



EUROOPAN UNIONI

**Interreg**

Botnia-Atlantica

Euroopan aluekehitysrahasto

# Miltä Itämeri näyttää vuonna 2120?

## Ilmasto ja lajien levinneisyys Pohjanlahden keskiosissa

Tytti Turkia, Emma Anderssén, Essi Lakso, Anniina Saarinen, Johnny Berglund,  
Lotta Nygård, Anna Bonde, Anette Bäck



**ECONNECT**<sup>2120</sup>

Kirjoittajat: Tytti Turkia<sup>1</sup>, Emma Anderssén<sup>1</sup>, Essi Lakso<sup>1</sup>, Anniina Saarinen<sup>2</sup>, Johnny Berglund<sup>2</sup>, Lotta Nygård<sup>3</sup>, Anna Bonde<sup>4</sup>, Anette Bäck<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Metsähallitus, luontopalvelut

<sup>2</sup>Västerbottenin lääninhallitus

<sup>3</sup>Västernorrlandin lääninhallitus

<sup>4</sup>Etelä-Pohjanmaan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus

Merenpinnan muutokset hankealueella tulevaisuudessa: Jani Särkkä, Ilmatieteen laitos.

Käännös englannista: Lingsoft

Yhteystiedot:

Anette Bäck, Metsähallitus, anette.back@metsa.fi

Johnny Berglund, Västerbottenin lääninhallitus, johnny.berglund@lansstyrelsen.se

Kansikuva: Juuso Haapaniemi

Viittausohje: Turkia, T., Anderssén, E., Lakso, E., Saarinen, A., Berglund, J., Nygård, L., Bonde, A. & Bäck, A. 2022. Miltä Itämeri näyttää vuonna 2120: Ilmasto ja lajien levinneisyys Pohjanlahden keskiosissa. EConnect-hankkeen loppuraportti. Interreg Botnia-Atlantica ohjelman hanke.

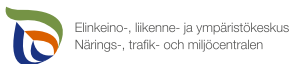
Asia MH 5039/2022

# Miltä Itämeri näyttää vuonna 2120?

Ilmasto ja lajien levinneisyys  
Pohjanlahden keskiosissa



Havs  
och Vatten  
myndigheten





# Esipuhe

Ilmastonmuutos on aikamme suurin ympäristökriisi. Ilmastonmuutoksen aiheuttamia muutoksia tapahtuu jo nyt ja sen vaikutuksia havaitaan kaikkialla maailmassa niin vesistöissä kuin maalla, ja tämänhetkinen toiminta määrää tulevaisuuden suunnan. On odotettavissa, että ilmastonmuutoksen vaikutukset, kuten lämpötilojen nousu, ovat voimakkaampia Pohjanlahdella kuin missään muualla Itämeren alueella. EConnect-hankkeessa tutkittiin, millaiselta meri näyttää Pohjanlahden keskiosissa vuonna 2120. Tämä tehtiin analysoimalla Pohjanlahden keskiosien tämänhetkisiä ja tulevia ympäristöolosuhteita, lajien levinneisyyttä, ekosysteemipalveluita ja elinympäristöjen kytkeytymistä toisiinsa. Hankkeen tulokset viittaavat siihen, että ilmastonmuutos tekee merestä lämpimämmän, ohentaa sen jääpeitettä ja alentaa jonkin verran meren suolapitoisuutta. Eri lajit reagoivat eri tavoin näihin muutoksiin ympäristövaatimuksistaan riippuen. Meren alhaisempi suolapitoisuus vaikuttaa merilajeihin, kuten sinisimpukoihin, jotka jo nyt elävät alueella sietokykyä ääriarajoilla alhaisen suolapitoisuuden suhteen, kun taas ohuempi jääpeite hyödyttää esimerkiksi monivuotisia leviä. Lajien levinneisyyden muutoksista seuraa monin paikoin myös muutoksia ekosysteemipalveluissa. Joillakin alueilla ekosysteemipalvelut voivat lisääntyä ja toisilla puolestaan vähentyä. Ekosysteemipalveluissa ei kuitenkaan odoteta tapahtuvan dramaattisia muutoksia. Merenkurkku on eri lajeille tärkeä reitti, jonka kautta ne pääsevät leviämään Ruotsin ja Suomen välillä. Merisuojealueet ovat merieliöiden suojapaikkoja. Mitä paremmin suojelalueet on sijoitettu, sitä paremman elinympäristöverkoston ne luovat eri lajeille, mikä puolestaan parantaa lajien mahdollisuuksia selviytyä tulevaisuudessa.

Hankkeessa laadittiin kolme raporttia, joissa esiteltiin kunkin työkokonaisuuden tuloksia, ja lisäksi yhteenvetoraportti, johon koottiin kunkin raportin keskeiset tulokset. Nämä kaikki löytyvät hankkeen kotisivuilta osoitteesta [econnect2120.com](http://econnect2120.com). Tässä raportissa esitellään meriympäristön tämänhetkistä tilaa ja pohditaan mahdollisia tulevia muutoksia ympäristöoloissa ja lajien esiintymisessä. Kahdessa muussa raportissa keskitytään tunnistamaan alueen nykyiset ekosysteemipalvelut ja tarkastellaan niiden mahdollisia muutoksia tulevaisuudessa sekä arvioidaan olemassa olevaa ja tulevaa suojelualueverkostoa ekologisen kytkeytyneisyyden näkökulmasta.

Rajat ylittävän Interreg Botnia-Atlantica -yhteistyöohjelman kautta rahoitettu hanke alkoi kesäkuussa 2018 ja päättyi toukokuussa 2022. Hanke oli jatkoa Suomen ja Ruotsin pitkäaikaiselle rajat ylittävälle yhteistyölle Merenkurkun alueella, ja sen tavoitteena oli vahvistaa yhteisen merialueen hoitoa. Hankekumppaneina olivat Metsähallitus, Etelä-Pohjanmaan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus sekä Västerbottenin lääninhallitus ja Västernorrlandin lääninhallitus. Hankealue rajoittui Pohjanmaalle ja Keski-Pohjanmaalle Suomessa sekä Västerbottenin ja Västernorrlandin lääneihin Ruotsissa.

EConnect-hankkeen toimijat haluavat kiittää Interreg Botnia-Atlanticaa, Pohjanmaan liittoa, Havs- och vattenmyndigheten -viranomaista sekä hankkeeseen osallistuneita organisaatioita sen mahdollistamisesta. Haluamme myös kiittää ilmastomallit tuottaneita Ruotsin ilmatieteen ja hydrologian laitosta (Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut, SMHI) ja Ilmatieteen laitosta ja kaikkia muita hankkeessa auttaneita tahoja.

