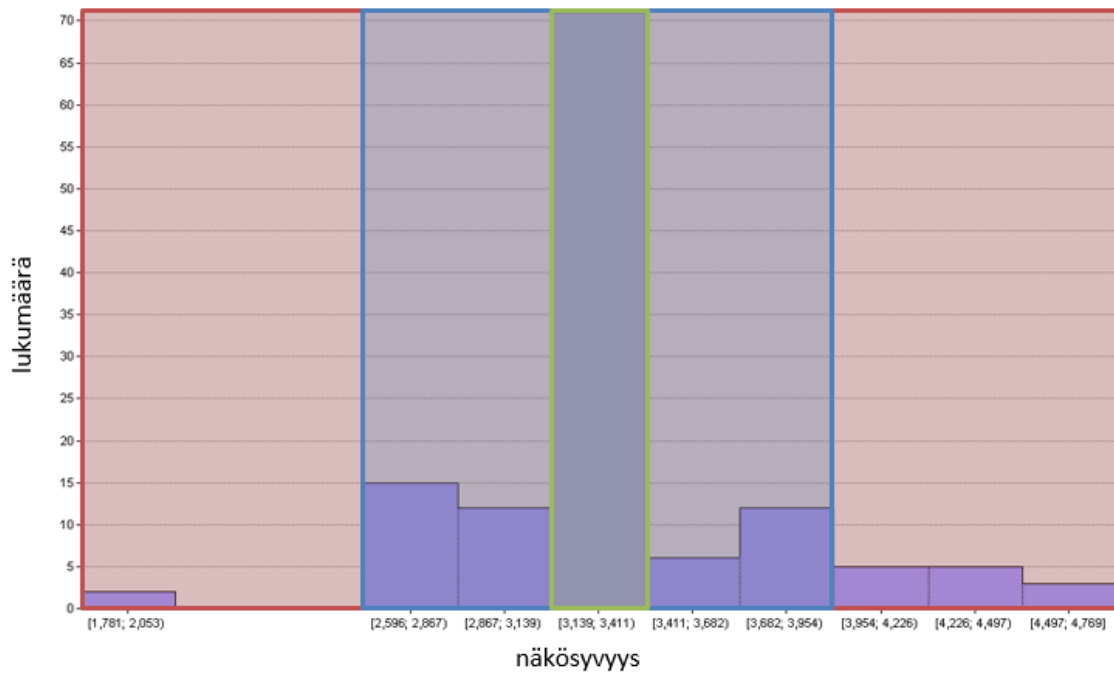
Kuva 46. Murtovesisienen suolapitoisuuden ympäristömuuttuja. Punainen alue esittää mahdollista elinaluetta, sininen sovelias ja vihreä erittäin sovelias. Luokitukset menevät limittäin, eli erittäin soveliaat alueet sisältävät myös luokkiin: sovelias ja mahdollinen.



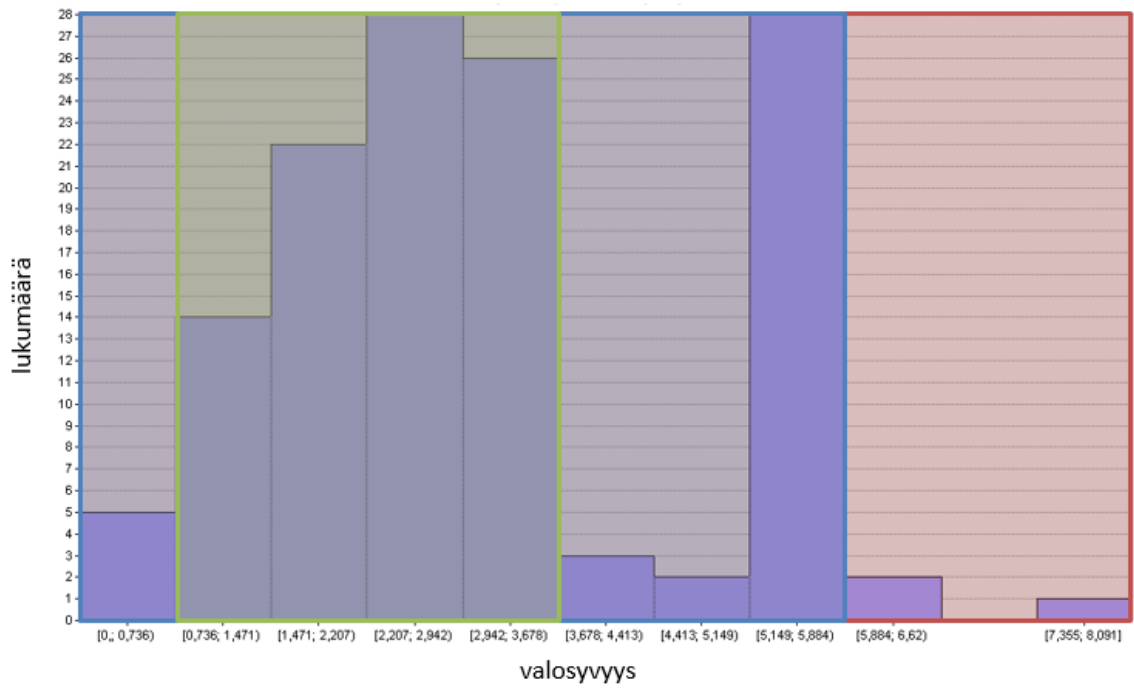
Kuva 47. Murtovesisienen pohjan lämpötilan ympäristömuuttuja. Punainen alue esittää mahdollista elinaluetta, sininen sovelias ja vihreä erittäin sovelias. Luokitukset menevät limittäin, eli erittäin soveliaat alueet sisältävät myös luokkiin: sovelias ja mahdollinen.



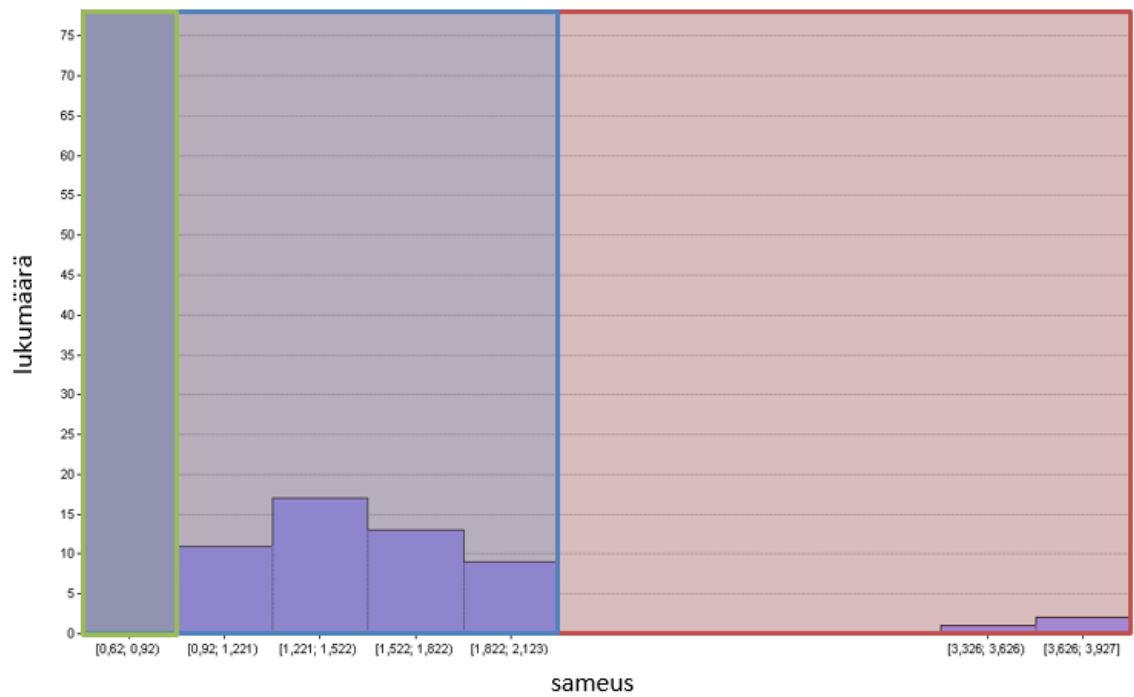
Kuva 48. Murtovesisiemen pH:n ympäristömuuttuja. Punainen alue esittää mahdollista elinaluetta, sininen soveliasta ja vihreä erittäin soveliasta. Luokitukset menevät limittäin, eli erittäin soveliaat alueet sisältyvät myös luokkiin: sovelias ja mahdollinen.