# Sisällys

<b>Esipuhe</b> .....	<b>5</b>
<b>Lyhenteet ja kirjainlyhenteet</b> .....	<b>7</b>
<b>1. Johdanto</b> .....	<b>8</b>
1.1. Itämeri .....	8
1.2. Hankkeen taustaa.....	8
1.3. Hankealue .....	9
1.4. Ilmastonmuutoksen vaikutukset tulevaisuudessa .....	10
<b>2. Merenpinnan muutokset hankealueella tulevaisuudessa</b> .....	<b>12</b>
<b>3. Tulevaisuuden skenaariot</b> .....	<b>14</b>
3.1. Hankkeessa käytetyt skenaariot .....	14
<b>4. Aineisto ja menetelmät</b> .....	<b>17</b>
4.1. Ilmastomallit .....	17
4.2. Lajiaineisto .....	17
4.3. Mallinnus .....	26
<b>5. Tulokset</b> .....	<b>28</b>
5.1. Muutokset ympäristömuuttujissa .....	28
5.2. Lajien levinneisyyden muutokset .....	30
5.2.1. Haurut .....	31
5.2.2. Haarukkalevä .....	32
5.2.3. Yksivuotiset rihmalevät .....	33
5.2.4. Vesisammalet .....	34
5.2.5. Näkinpartaiset .....	34
5.2.6. Vidat .....	36
5.2.7. Järviruoko.....	37
5.2.8. Sinisimpukka.....	38
5.2.9. Liejusimpukka.....	39
5.2.10. Valkokatka.....	39
5.2.11. Surviaissääskien toukat.....	41
5.2.12. Liejuputkimadot .....	42
<b>6. Pohdinta</b> .....	<b>43</b>
6.1. Virhelähteet ja epävarmuustekijät .....	44
<b>7. Johtopäätökset</b> .....	<b>47</b>
<b>Liitteet</b> .....	<b>49</b>
<b>Lähteet</b> .....	<b>51</b>

# Lyhenteet

BALTEX	Itämeren ja sen valuma-alueen hydrometeorologinen tutkimusohjelma (The Baltic Sea Experiment)
BSAP	Itämeren suojelun toimintaohjelma (Baltic Sea Action Plan)
EMMA	Suomen ekologisesti merkittävät vedenalaiset meriluontoalueet, EMMA-alueet
FMI	Ilmatieteen laitos (Finnish Meteorological Institute)
GHG	Kasvihuonekaasu (Greenhouse gas)
MAI	Ravinnekuormituksen enimmäismäärä, joka kertoo vedessä olevien ravinteiden ja ilmassa olevien typen ja fosforin enimmäistasot Itämeren vesistöalueille, jotta Itämeren hyvä ekologinen tila on mahdollista saavuttaa (BSAP:n mukaisesti) (Maximum allowable input)
MPA	Merisuojealue (Marine protected area)
SMHI	Ruotsin ilmatieteen ja hydrologian laitos (Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut)

# 1. Johdanto

## 1.1. Itämeri

Itämeri on matala meri ja sen vesi on murtovetttä (Leppäranta & Myrberg 2009). Itämerta ympäröi yhdeksän valtiota, joiden valuma-alueella asuu noin 85 miljoonaa ihmistä. Valuma-alue on noin neljä kertaa Itämeren vesialuetta suurempi, mikä aiheuttaa suurta painetta meren biodiversiteetille ja sen ekosysteemien toiminnoille (HELCOM 2017). Itämereen vaikuttavia ihmisen toiminnasta aiheutuvia ympäristöongelmia ovat muun muassa rehevöityminen, saastuminen, meriliikenne, vieraslajien leviäminen, kalastus ja metsästys, habitaattien häviäminen ja häiriintyminen, ilmastonmuutos ja meren roskaantuminen (Leppäranta & Myrberg 2009; HELCOM 2017).

Murtovedestä johtuen Itämeren lajien monimuotoisuus on vähäistä verrattuna valtameriin tai makeanveden ympäristöihin (Kautsky & Kautsky 2000; HELCOM 2009). Siitä huolimatta biodiversiteetti on suurempi kuin mitä murtovesisysteemissä voitaisiin odottaa habitaattityyppien suuresta vaihtelusta ja suolaisuusgradientista johtuen (HELCOM 2018a). Lisäksi Itämeren on arvioitu olevan erittäin tuottava ekosysteemi, joka tarjoaa erilaisia ekosysteemipalveluita. Näitä ovat muun muassa kalakannat, ilmaston säätely, ravinteiden kierrätys ja virkistysmahdollisuudet (HELCOM 2009).

Merilajit, kuten haurut (*Fucus* spp.) ja sinisimpukka (*Mytilus trossulus x edulis*), ovat esimerkkejä lajeista, jotka toimivat avainlajeina lähes koko Itämeren alueella, sillä ne muodostavat habitaatteja (HELCOM 2009) ja toimivat ravinnonlähteinä monille muille lajeille (Waldeck & Larsson 2013; Wikström & Kautsky 2007). Alueilla, joilla muutamalla avainlajilla on suuri vaikutus ekosysteemiin (HELCOM 2009) tai joilla lajien monimuotoisuus on alhainen (Peterson ym. 1998), kuten Itämerellä, on matala resilienssi stressitekijöitä vastaan (HELCOM 2009). Yksi stressitekijä, jolla voi olla suuri vaikutus Itämereen, on ilmastonmuutos.

## 1.2. Hankkeen taustaa

EConnect-hankkeen tavoitteena oli tutkia ilmastonmuutoksen mahdollisia vaikutuksia vesiympäristöön Pohjanlahden keskiosissa sadan vuoden päästä. Hankealue (Kuva 1) on erityisen kiinnostava ilmastonmuutoksen kannalta, sillä jotkin Merenkurkun alueen merilajit elävät jo nyt sietokykynsä rajoilla veden suolapitoisuuden suhteen. Hankealueen alhainen suolapitoisuus ei ole optimaalinen alueella eläville merilajeille eikä myöskään makeanveden lajeille (Kautsky & Kautsky 2000). Ilmastonmuutoksen seurauksena tapahtuvalla suolapitoisuuden mahdollisella alenemisella voi olla merkittäviä vaikutuksia alueen lajien levinneisyyteen. Myös lämpötila vaikuttaa suuresti ympäristöön ja ekosysteemeihin vuodenaikojen vaihtelun ja jääpeitteen keston kautta. Hankkeen tarkoituksena oli tuottaa tietoa, joka voisi auttaa merialuesuunnittelijoita ja muita viranomaisia ilmastonmuutoksen vaikutuksiin sopeutumisessa. Lisäksi tavoitteena oli saattaa nämä tiedot julkisesti saataville. Hankkeen tavoitteet saavutettiin tuottamalla malleja alueella elävien vedenalaisten lajien ja lajiryhmien mahdollisesta levinneisyydestä tulevaisuudessa sekä karttoja ympäristöolojen, kuten lämpötilan, veden suolapitoisuuden ja meren jääpeitteen keston, mahdollisista muutoksista. Mallit perustuivat Ruotsin ilmatieteen ja hydrologian laitoksen (SMHI) ja Ilmatieteen laitoksen laatimiin tulevaisuuden ilmastomalleihin. Tämän lisäksi hankkeessa tutkittiin biotooppien, avainlajien ja merisuojealueiden (marine protected areas, MPAs) ekologista kytkeytyneisyyttä tulevaisuudessa sekä ilmastonmuutoksen vaikutuksia tärkeisiin meren tarjoihin ekosysteemipalveluihin hankealueella.

Hankkeen tarkoituksesta ja tuloksista kertominen niin merialuesuunnittelijoille, ympäristö- ja ilmastoasiantuntijoille kuin suurelle yleisöllekin oli tärkeä osa hanketta alusta alkaen. Pääasiallisena viestintäkanavana oli sosiaalinen media, ja merialueiden parissa työskenteleville viranomaisille ja asiantuntijoille järjestettiin vuoden 2021 alussa työpaja. Hankkeen tulokset esitellään eri [raporteissa](#), [SeaGIS2.0-karttaportaalissa](#), [hankkeen verkkosivustolla](#) ja [tarinakartassa](#). Raportit