Kuva 49. Murtovesisiemen näkösyvyyden ympäristömuuttuja. Punainen alue esittää mahdollista elinaluetta, sininen soveliasta ja vihreä erittäin soveliasta. Luokitukset menevät limittäin, eli erittäin soveliaat alueet sisältyvät myös luokkiin: sovelias ja mahdollinen.

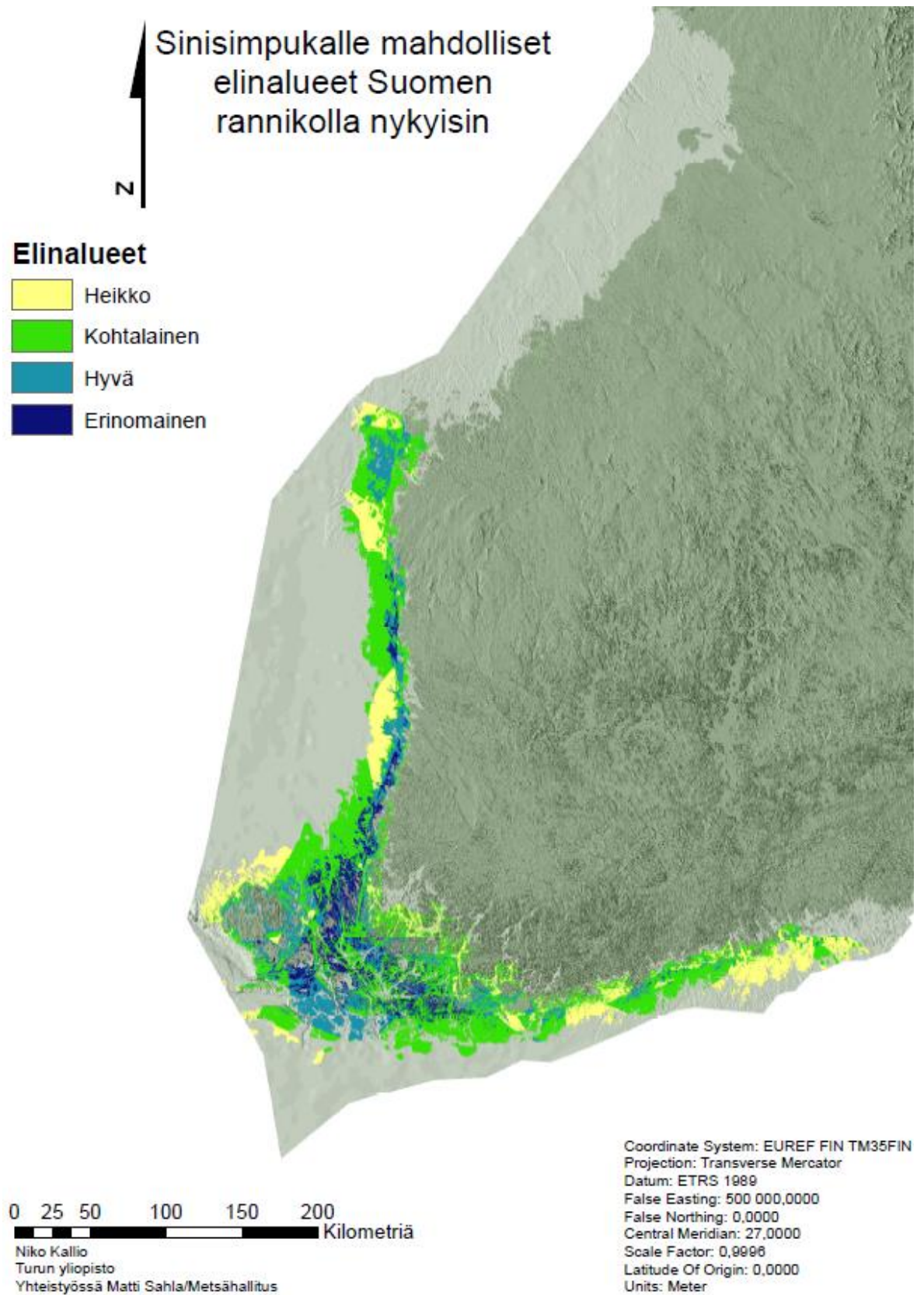


Kuva 50. Murtovesisien valosvyvyyden ympäristömuuttuja. Punainen alue esittää mahdollista elinaluetta, sininen soveliasta ja vihreä erittäin soveliasta. Luokitukset menevät limittäin, eli erittäin soveliaat alueet sisältyvät myös luokkiin: sovelias ja mahdollinen.

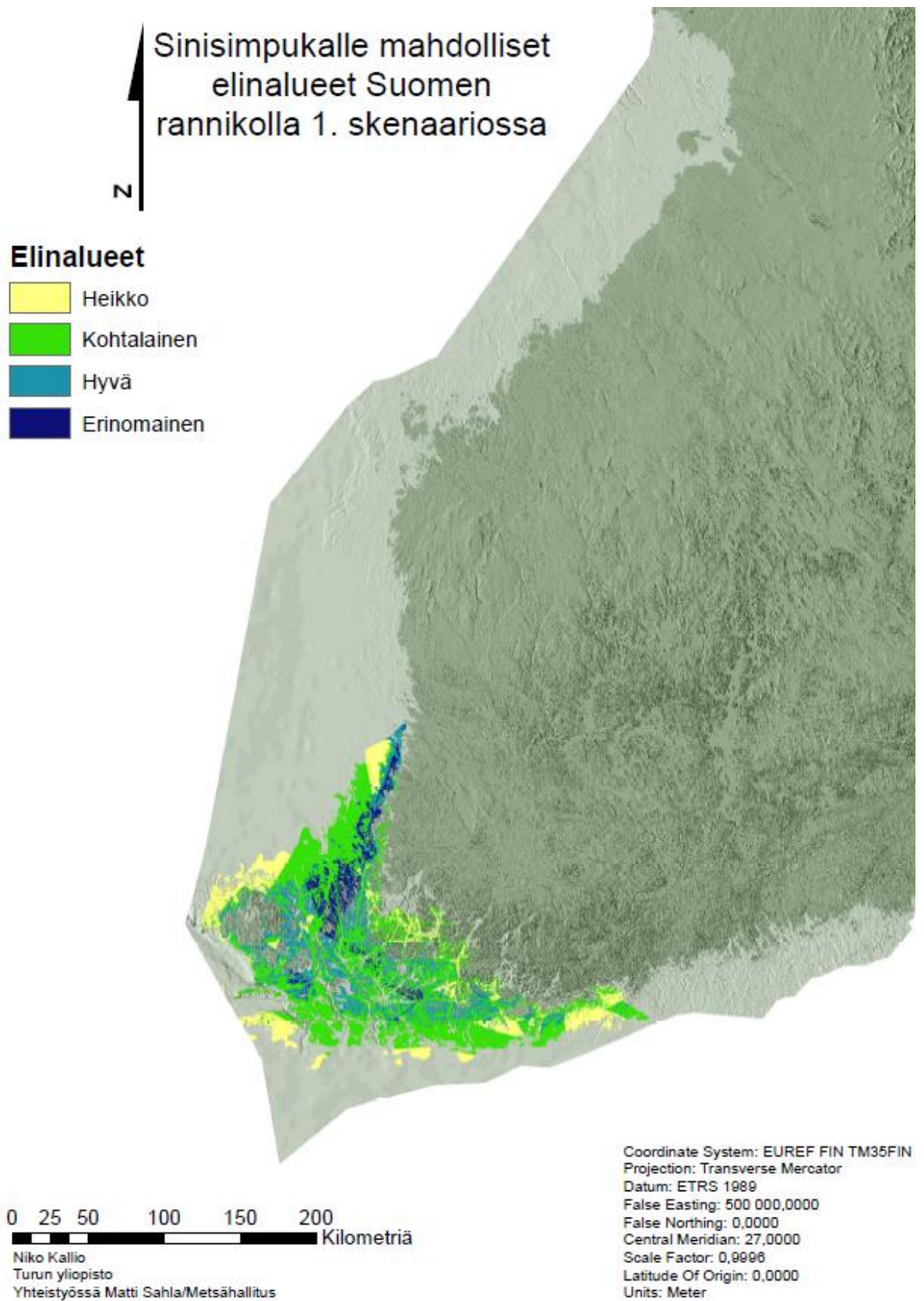


Kuva 51. Murtovesisien sameuden ympäristömuuttuja. Punainen alue esittää mahdollista elinaluetta, sininen soveliasta ja vihreä erittäin soveliasta. Luokitukset menevät limittäin, eli erittäin soveliaat alueet sisältyvät myös luokkiin: sovelias ja mahdollinen.