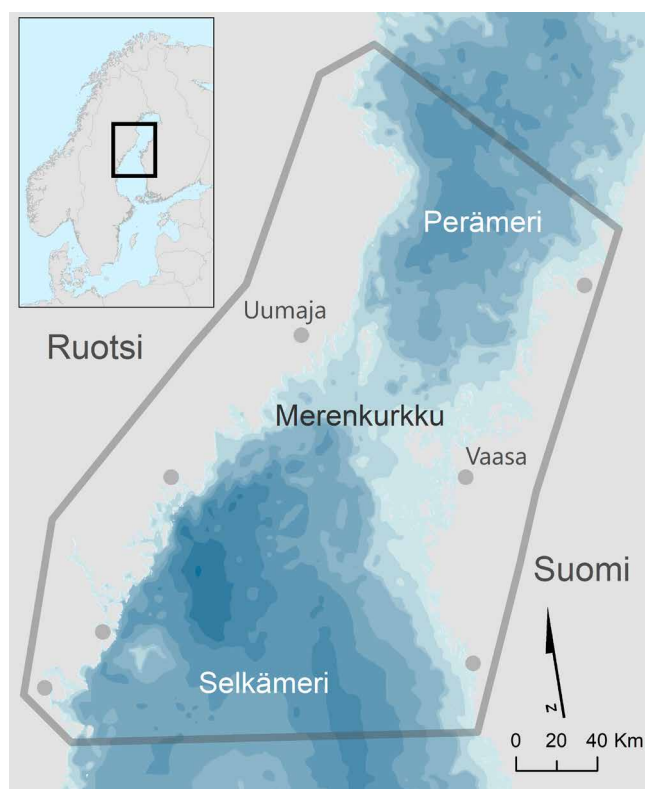
sisältävät yksityiskohtaista tietoa hankkeen menettelmistä ja tuloksista, ja malleja voi tutkia tarkemmin SeaGIS2.0-karttaportalissa. Tuotettu aineisto on avointa ja vapaasti käytettävissä muissa ilmastoon ja Itämereen liittyvissä hankkeissa. Hankkeen eri aihealueista luotiin useita videoita ja animaatioita, jotta hankkeen tulokset saatiin paremmin erilaisten ihmisten saataville ja jotta niistä voitiin tehdä suuren yleisön kannalta kiinnostavampia. Tuotettua viestintämateriaalia ja hankkeen tuloksia esiteltiin inspiroivalla tavalla hankkeesta luodun tarinakartan avulla.

### 1.3. Hankealue

Hankealue ulottuu pohjoisessa Ruotsin Skellefteån alueelle ja Suomen Kokkolaan sekä etelässä Ruotsin Sundsvalliin ja Suomen Kristiinankaupunkiin saakka (Kuva 1).

Merenkurkku sijaitsee Pohjanlahden keskiosissa ja myös suurin piirtein hankealueen keskellä. Merenkurkku on matala siirtymäalue, joka erottaa Selkämeren ja Perämeren toisistaan. Merenkurkun rantaviiva ja topografia muuttuvat koko ajan, sillä niitä muovaa jatkuva maankohoaminen, jonka seurauksena maa kohoaa noin 9 millimetriä vuodessa (Poutanen & Steffen 2014). Merenkurkussa sijaitsee useita merisuojealueita, kuten esimerkiksi Natura 2000 -alueita sekä merkittäviä lintujen elinympäristöjä ja biodiversiteetin suojelun kannalta tärkeitä alueita (Kallio ym. 2019). Tämän lisäksi Merenkurkku luokitellaan ekologisesti tai biologisesti merkittäväksi merialueeksi (Ecologically or Biologically Significant Marine Areas, EBSA) (Biologisen monimuotoisuuden yleissopimus, The Convention on Biological Diversity 2021).

Suomen puoleisella hankealueella sijaitseva rannikko on matalaa ja käsittää tuhansia pieniä saaria, kun taas Ruotsin puoleisen hankealueen maasto ja pinnanmuodot ovat paljon jyrkempiä, ja siellä on myös vähemmän saaria (Poutanen & Steffen 2014; Donadi ym. 2020). UNESCO:n maailmanperintökohde Korkearannikko / Merenkurkun saaristo sijaitsee alueella (UNESCO 2021). Suomen puoleisella hankealueella



**Kuva 1. EConnect-hankealue sijaitsee Pohjanlahdella pohjoisella Itämerellä.**

sijaitsee monia Suomen ekologisesti merkittäviä vedenalaisia meriluontoalueita (EMMA-alueet): Revöfjärdens, Rönnskäret, Mikkelsaaret ja Kvimofjärdens (Lappalainen ym. 2020).

Hankealueen vesien suolapitoisuus vaihtelee Merenkurkun vesialueiden mataluuden ja voimakkaiden virtausten vuoksi. Suolaisuus laskee 5 promillesta 4 promilleen siirryttäessä vain noin 10 kilometriä pohjoiseen Bergöstä, joka sijaitsee Vaasan eteläpuolella. Suolapitoisuus on korkeampi hankealueen itäpuolella, sillä Coriolis-ilmiö sekoittaa alueelle etelästä suolaista vettä kohti Suomen rannikkoa ja Ruotsin rannikon joet kuljettavat mukanaan runsaasti makeaa vettä mereen (Rinkineva & Bader 1998). Merenkurkun keskisuolapitoisuus on 3–4 promillea, joka on alhaisempi kuin Itämeren keskisuolapitoisuus (Kautsky & Kautsky 2000).

Suolapitoisuuden aleneminen siirryttäessä varsinaisen Itämeren alueelta Pohjanlahden alueelle vaikuttaa lajien elinoloihin. Tämän vuoksi useiden lajien levinneisyyden raja kulkee Merenkurkussa (Rinkineva & Bader 1998). Tällaisia lajeja ovat esimerkiksi sinisimpukka ja ruskoleviin kuuluvat haurut (HELCOM 2017). Suurin osa hankealueen lajeista on makeanveden lajeja, jotka sietävät murtoveettä, kuten esimerkiksi ahven (*Perca fluviatilis*), lahna (*Abramis brama*) ja särki (*Rutilus rutilus*), ja vesikasveista esimerkiksi vidat (*Potamogeton* spp. & *Stuckenia* spp.) ja levistä näkinpartaiset (Charales) (Viitasalo ym. 2017). Sekä merilajit että makeanveden lajit elävät veden suolapitoisuuden osalta jossain määrin normaalista poikkeavissa olosuhteissa, mikä on niille varsin stressaavaa. Tämän stressin seurauksena lajien yksilöt voivat esimerkiksi jäädä kooltaan normaalia pienemmiksi verrattuna alueisiin, joiden eliöstö ei altistu stressitekijöille (Westerbom ym. 2002).

Hankealueen keskisyvyys on 64 metriä ja enimmäisyvyys 298 metriä (SeaGIS2.0). Hankealueen matalissa osissa on alueita, joissa lämpötila on korkeampi erityisesti keväisin ja kesäisin, toisin kuin muutoin kylmillä Pohjanlahden vesillä. Nämä lämpimämmät alueet ovat tärkeitä lisääntymisen kannalta esimerkiksi monille kalalajeille. Hankealueen talvisin peittävä jää vaikuttaa merkittävästi mereen, esimerkiksi rantojen eroosioon, ja jää myös hankaa pois vedenalaista kasvillisuutta matalilla alueilla, joihin muodostuu kiintojäätä. Pohjanlahden tärkeimmät merivirrat liikkuvat itärannikkoa pitkin pohjoiseen ja länsirannikkoa pitkin etelään. Meressä on myös paikallisia heikompia virtauksia, jotka vaikuttavat paikallisiin olosuhteisiin, kuten sedimentaatioon. Virtaukset ovat tyypillisesti voimakkaita Merenkurkussa, sillä se on väylä, jota pitkin vesi liikkuu Selkämeren ja Perämeren välillä (Rinkineva & Bader 1998).

### 1.4. Ilmastonmuutoksen vaikutukset tulevaisuudessa

Tulevaisuudessa ilmastonmuutoksen vuoksi ilmakehässä tapahtuvat muutokset voivat muuttaa ilman lämpötilaa ja sadantaa eli sademäärää. Myös valtamerissä ja merissä on odotettavissa muutoksia liittyen mm. veden lämpötilaan, merenpinnan tasoon, myrskyvuoksiin ja meren jääpeitteeseen (HELCOM & Baltic Earth 2021; Meier ym. 2021). Hiilidioksidin kohonnut määrä ilmakehässä aiheuttaa lisäksi meren happamoitumista (HELCOM 2017). On silti epävarmaa, kuinka paljon Itämeren pH-arvo voi muuttua (HELCOM & Baltic Earth 2021). Näiden muutosten odotetaan

puolestaan johtavan meren lajistossa ja eliöyhteisöissä tapahtuviin muutoksiin (Viitasalo & Bonsdorff 2021).

Itämeren alueella veden lämpötilan ennustetaan nousevan eniten kesäisin Pohjanlahdella (Meier ym. 2021). Pintaveden kerrokset lämpenevät syviä vesiä voimakkaammin, ja Meier ym. (2021) tutkimuksessa vedenpinnan keskilämpötilan koko Itämeren pohjoisosien alueella on arvioitu kohoavan RCP8.5-ilmastoskenaarion mukaan yli 3 °C. Ilmastomalleihin liittyy runsaasti epävarmuustekijöitä vesitaseen osalta, ja koska valunta on suurin suolapitoisuuteen vaikuttava tekijä, on myös hyvin epävarmaa, aleneeko vai kohoako suolapitoisuus. On odotettavissa, että sadanta lisääntyy sekä kesällä että talvella Itämeren pohjoisosissa, mikä voi johtaa suolapitoisuuden alenemiseen valunnan kautta. Toisaalta lämpötilojen kohotessa myös haihdunta lisääntyy, mikä voi vähentää jokien virtaamaa, jolloin myöskään veden suolapitoisuus ei alenisi. Lisäksi merenpinnan nousu lisäisi Atlantilta Itämereen virtaavan suolapitoisen veden määrää, mikä voisi myös kompensoida suuremman sadannan ja valunnan vaikutuksia. Tämä puolestaan vaikeuttaa edelleen suolapitoisuuteen liittyvien ennusteiden laatimista.

Merenpinnan nousu johtuu pääasiassa jäätiköiden sulamisesta ja meriveden lämpölaajenemisesta sen lämmitessä. Pohjanlahdella maankohoamisen odotetaan kompensoivan mahdollista merenpinnan nousua (Meier ym. 2021). Merenpinnan nousua hankealueella käsitellään tarkemmin osiossa 2. Myrskyvuoksiin liittyvät muutokset tulevaisuudessa riippuvat merenpinnan noususta ja lisääntyneestä tuulen nopeudesta. Tulevaisuuden tuuliolosuhteisiin liittyy vielä paljon epävarmuutta, mutta useiden viimeaikaisten tutkimusten mukaan tuulten nopeuden lisääntyminen on mahdollista, erityisesti syksyisin (HELCOM & Baltic Earth 2021; Meier ym. 2021). Merenpinnan nousu on myrskyvuoksien muutoksiin eniten vaikuttava tekijä (von Storch ym. 2015), ja voidaan olettaa, että mikäli merenpinta nousisi myös myrskyvuoksia voisi esiintyä jatkossa aiempaa enemmän. Tämä on kuitenkin hyvin epävarmaa.

Jääpeite riippuu hyvin paljon ilman lämpötilasta talvella. Nykyisin jääpeitteen pinta-ala on jo aiempaa pienempi ja se on ohuempaa verrattuna historiallisiin keskiarvoihin, ja lisäksi jääpeitteen kesto on lyhentynyt. Talvella 2020 merijään vuosittainen enimmäislaajuus oli pienin sitten vuoden 1720, jolloin mittaukset aloitettiin (Meier ym. 2021). Samoin viimeisten 30 vuoden aikana merijään keskimääräinen laajuus on ollut kaikkien aikojen pienin (Meier ym. 2021). Kohoavien lämpötilojen odotetaan tulevaisuudessa

kiihdyttävän näitä merijäässä tapahtuvia muutoksia (HELCOM & Baltic Earth 2021; Meier ym. 2021).

On vielä epäselvää, kuinka merten happamoituminen vaikuttaa lajeihin ja ekosysteemeihin Itämerellä (HELCOM & Baltic Earth 2021). Käytävissä oleva aineisto viittaa kuitenkin siihen, että monet Itämeren lajit sietävät yleensä verrattain hyvin alhaisia pH-arvoja, mutta esimerkiksi jotkin kuorelliset lajit voivat kärsiä muutoksista (Navenhand 2012). On myös odotettavissa, että merten happamoituminen vaikuttaa vähemmän murtovedessä eläviin eliöyhteisöihin, sillä ne ovat jo sopeutuneet hiilidioksidipitoisuuksien ja pH-arvojen muutoksiin (Bermudez ym. 2016). Joissakin tutkimuksissa on kuitenkin lisäksi havaittu viitteitä siitä, että happamoitumisella yhdessä vesien läm-

penemisen kanssa on tuhoisampi vaikutus Itämeren alueen eliöyhteisöihin kuin pelkällä happamoitumisella (Viitasalo & Bonsdorff 2021).

Ilmastonmuutoksen vaikutusten, kuten meren lämpötilojen nousun, odotetaan olevan Pohjanlahdella voimakkaampia kuin missään muualla Itämeren alueella, osittain sen vuoksi, että albedo eli heijastuskyky vähenee jääpeitteen pienentyessä, mikä puolestaan johtaa edelleen lämpötilojen kohoamiseen (Meier ym. 2012). Ilmastonmuutos vaikuttaa Itämeren ekosysteemeihin eri tavoilla ja voi yhdessä muiden haitallisten ihmisen aiheuttamien vaikutusten kanssa heikentää ekosysteemien resilienssiä tehden niistä entistä haavoittuvampia tuleville muutoksille (HELCOM 2013e; von Storch ym. 2015; HELCOM & Baltic Earth 2021).

# 2. Merenpinnan muutokset hankealueella tulevaisuudessa

*Jani Särkkä, Ilmatieteen laitos*

Pohjanlahden rannikkoon vaikuttava tekijä on maankohoaminen, jossa maankuori kohoaa oltuaan Fennoskandian jäätikön painon alla. Jäätikön paksuimmat osat sijoittuivat Merenkurkun alueelle, jossa maankohoaminen on voimakkainta (9 mm/vuosi). Maankohomisen vuoksi keskimääräinen merenpinnan taso suhteessa maanpintaan on laskenut useita satoja metrejä.

Vuoteen 1900 mennessä suhteellinen keskimääräinen merenpinnan taso laski tasaisella tahdilla. Vuoden 1900 jälkeen globaali keskimääräinen merenpinnan nousu on tasapainottanut maankohoamista ja hidastanut suhteellisen keskimääräisen merenpinnan muutosta. Kuluneiden sadan vuoden aikana Pohjanlahden suhteellinen keskimääräinen merenpinnan taso on laskenut 30–70 cm, kun maankohoaminen on ollut voimakkaampaa verrattuna globaaliin keskimääräiseen merenpinnan nousuun. Globaali keskimääräinen merenpinta nousee, kun merivesi lämpölaajenee ja vuoristojen jäätiköt sekä Grönlannin ja Antarktiksens mannerjääät sulavat ilmaston lämmitessä.

Globaalin keskimääräisen merenpinnan nousun ennustetaan kiihtyvän ilmastomuutoksen vaikutuksesta. Ennusteet ovat vielä epävarmoja, sillä ei tiedetä, kuinka läntisen Antarktiksens jääpeite reagoi lämpenevään ilmastoon. On mahdollista, että keskimääräinen merenpinnan nousu on yli metrin vuoteen 2100 mennessä, jos läntisen Antarktiksens jääpeite häviää. Useimpien skenaarioiden mukaan keskimääräinen merenpinnan nousun nopeus on pienempi kuin maankohoamisnopeus, joten kiihtyvä merenpinnan nousu hidastaa maankohoamisesta johtuvaa merenpinnan tason laskua. Jos keskimääräistä merenpinnan nousua koskevat äärimmäisimmät skenaariot toteutuvat, keskimääräinen merenpinnan nousu olisi Pohjanlahdella maankohoamista voimakkaampaa vuoden 2050 jälkeen, mikä johtaisi nykyisen rantaviivan peittymiseen veden alle.