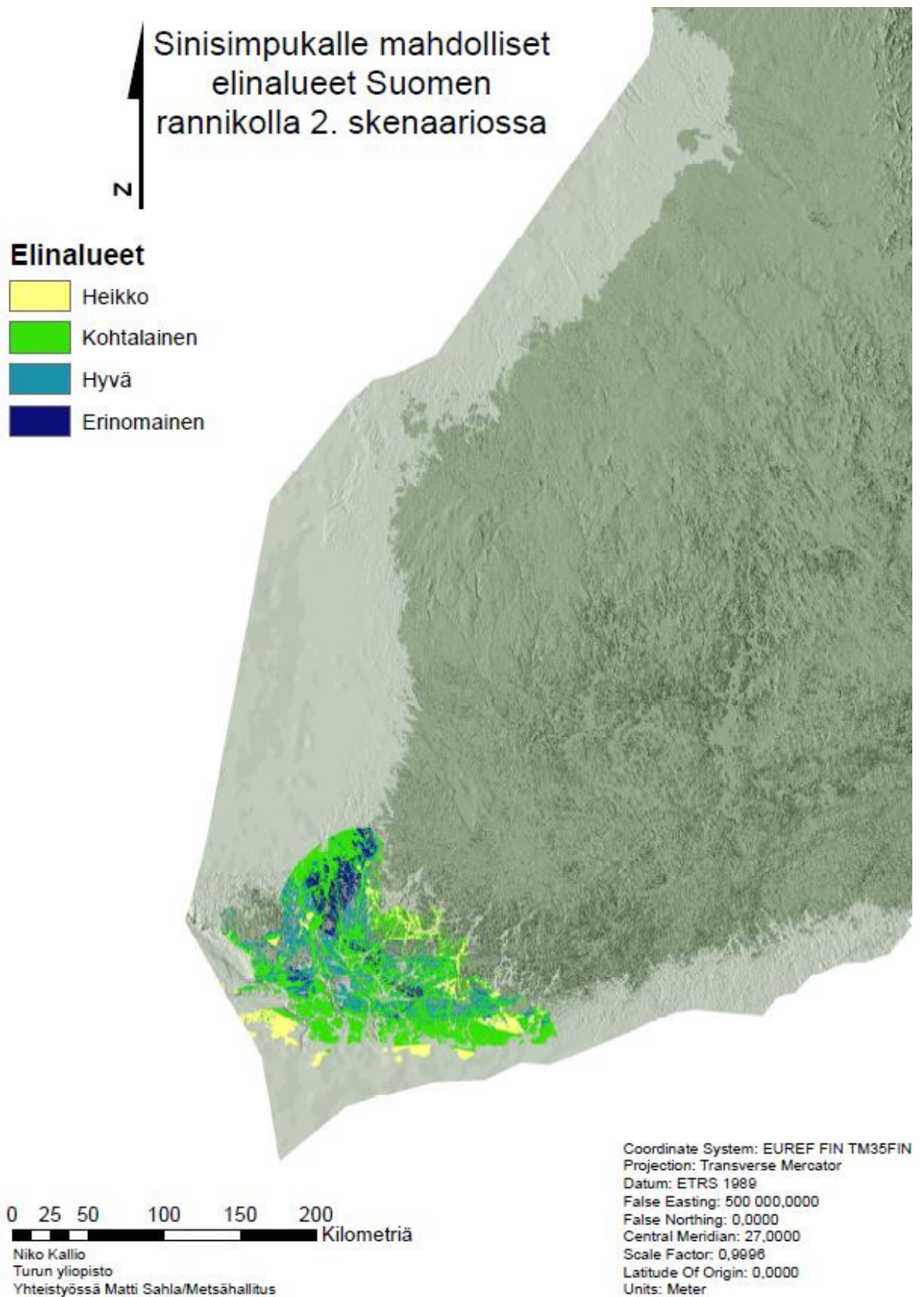
Liite 5: Sinisimpukan mahdolliset elinalueet Suomen rannikolla nykyisin ja 3 eri skenaariossa.



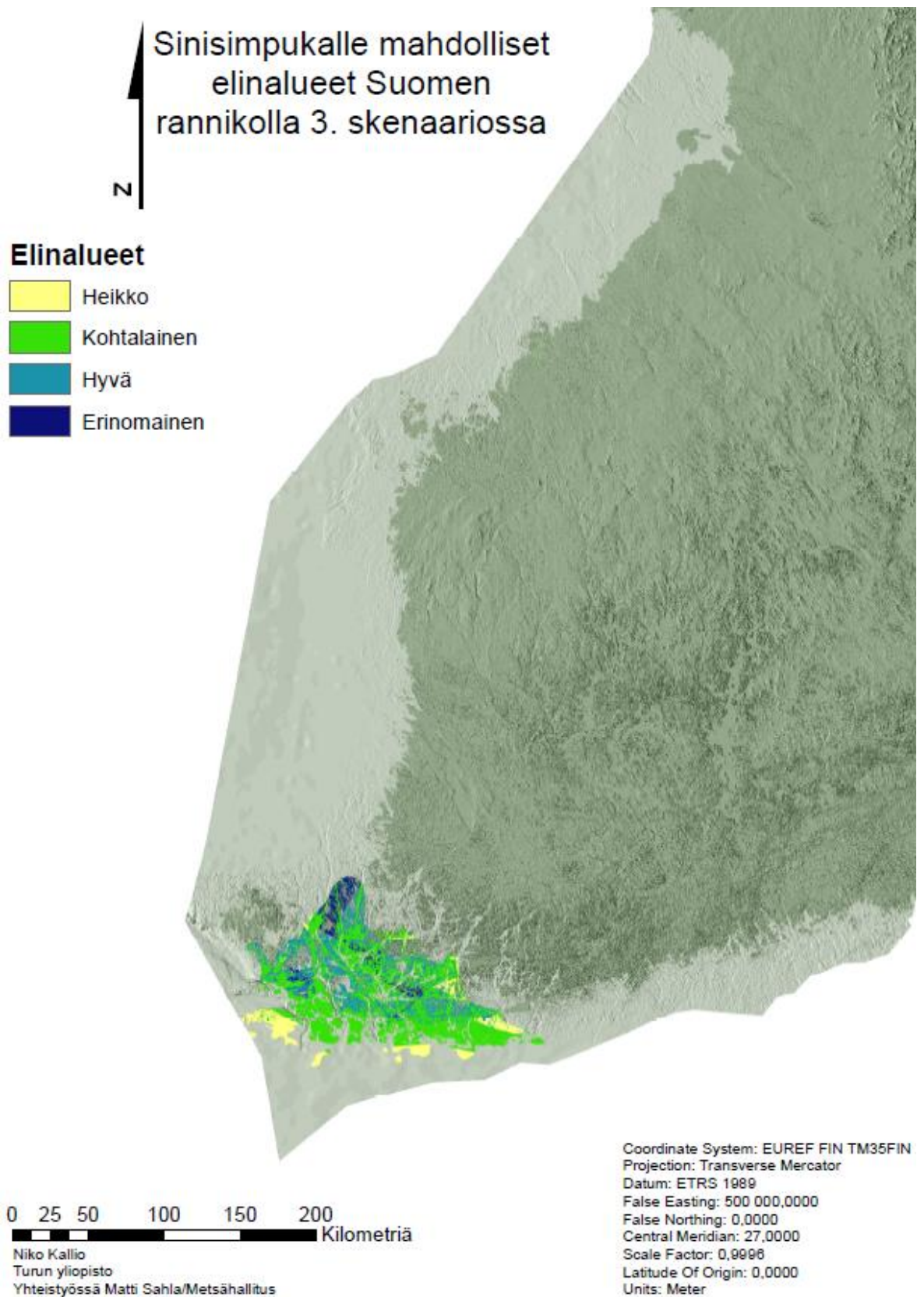
Kuva 52. Sinisimpukalle mahdolliset elinalueet Suomen rannikolla nykyisin.