Lyhyen aikavälin muutoksia merenpinnan tasossa aiheuttavat tuuli, ilmanpaine ja Itämeren alueen sisäinen oskillaatio. Pohjanlahden merenpinnan tasoa

on mitattu mareografeilla 1900-luvun alusta lähtien. EConnect-hankealueella merenpinta oli korkeimmillaan mittauslukemien mukaan kahden ääri-ilmiön aikana: tammikuussa 1984 merenpinnan tason korkeudeksi mitattiin 139 cm Pietarsaassa, 144 cm Vaasassa, 148 cm Kaskisissa, 148 cm Furuögrundissa ja 127 cm Spikarnalla suhteessa keskimääräiseen merenpinnan tasoon. Helmikuussa 2002 merenpinnan tasoksi mitattiin 142 cm Ratanissa ja 131 cm Skagsuddessa. Kovemmat tuulet tai aiempaa useammin toistuvat myrskyt voisivat johtaa erityisen korkeaan merenpintaan, mutta ilmastoskenaarioissa ei ole selvää viitettä tällaisiin muutoksiin Itämeren alueella. Itämeren merenpinnan voimakkaasta vaihtelusta johtuen aiempia mittaustuloksia korkeammat lukemat ovat mahdollisia nykyilmastossa, jos merenpinnan tasoon vaikuttavat ilmakehän olosuhteet (kuten matalapaineen vähimmäisarvo ja matalapainealueiden kehitys) ovat optimaalisia.

Keskimääräisen merenpinnan tason muutokset vaikuttavat myös ääriarvoihin ja tulvien todennäköisyyteen rannikkoalueilla. On tärkeää huomioida odotettavissa olevat muutokset arvioitaessa tulvariskiä ja suunniteltaessa rannikkoalueiden infrastruktuuria. Pellikka ym. (2018) ovat arvioineet rannikkoalueiden tulvien todennäköisyyttä Suomessa tulevaisuudessa. He yhdistivät 14 erilaista keskimääräisen merenpinnan nousua koskevaa skenaariota, joissa useita ilmastoskenaarioita (RCP4.5, RCP8.5 ja muutamia vanhempia skenaarioita) käytettiin keskimääräisen merenpinnan tason ennustetun vaihteluvälin arvioimiseen tulevaisuudessa. Tämän lisäksi tutkimuksessa otettiin huomioon maankohoaminen ja tuuliolojen muutokset ja laadittiin tietoja yhdistämällä arvioita siitä, kuinka todennäköisesti merenpinta nousee Suomen rannikolla aiempia mittaustuloksia korkeammalle vuonna 2050 ja 2100.

EConnect-hankealueelta saatuja Suomen rannikkoa koskevia tuloksia voidaan hyödyntää myös Ruotsin rannikon osalta, sillä ainoa merkittävä ero alueen keskimääräiseen merenpinnan nousuun vaikuttavien tekijöiden osalta on maankohoamisnopeus, joka on Ruotsin rannikolla 1 millimetrin nopeampi vuodessa.

Kun otetaan huomioon Suomen rannikkoa koskevat Pellikan ym. (2018) tulokset ja Ruotsin rannikon erilainen maankohoamisnopeus, voidaan todeta, että keskimääräinen merenpinnan nousu EConnect-hankealueella vuosien 2000 ja 2100 välillä vaihtelee enintään 10 senttimetrillä eri sijainneissa (Taulukko 1).

Suurin osa merenpinnan nousua koskevista skenaarioista ennustaa merenpinnan laskevan edelleen Pohjanlahden keskiosien alueella, koska maankohoaminen kompensoi merenpinnan maailmanlaajuisista nousua. Näin ollen pidetään todennäköisenä, että merenpinnan lasku jatkuu Pohjanlahdella myös tulevaisuudessa, mutta hitaampana kuin aikaisemmin. Ennustettu keskimääräinen merenpinnan muutos vuodesta 2000 vuoteen 2100 alueella on -30 cm, mutta ennusteet vaihtelevat vieläkin alemmasta merenpinnasta -70 cm merenpinnan nousuun + 20 cm (95 % luottamusväli). Tämä tarkoittaa sitä, että äärimmäisessä tapauksessa, mikäli Etelämantereen jäätikkö sulaa, maapallon keskimerenpinta nousee niin paljon, että Pohjanlahden maankohoaminen ei riitä kompensoimaan muutosta, ja sen seurauksena myös merenpinta alueella nousisi. Tässäkin tapauksessa merenpinta nousisi vain noin 20 cm, eli vähemmän kuin globaalisti (yli 1 m) jatkuvan maankohoamisen ansiosta, johon ilmastonmuutos ei vaikuta.

**Taulukko 1. Keskimääräisen merenpinnan tason muutos (cm) ja sen luottamusvälit vuosina 2000–2100 Suomen ja Ruotsin rannikoilla EConnect-hankealueella.**

Kaupunki	Matala (5 %)	Keskimääräinen	Korkea (95 %)
Pietarsaari	-72	-29	23
Vaasa	-74	-31	21
Kaskinen	-66	-22	33
Skellefteå	-82	-39	13
Uumaja	-84	-41	11
Härnösand	-74	-31	21

Rakennettaessa lähelle rantaviivaa on tärkeää varautua rannikkoalueen tulviin, vaikka ne olisivatkin harvinaisia. Kun suhteellinen keskimääräinen merenpinnan taso laskee, myös tulvariski pienenee. Sitä mukaa, kun keskimääräistä merenpinnan tasoa koskevien skenaarioiden epävarmuustekijät lisääntyvät vuoteen 2100 mennessä, on varauduttava keskimääräisen merenpinnan tason nousuun, vaikka sen todennäköisyys onkin pieni. Pellikan ym. (2018) metodissa vuoteen 2100 arvioituihin tulvariskeihin sisältyvät sekä lyhyen aikavälin ennätysellisen korkeat merivedenkorkeudet ja kaikkein todennäköisin merivedenkorkeuden nousu, että lyhyen aikavälin kaikkein matalimmat merivedenkorkeudet ja kaikkein epätodennäköisin merivedenkorkeuden nousu. Esimerkiksi korkeimpien merivedenkorkeuksien osalta sadan vuoden aikajännteellä todennäköisesti toistuva äärimmäinen merivedenkorkeus on Vaasassa 169 cm vuonna 2010, 155 cm vuonna 2050 ja 180 cm vuonna 2100. Verrattaessa vuotta 2050 vuoteen 2010 äärimmäinen vedenkorkeus on matalampi johtuen siitä, että suhteellinen merivedenkorkeus laskee maankohoamisen vuoksi, mutta vuosien 2050 ja 2100 välillä äärimmäisen vedenkorkeuden todennäköisyys nousee suhteelliseen merivedennousuun liittyvien epävarmuustekijöiden lisääntyessä vuoteen 2100 mennessä.

# 3. Tulevaisuuden skenaariot

Ilmastomallit ja lajien levinneisyysmallit (species distribution models, SDM) voivat auttaa ymmärtämään, miltä tulevaisuus voisi näyttää. On helpompaa sopeutua ilmastonmuutoksen seurauksiin, jos tiedetään, millaisia vaikutuksia sillä voi olla ympäristöön. Ilmastomallit edustavat monimutkaista ja moniulotteista ilmastosysteemiä ja sisältävät muun muassa ilmakehää, valtameriä, merijäätä, maata ja maan olosuhteita, kasvillisuutta ja hiilen kiertoa kuvaavia aineistoja (McGuffie & Henderson-Sellers 2014). Lajien levinneisyysmallit kuvaavat arvioita habitaattien soveltuvuudesta ekosysteemin eri lajeille ja eliöyhteisöille. Tämä on erityisen hyödyllistä meriympäristöissä, joissa lajeja on vaikeampi tarkkailla ja seurata esimerkiksi maaympäristöön verrattuna (Reiss ym. 2011).