Kuva 53. Sinisimpukalle mahdolliset elinalueet Suomen rannikolla 1. skenaariossa.

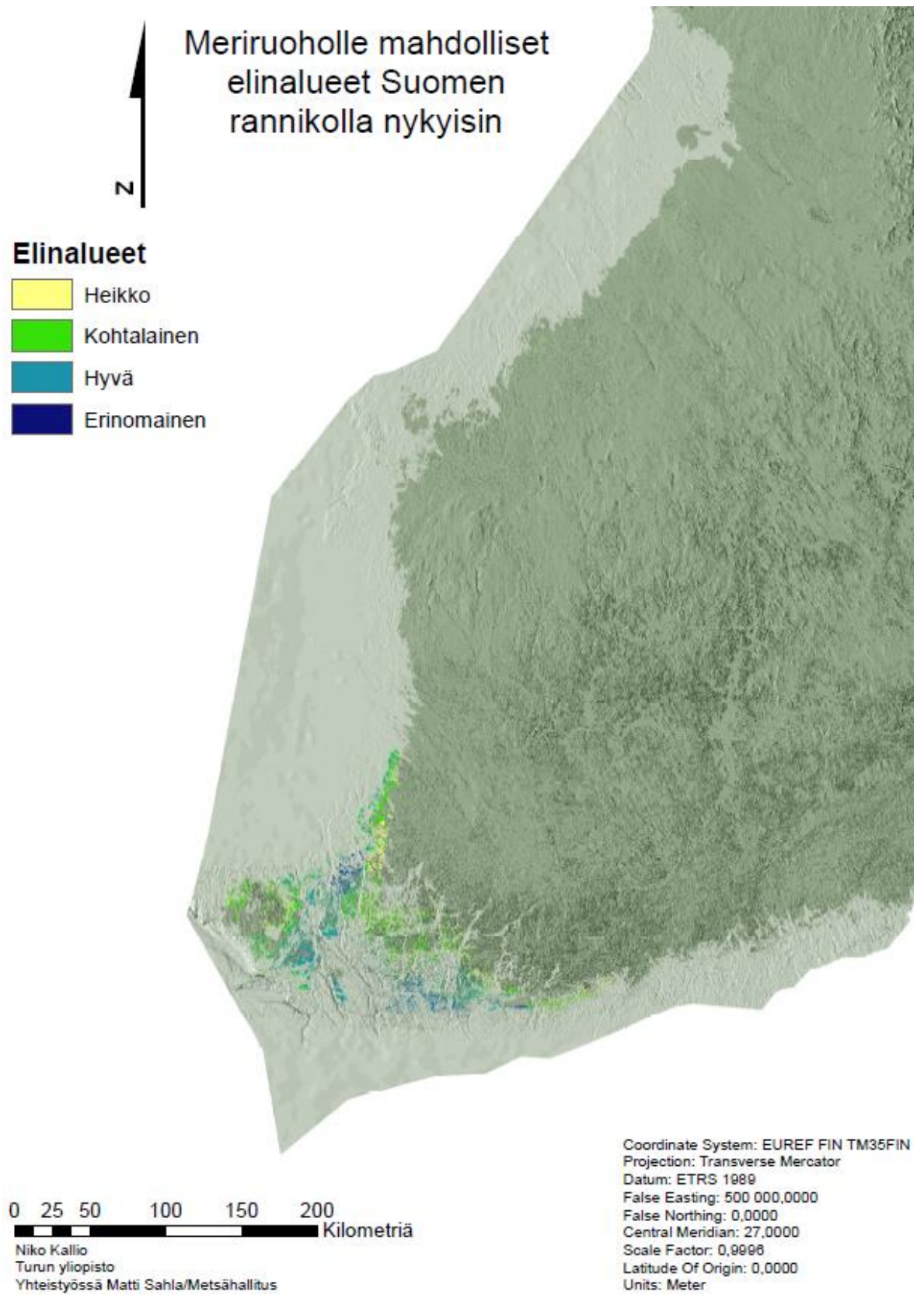


Kuva 54. Sinisimpukalle mahdolliset elinalueet Suomen rannikolla 2. skenaariossa.

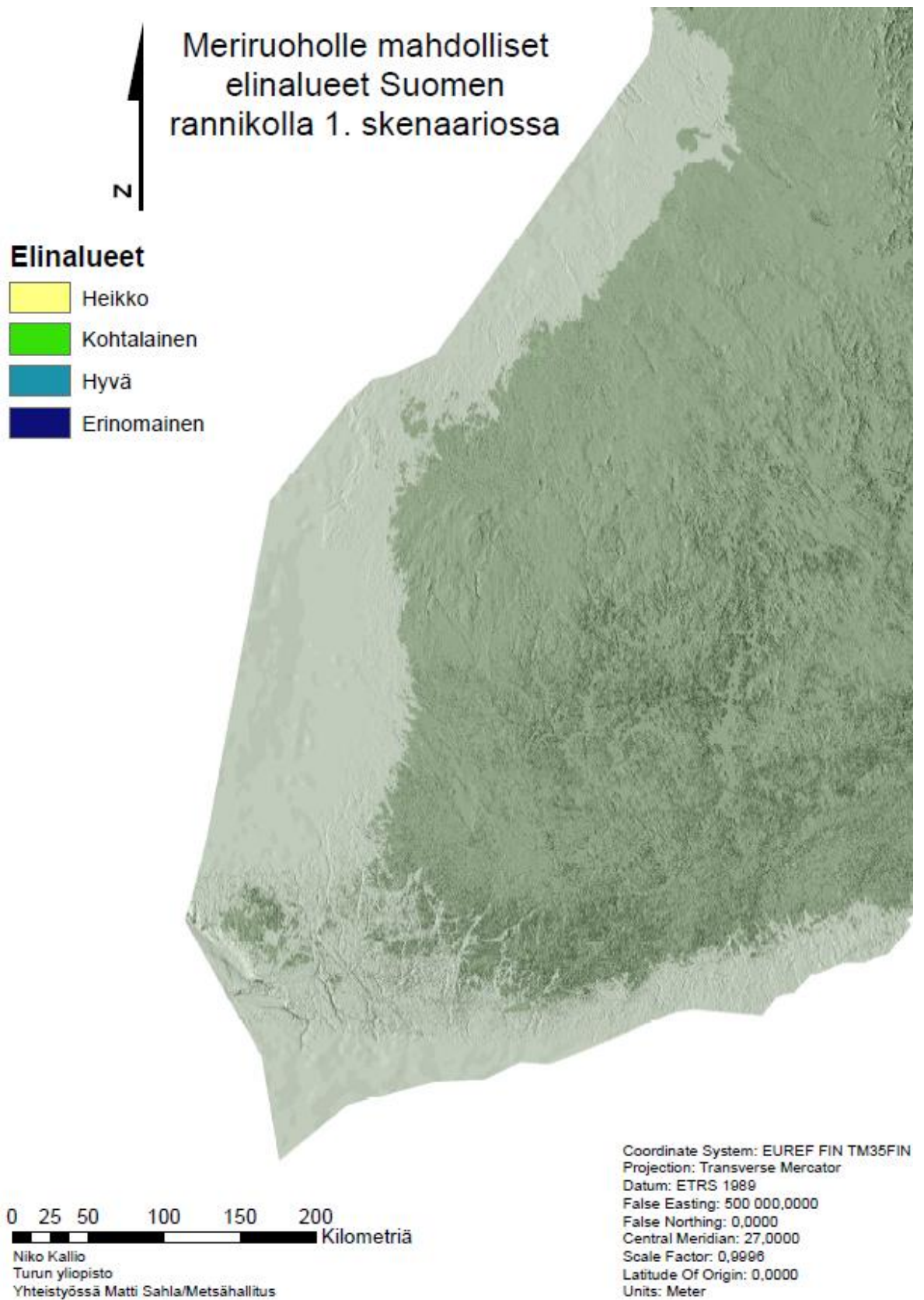


Kuva 55. Sinisimpukalle mahdolliset elinalueet Suomen rannikolla 3. skenaarissa.

Liite 6: Meriruohon mahdolliset elinalueet Suomen rannikolla nykyisin ja 3 eri skenaariossa.

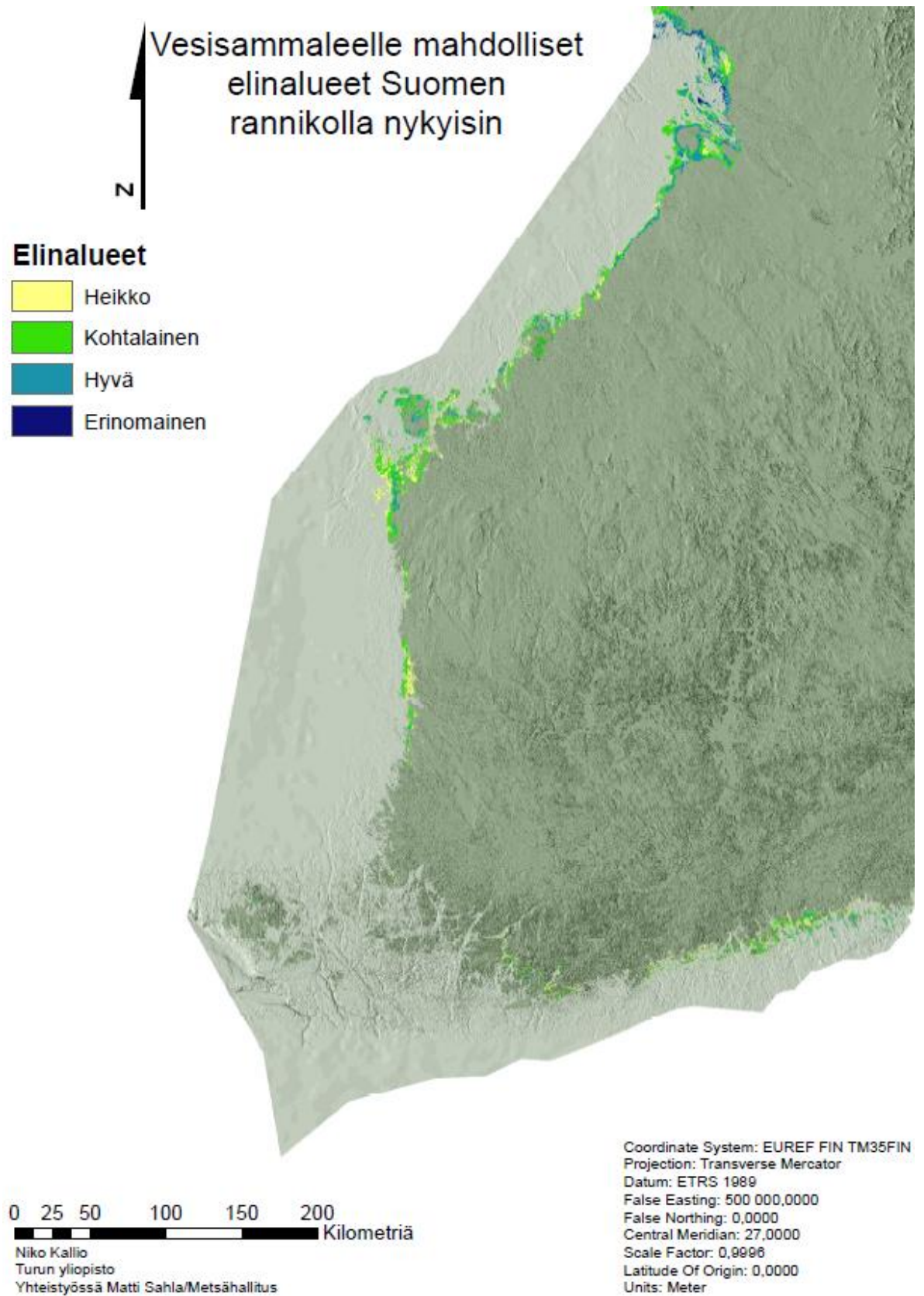


Kuva 56. Meriruoholle mahdolliset elinalueet Suomen rannikolla nykyisin.

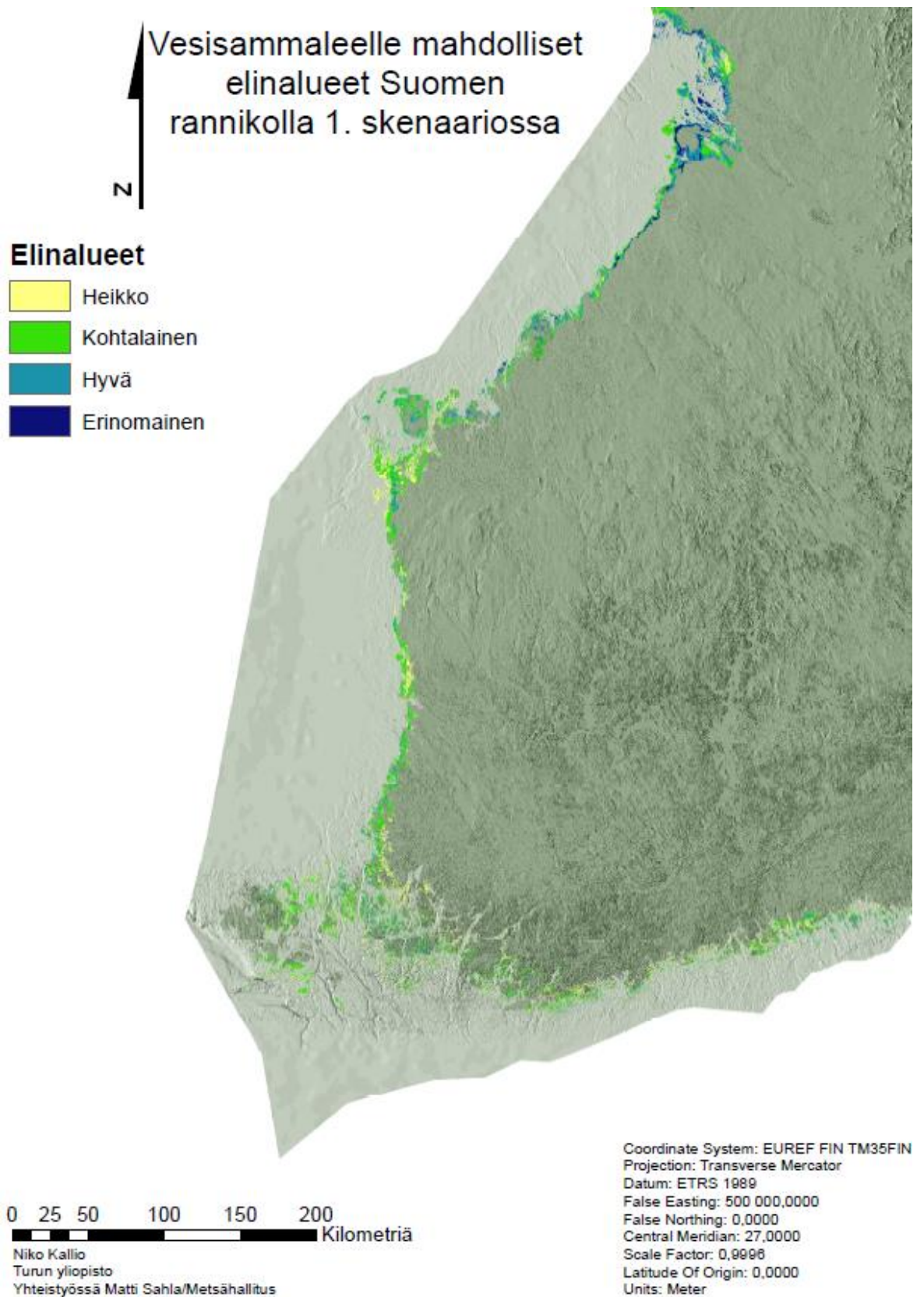


Kuva 57. Meriruoholle mahdolliset elinalueet Suomen rannikolla 1. skenaariossa.