Tässä hankkeessa lajien levinneisyysmalleja käytettiin ennustamaan ilmastonmuutoksesta aiheutuvia muutoksia lajien levinneisyydessä, mikä voi auttaa tunnistamaan, mitkä lajit ovat vaarassa (Slavich ym. 2014). On kuitenkin tärkeää muistaa, että mallit ovat vain arvioita ja niihin liittyy lähtökohtaisesti hyvin paljon epävarmuustekijöitä, mikä tulee ottaa huomioon niitä hyödynnettäessä. Kun lajien levinneisyysmalleja käytetään apuna ennustettaessa lajien levinneisyyttä tulevaisuuden muuttuvissa ilmasto-olosuhteissa, on huomattava, että niihin liittyy tiettyjä ongelmia. Siitä huolimatta ne ovat kuitenkin laajalti käytetty menetelmä arvioitaessa eri lajeihin kohdistuvia ilmastonmuutoksen vaikutuksia. (Gusian & Thuiller 2005; Littel ym. 2011; Porfirio 2014; Simon-Nutbrown ym. 2020). Kuvaus tässä hankkeessa tutkituista lajeista löytyy osiosta 4.2.

Tulevaisuuden ilmaston ennustamiseen käytetään erilaisia ilmastomalleja, joista eniten käytettyjä ovat yleiset virtausmallit (general circulation model, GCM) ja alueelliset ilmastomallit (regional climate models, RCMs) (von Storch ym. 2015). Yleiset virtausmallit kuvaavat ilmastoa hilapisteiden avulla, ja niiden resoluutio on noin 100–300 kilometriä. Monet tärkeät prosessit, kuten sadanta ja pilvien muodostus, tapahtuvat kuitenkin paljon pienemmässä mittakaavassa. Tämän vuoksi yleisten virtausmallien lisäksi käytetään alueellisia ilmastomalleja, jotka kuvaavat paremmin

paikallista ilmastoa (von Storch ym. 2015). Tarkempia kuvauksia ilmastomallinnuksesta ovat laatineet esimerkiksi Wibig ym. (2015) ja Saraiva ym. (2019a).

Ilmastomalleihin sisältyy paljon epävarmuustekijöitä, jotka liittyvät muun muassa syöttöaineistojen tarkkuuteen ja määrään ja tulevaisuudessa tapahtuviin muutoksiin kasvihuonekaasujen (greenhouse gas, GHG) ja aerosolien pitoisuuksissa ja maankäytössä (von Storch ym. 2015). Muutoksia ilmakehän kasvihuonekaasujen pitoisuuksissa, aerosoleissa ja maankäytössä on vaikea ennustaa, minkä vuoksi erilaiset ilmastoskenaariot perustuvat arvioihin maailman talouden ja väestörakenteen tulevasta kehityksestä. Näitä ilmastoskenaarioita käytetään ilmastomalleissa apuna ennustettaessa tulevaisuuden ilmastoa (von Storch ym. 2015). Tässä hankkeessa käytettiin Hallitustenvälisen ilmastonmuutospaneelin (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) vuonna 2013 laatimaa ilmastoskenaariota, jota kuvataan tarkemmin seuraavassa osiossa 3.1. Toinen ilmastomallien epävarmuutta lisäävä tekijä on se, että ilmakehän suuren mittakaavan kiertoliikkeet ovat kaoottisia ja sen vuoksi vaikeasti ennustettavia. Ilmastossa esiintyy myös luonnollista vaihtelua, joka ei liity ihmisen toimiin. Kasvihuonekaasuihin liittyvien skenaarioiden tai itse ilmastomallienkaan parantaminen ei poista näitä epävarmuustekijöitä (von Storch ym. 2015).

## 3.1. Hankkeessa käytetyt skenaariot

Tässä hankkeessa käytetyt ilmastomallit perustuvat RCP8.5-ilmastoskenaarioon ja HELCOMin Itämeren suojelelun toimintaohjelman Baltic Sea Action Planin (BSAP) mukaisiin ravinteiden vähennystavoitteisiin. RCP8.5 on yksi neljästä IPCC:n luomasta ilmastoskenaariosta (Collins ym. 2013). BSAP on HELCOMin sopimusapuolille laadittu toimenpiteiden ja menetelmien kokoelma, jonka avulla koko Itämerellä pyritään saavuttamaan hyvä meriympäristön tila (HELCOM 2020).

Viidennessä arviointiraportissaan (AR5, IPCC Fifth Assessment Report) IPCC esitteli neljä uutta ilmas-

toskenaariota, joista käytetään nimitystä kasvihuonekaasujen pitoisuuksien mahdolliset kehityskulut eli nk. RCP-skenaariot (Representative Concentration Pathways, RCP) (Cubasch ym. 2013). RCP-skenaariot määritellään sen mukaan, millainen säteilypakotteen (mittayksikkö  $W/m^2$ ) taso on vuonna 2100 verrattuna esiteolliseen aikaan. Säteilypakotteella mitataan sitä, kuinka maapallon ilmakehän energiatasapaino muuttuu. Tässä hankkeessa käytetty RCP8.5-skenaario kuvaa huonointa mahdollista tilannetta, jossa säteilypakote saavuttaisi arvon  $8.3 W m^{-2}$  vuonna 2100 (Collins ym. 2013). Vertailun vuoksi mainittakoon, että säteilypakote vuonna 2020 oli  $3.2 W m^{-2}$  (NOAA 2021). Tämä lisäys kasvihuonekaasupäästöissä tarkoittaisi ilmaston lämpenemistä yli  $4^{\circ}C$ :eella vuoteen 2100 mennessä (Collins ym. 2013). Tämä vastaa keskilämpötilan nousua lähes  $6^{\circ}C$ :eella vuoteen 2100 mennessä Ruotsissa ja Suomessa (SMHI 2021; Ruosteenoja ym. 2016), sillä pohjoinen pallonpuolisko lämpenee eteläistä pallonpuolisko nopeammin (Friedman ym. 2013, Meier ym. 2021). Kolme muuta ilmastoskenaariota ovat RCP2.6, RCP4.5 ja RCP6.0, ja niissä ilmastomuutoksen vaikutusten oletetaan olevan lievempiä (IPCC 2019). Vuonna 2021 IPCC julkaisi kuudennen arviointiraporttinsa (AR6, Sixth Assessment Report) jossa uudet ilmastoskenaariot esiteltiin (IPCC 2021). Tässä hankkeessa keskityttiin RCP8.5-skenaarioon aikarajoitteiden vuoksi.