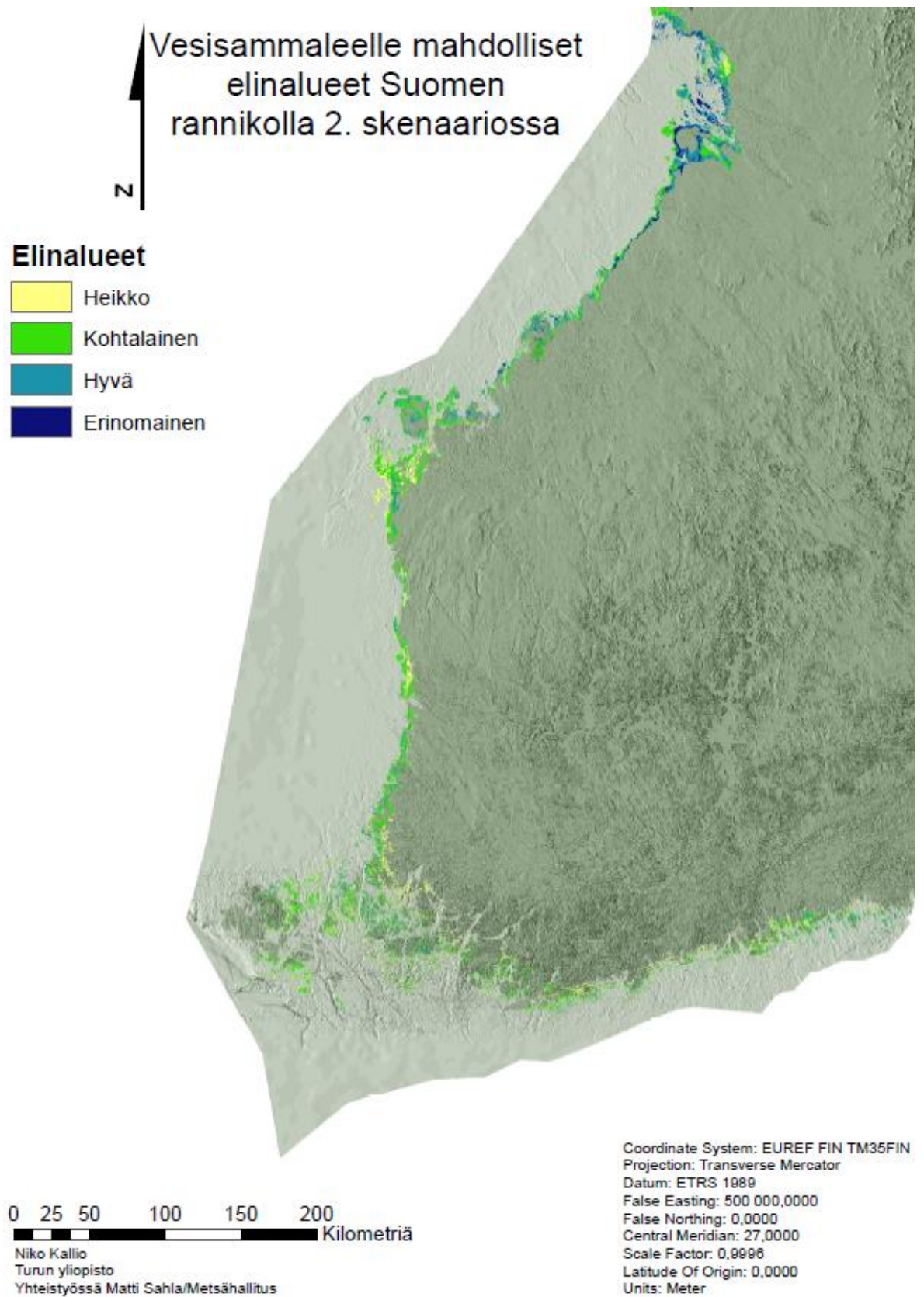
Liite 7: Vesisammaleelle mahdolliset elinalueet Suomen rannikolla nykyisin ja 3 eri skenaariossa.



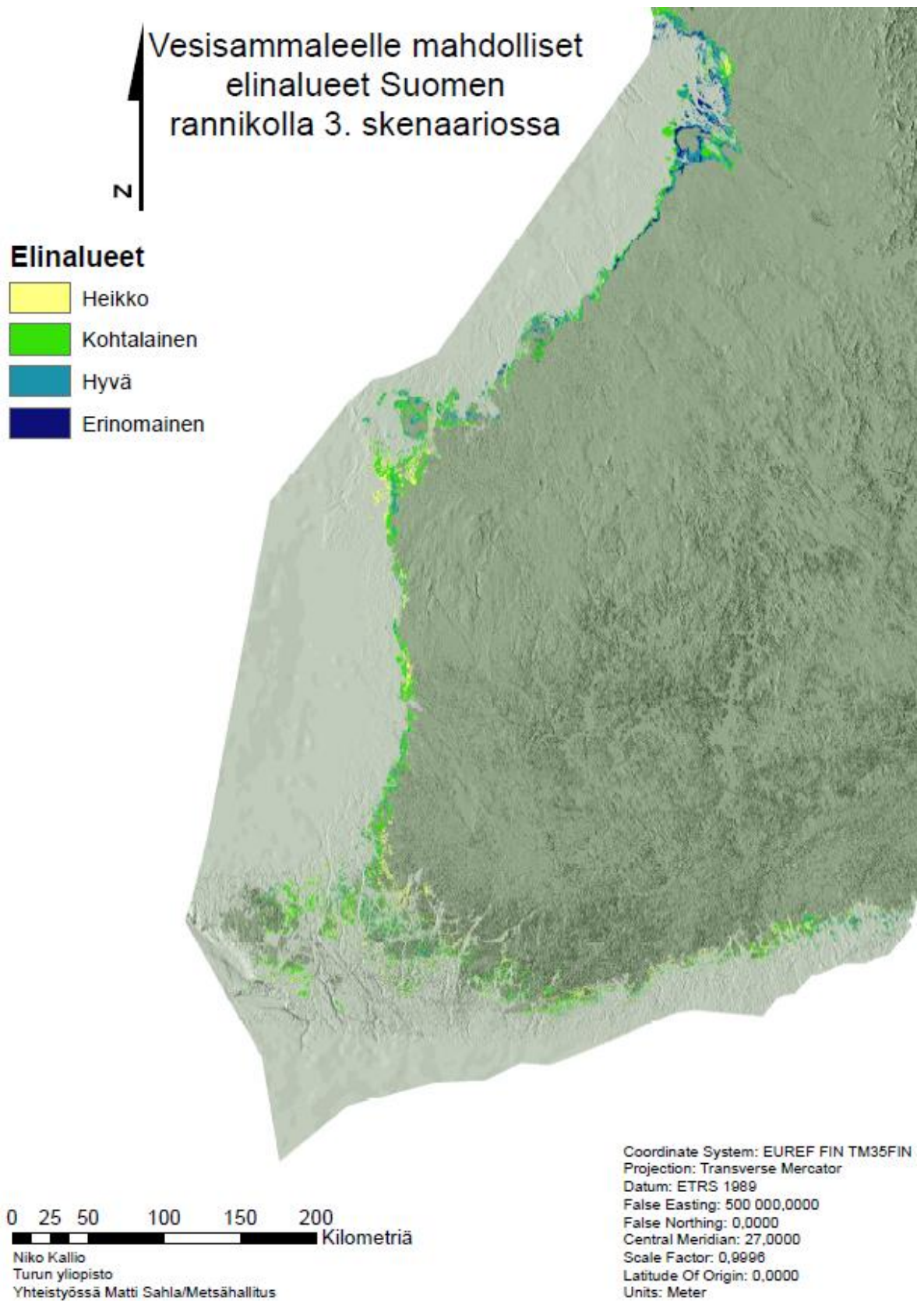
Kuva 58. Vesisammaleelle mahdolliset elinalueet Suomen rannikolla nykyisin.



Kuva 59. Vesisammaleelle mahdolliset elinalueet Suomen rannikolla 1. skenaariossa.

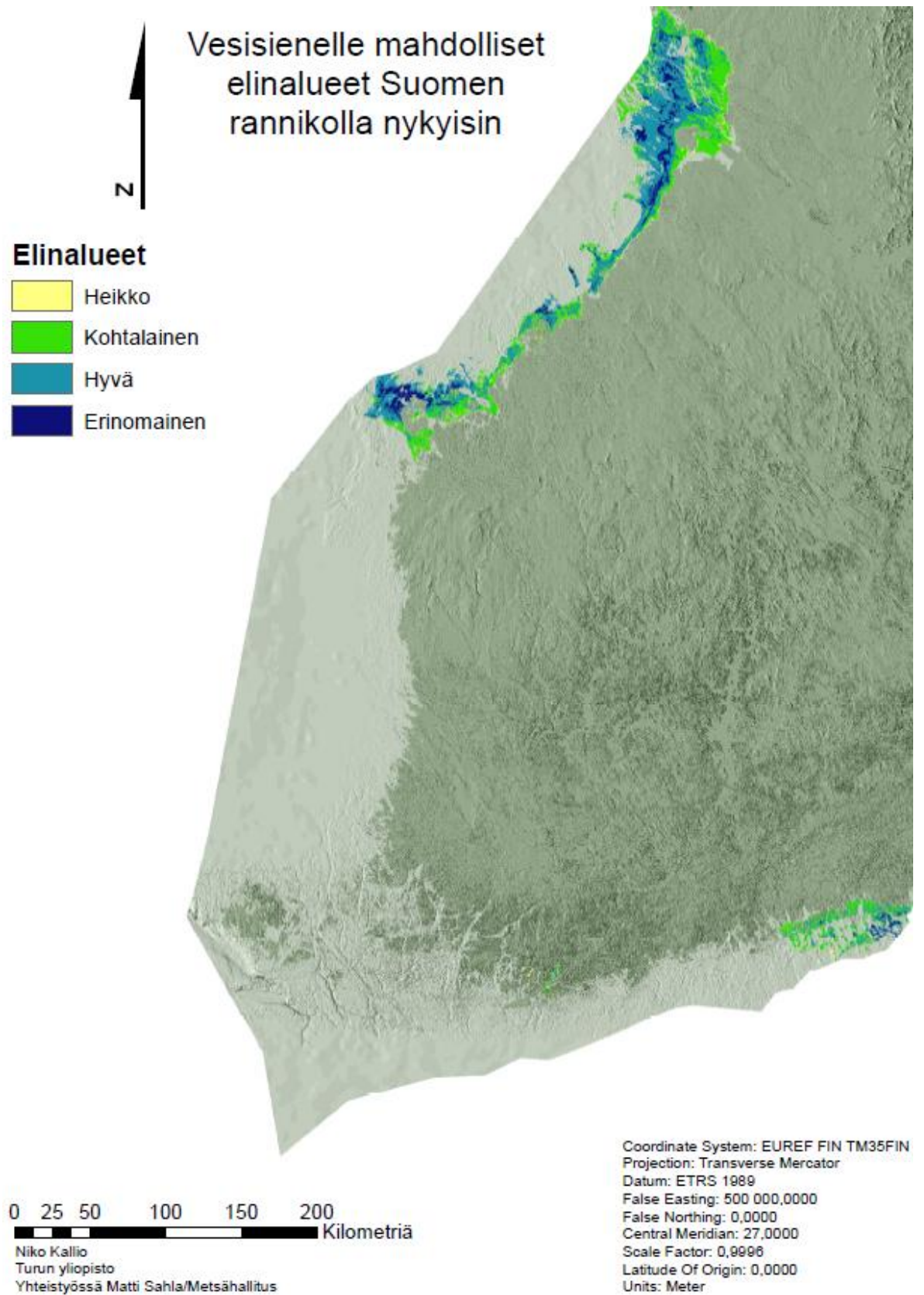


Kuva 60. Vesisammaleelle mahdolliset elinalueet Suomen rannikolla 2. skenaariossa.

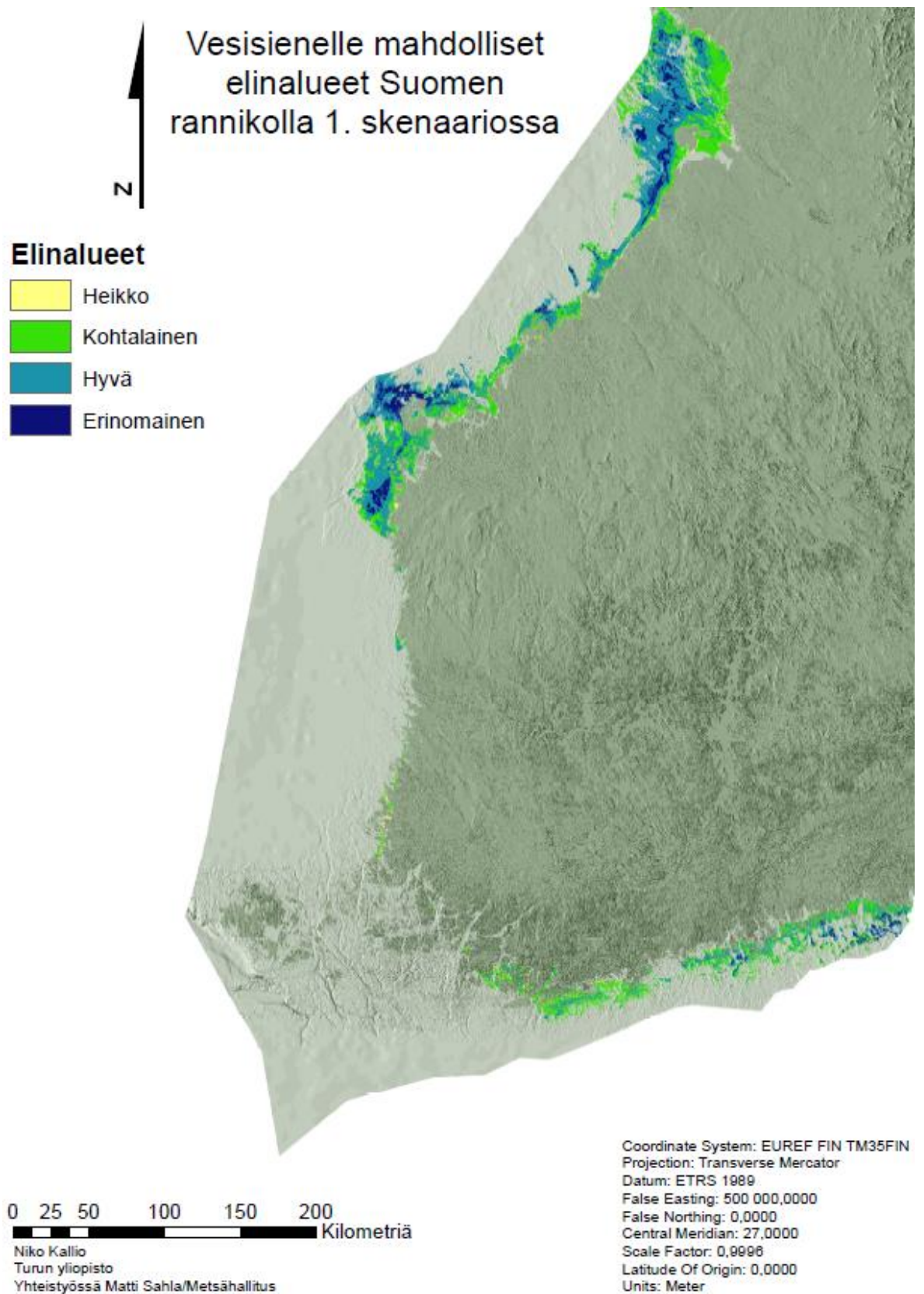


Kuva 61. Vesisammaleelle mahdolliset elinalueet Suomen rannikolla 3. skenaariossa.