BSAP-toimintaohjelma hyväksyttiin vuonna 2007, ja sen tavoitteena oli saavuttaa Itämeren hyvä ekologinen tila vuoteen 2021 mennessä. Kun selvisi, että tätä tavoitetta ei saavutettaisi, HELCOMin ministerikokous päätti vuonna 2018 päivittää ohjelman vuonna 2021 (HELCOM 2020). Päivitetty ohjelma pohjautuu alkuperäiseen ohjelmaan ja sisältää kaikki aiemmin sovitut toimenpiteet. Uuteen ohjelmaan on kuitenkin lisätty toimia, joilla on mahdollista vastata uusiin tai aiemmin ratkaisemattomiin haasteisiin kuten ilmastomuutokseen, meren lääkeainejäämiin ja merialueiden roskaantumiseen (HELCOM 2020). BSAP:n toiminta-alueet kohdistuvat neljään pääteemaan: biodiversiteetin suojeleminen, vaaralliset aineet ja roskaantuminen (lisätty päivitettyyn ohjelmaan), merenkulku, ja rehevöityminen (HELCOM 2020, 2018b). EConnect-hankkeen

tulevaisuusmalleissa tavoitteet ravinteiden määrän vähentämisestä ovat peräisin alkuperäisestä BSAP-ohjelmasta, jonka mukaan joista, maaperästä ja ilmasta aiheutuvaa ravinnekuormitusta on vähennettävä vastaamaan ravinnekuormituksen enimmäismäärää (maximum allowable input, MAI). Uudessa päivitettyssä BSAP-ohjelmassa vuoden 2021 MAI-tavoitteet vastaavat suurin piirtein alkuperäisen ohjelman tavoitteita, mutta uudessa ohjelmassa painotetaan enemmän hajakuormituksen päästöjen vähentämistä, koska suureen osaan alkuperäisen suunnitelman pistemäisistä kuormituslähteistä on jo puututtu. Päivitettyssä BSAP-ohjelmassa on myös tehty joitain muutoksia ravinteiden syöttörajoihin (Nutrient Input Ceilings, NICs), jotka määrittävät ravinteiden enimmäismäärät veden ja ilman kautta hyvän tilan saavuttamiseksi Itämeren eri altain rehevöitymisen suhteen kullekin maalle. NIC-tasot lasketaan suoraan MAI-tavoitteista. Joten vaikka Selkämerellä ja Perämerellä MAI-tavoitteet ovat pysyneet ennallaan päivitettyssä ohjelmassa, uusi painopiste niiden saavuttamisessa on muuttanut NIC-tasojen ja siten uudet ravinnevähennystavoitteet ovat nousseet hieman (lisätietoa löytyy HELCOM 2021b). EConnectin malleissa ei ole kuitenkaan käytetty uutta BSAP-ohjelmaa, koska mallit on laadittu ennen sen toimeenpanoa. Vaikka uudessa ohjelmassa on muutoksia NIC-tasoissa, on tärkeää huomata, että MAI-tavoitteet ovat molemmissa ohjelmissa lähes samat. Siksi alkuperäistä BSAP-ohjelmaa voidaan pitää myös luotettavana mallinnusta ajatellen. Sekä vanhan että uuden ohjelman päätulos toteutuessaan on samantyyppinen alhainen kokonaisravinnetilanne Itämeressä tulevaisuudessa ja meren hyvä tila.

Hankkeesta saadut tulokset perustuivat oletukseen, jonka mukaan ilmakehän kasvihuonekaasujen pitoisuudet jatkaisivat kasvuaan tulevaisuudessa RCP8.5-skenaarion mukaisesti, mutta Itämeri saavuttaisi hyvän ekologisen tilan rehevöitymisen osalta. Tämä tarkoittaa sitä, että ravinnekuormitus vähenisi tasolle, jonka Itämeri kestäisi, eikä rehevöityminen uhkaisi enää merta.

Päätös keskittyä RCP8.5-skenaarioon ja BSAP-toimintaohjelmaan tehtiin nykyisten trendien ja kehityskul-

kujen perusteella. Vaikka ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi on asetettu kunnianhimoisia tavoitteita, kuten EU:n tavoite hiilineutraaliudesta vuoteen 2050 mennessä, toimenpiteet voivat olla riittämättömiä ja niihin on saatettu ryhtyä liian myöhään. Ilmastonmuutos on ymmärretty vakavaksi uhaksi jo vuosikymmeniä sitten, mutta tietoisuus ongelmasta ja sen ratkaisusta ei valitettavasti ole johtanut riittäviin käytännön toimiin. Tässä hankkeessa haluttiin käyttää pahinta mahdollista ilmastokenaariota, jotta voitiin tutkia sitä, mitä ilmastokriisin totaalinen sivuuttaminen ja suojelutoimien laiminlyönti voisi aiheuttaa herkälle Merenkurkun alueelle. Tavoitteena oli siten myös kiinnittää huomiota siihen, miten ilmastonmuutos, rehevöityminen, merten ekosysteemien tila ja ihmisten hyvinvointi liittyvät kaikki toisiinsa. Toisin kuin ilmastonmuutokseen, Itämeren rehevöitymiseen on jo jonkin aikaa suhtauduttu vakavasti, ja typen ja fosforin pitoisuudet

alueella ovat pienentyneet 22-24 % vuosina 1995-2014 (HELCOM 2018b). Tämän vuoksi näyttää mahdolliselta, että uuden BSAP:n rehevöitymistä koskevat tavoitteet voidaan saavuttaa tulevaisuudessa. Tästä huolimatta työtä rehevöitymisen ja muiden ympäristöongelmien torjumiseksi on vielä paljon. Skenaarioiden valinnalla haluttiin myös osoittaa, kuinka tärkeää on pienentää ravinnekuormitusta ja vähentää siten meriympäristön stressitekijöitä, jotta voidaan välttää rehevöitymisen ja ilmastonmuutoksen kumulatiiviset vaikutukset. Rehevöitymisen hillitseminen ja ilmastonmuutoksen vaikutukset ovat loppujen lopuksi yhteydessä toisiinsa, sillä ilmastonmuutoksen aiheuttamat ilmiöt, kuten fosforin vapautuminen maaperästä ja lisääntynyt sadanta sekä jokien valunta, voivat lisätä ravinnekuormitusta ja näin kumota rehevöitymisen hillitsemiseksi tehtyjen toimien vaikutusta.



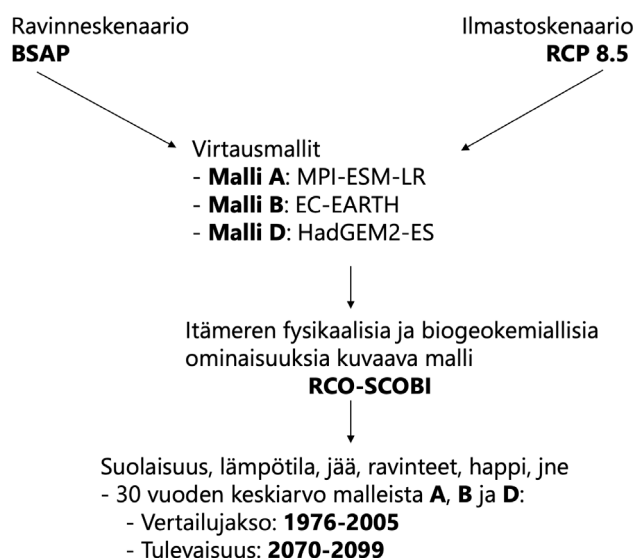
# 4. Aineisto ja menetelmät

## 4.1. Ilmastomallit

Ympäristöolosuhteet sekä vertailujaksolla että tulevaisuudessa perustuvat Itämeren fysikaalisia ja biogeokemiallisia ominaisuuksia kuvaavaan kolmiulotteiseen RCO-SCOBI-malliin (esim. Meier ym. 1999; Eilola ym. 2009; Saraiva ym. 2019), jonka Ilmatieteen laitos ja SMHI ajoivat vuoteen 2099 saakka. RCO-SCOBI-malli ajettiin kolmen yleisen virtausmallin pakotteilla. Nämä mallit olivat MPI-ESM-LR (Max-Planck Institute Earth System Model), jäljempänä malli A, EC-EARTH (European Countries Earth System Model), jäljempänä malli B, ja HadGEM2-ES (Hadley Center Global Environmental Model), jäljempänä malli D, Saraivan ym. (2019a) käyttämän mallien nimeämistavan mukaisesti. Malli D ajettiin ainoastaan vuoteen 2097 saakka, kun taas muut mallit ajettiin vuoden 2099 loppuun saakka.