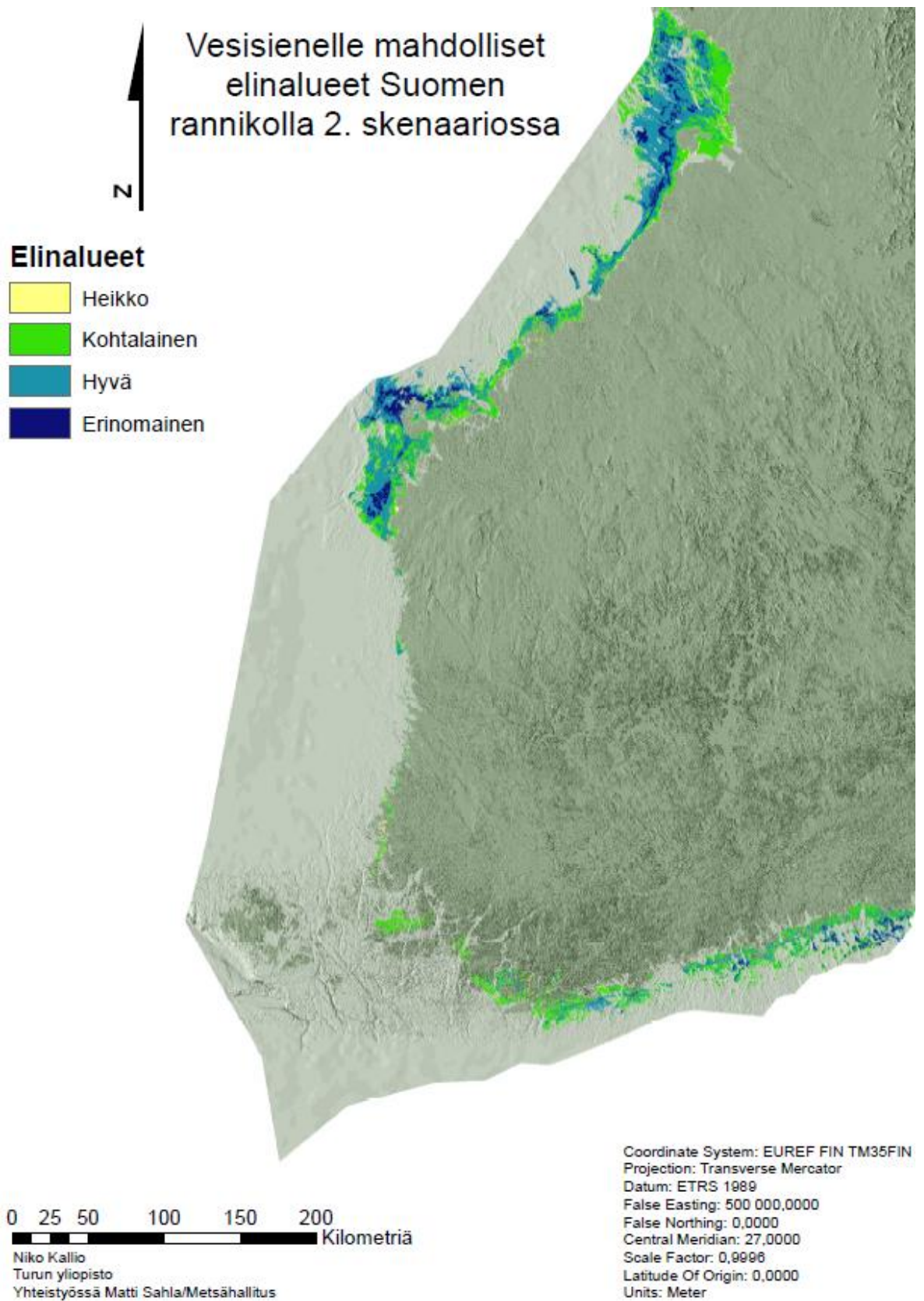
Liite 8: Murtovesisienelle mahdolliset elinalueet Suomen rannikolla nykyisin ja 3 eri skenaariossa.



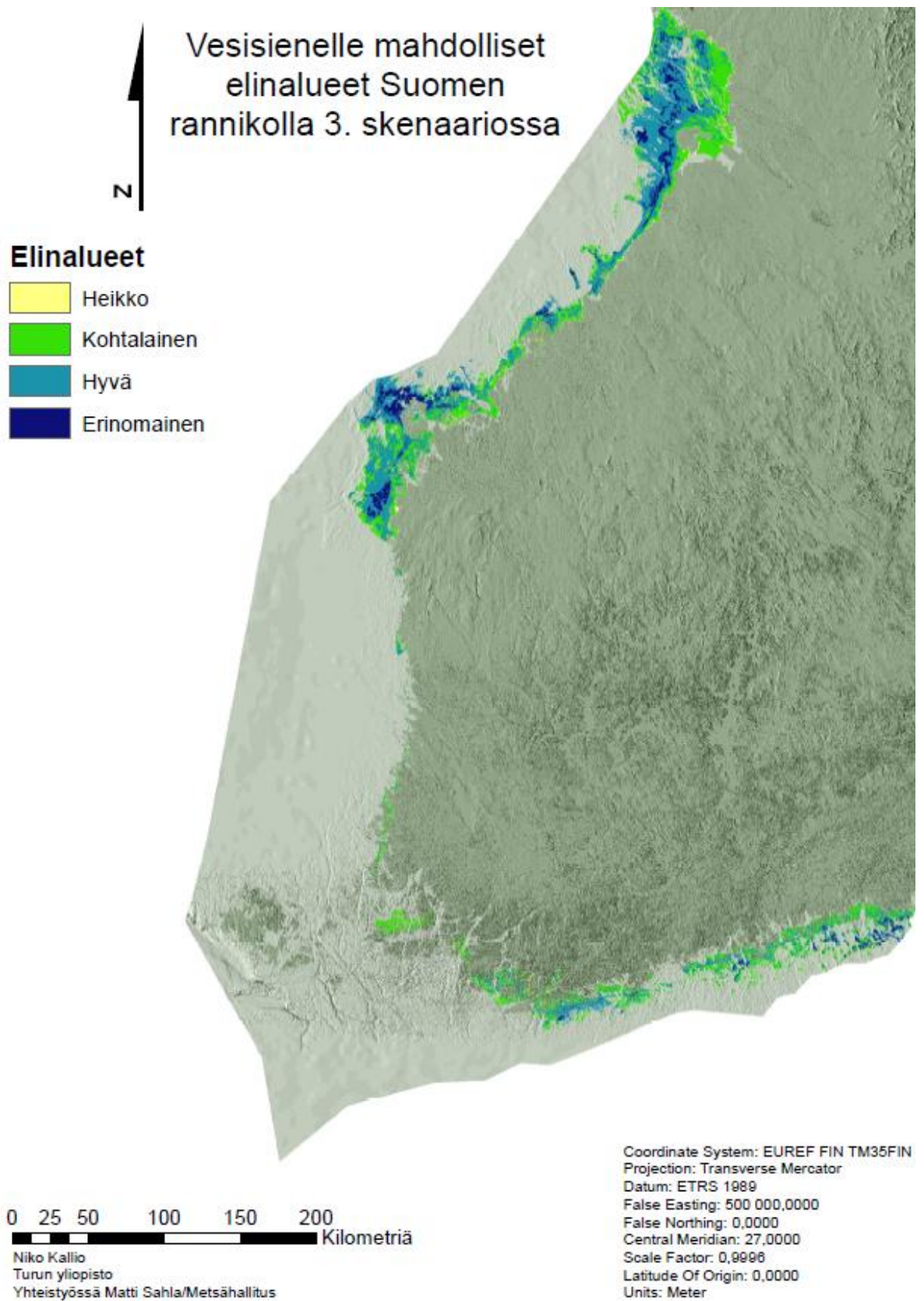
Kuva 62. Murtovesisienelle mahdolliset elinalueet Suomen rannikolla nykyisin.



Kuva 63. Murtovesisienelle mahdolliset elinalueet Suomen rannikolla 1. skenaariossa.



Kuva 64. Murtovesisienelle mahdolliset elinalueet Suomen rannikolla 2. skenaariossa.



Kuva 65. Murtovesisienelle mahdolliset elinalueet Suomen rannikolla 3. skenaariossa.