Vaikka EConnect-hankkeen alkuperäisenä tavoitteena oli mallintaa, miltä meri voisi näyttää vuonna 2120, ilmastomallit oli mahdollista ajaa vain vuoden 2099 loppuun saakka. Syynä tähän on se, että mallien laa- timisen perustana käytettävää CMIP5-pakotedataa ei ole saatavilla tämän pidemmälle. RCO-SCOBI-mallia ja yleisiä virtausmalleja ei kuvailla tässä raportissa tar- kemmin, mutta niitä käsittelevät yksityiskohtaisemmin esim. Saraiva ym. 2019a. Mallien asetukset perustuivat SmartSea-hankkeessa tehtyyn työhön, jossa projek- tiot ajettiin vuoteen 2059 saakka (Smartsea 2022).

Mallit ajettiin käyttämällä RCP8.5-ilmastoskenaariota ja ravinnekuormituksen vähennystarpeista laadit- tua mallia, joka noudattaa Itämeren suojelun Baltic Sea Action Plan -toimintaohjelmaa (BSAP) (Kuva 2). Suolapitoisuus, lämpötila, ravinteet ja muut ympäris- tömuuttujat laskettiin mallien A, B ja D ennustamien arvojen keskiarvoina. Näitä ympäristömuuttujia käsi- tellään tarkemmin luvussa 4.3. Tutkimuksessa käytet- tiin useita malleja (A, B ja D), sillä yksikään malleista ei ole selkeästi muita parempi, vaikka ne eroavatkin toisistaan (esim. Wilcke & Bärring 2016; Saraiva ym. 2019a). Etuna useiden mallien käyttämisessä on se, että epävarmuustekijät voidaan ottaa paremmin huomioon kuin käyttämällä vain yhtä mallia. Lisäksi käyttämällä kolmen mallin keskiarvoa saadaan tulok-



**Kuva 2. Ilmasto- ja ravinnereskenaarioista mallinnettuihin kasvukauden olosuhteisiin vertailujaksolla ja tulevaisuudessa. Työnkulku on kuvattu yksinkertaistetusti siten, että se sisältää vain tässä raportissa mainitut osat ja vaiheet.**

seksi yksi esimerkiksi tulevaisuuden suolapitoisuutta tai haurujen levinneisyyttä kuvaava kartta sen sijaan, että lopputuloksena olisi kolme vaihtoehtoista tulosta, mihin päädyttäisiin, jos käytettäisiin kolmea mallia erikseen.

## 4.2. Lajiaineisto

Tähän tutkimukseen otettiin mukaan 12 lajiä tai laji- ryhmää, jotka esitellään alempana. Kattava luettelo taksoneista, jotka kuuluvat laajempiin lajiryhmiin, kuten vesisammaliin tai surviaissääskiin, löytyy liitteistä Taulukosta A1. Näiden 12 lajin tai lajiryhmän valinta- perusteina olivat niiden ekologinen merkitys ja kyky tuottaa ekosysteemipalveluita Pohjanlahden keskio- sissa. Yhtenä valintaperusteena oli myös lajien arvi- oitu herkkyys reagoida suolapitoisuuden ja lämpöti- lan muutoksiin. Valitut lajit ja lajiryhmät ovat lisäksi tunnusomaisia HELCOM HUB -biotoopeille (HELCOM Underwater biotope and habitat classification system

biotopes), mutta mallit ja taustadata eivät suoranaisesti edusta HELCOM HUB -biotooppeja, sillä domi-nanssihierarkioita ei otettu huomioon. Tämä tarkoittaa sitä, että esimerkiksi haurujen osalta esiintymiksi määriteltiin sellaiset havainnot, joissa niiden peittävyys oli vähintään 10 prosenttia riippumatta siitä, oliko jollakin muulla lajilla suurempi peittävyys.

Lajiaineistot kerättiin Suomen ja Ruotsin veden-alaisten inventointiaineistojen tietokannoista, jotka sisältävät enimmäkseen veneestä käsin tehtävään vedenalaiseen drop-videointiin ja sukelluskartoituksiin pohjautuvia havaintoja. Suomessa esiintyviä makrofytyttejä koskeva aineisto perustui VELMU-inventointiaineistoihin (Vedenalaisen meriluonnon monimuotoisuuden inventointiohjelma), ja Suomessa esiintyvää pohjaeläimistöä koskeva aineisto saatiin SYKE:n ylläpitämästä Hertta-tietokannasta. Tämän lisäksi 60 näytettä otettiin Van Veen -tyyppisellä pohjanoutimella kesällä 2019, jotta näytteitä saatiin riittävästi myös alueilta, joilta niitä oli aiemmin otettu vain vähän. Ruotsin inventointiaineisto kerättiin SMHI:n Shark-tietokannasta, ja sitä täydennettiin Västerbotenin ja Västernorrlandin lääninhallituksilta saaduilla suppeammilla aineistoilla, joita oli tuotettu aiemmissa hankkeissa ja tallennettu Martrans-tietokantaan. Inventointiaineisto käsitti kaiken kaikkiaan yli 1 300 pehmeän pohjan näytettä, yli 35 000 kasvillisuus pistettä (mukana oli yleensä myös havaintoja sinisimpukoista) ja yli 1 000 Kautsky-näytettä, joista osa sisälsi myös kasvillisuustietoja (Taulukko 2). Järviruo'on mallinta-

miseen käytettiin lisäksi satelliittikuvia, joiden avulla luotiin 500 esiintymispistettä. Syynä tähän oli se, että järviruokoa havaitaan verraten harvoin kasvillisuustutkimuksissa, joiden havainnointipisteet eivät yleensä sijaitse kaikkein matalimmilla alueilla, joissa taas esiintyy tiheitä järviruokokasvustoja.

Raakadatan arvot eli makrofytytien ja sinisimpukoiden peittävyys sekä pohjaeläinyhteisöjen tiheys muutettiin mallinnusta varten binaarisiksi muuttujaksi, jossa arvo 0 tarkoittaa, että laji ei esiinny, ja arvo 1 tarkoittaa esiintymistä. Pohjaeläimille käytettiin lajikohtaisia havaittujen tiheyksien kvantiileihin perustuvia kynnsarvoja ja makrofytyteille kiinteitä 10 prosentin ja 25 prosentin peittävyysarvoja. Esimerkiksi vain pohjanäytteet, joissa esiintyi vähintään 48 liejusimpukkaa, luokiteltiin esiintymiksi (1), ja näytteet, joissa oli 0–47 simpukkaa, nolliksi (ei esiinny). Syynä tähän oli se, että mallinnuksessa haluttiin keskittyä vain kaikkein tiheimpiin populaatioihin eli lajeille kaikkein suotuisimpiin habitaatteihin. Kynnsarvot Taulukossa 2 (alla) on esitetty alhaisemman tiheyden malleille. Malleista laadittiin useimmille lajeille ja lajiryhmille kaksi versiota, yksi alhaisemmalle (25 prosentin kvantiili tai 10 prosentin peittävyys) ja toinen suuremmalle (75 prosentin kvantiili tai 25 prosentin peittävyys) tiheydelle tai peittävyydelle. Sinisimpukoita koskeva aineisto sisälsi sekä pohjaeläinnäytteitä, jotka kuvasivat tiheyttä, että kasvillisuustutkimuksia, joissa runsaus arvioitiin prosentuaalisena peittävyysnäytteenä.

**Taulukko 2. Kynnsarvot, joilla havainnot jaettiin esiintyy- ja ei esiinny -luokkiin, tuloksena olevat näytemäärät näissä luokissa, eri lajien ja lajiryhmien otoskoot, sekä esiintymien osuus kokonaisnäytemäärästä.**

Laji tai lajiryhmä	Esiintyy-luokan kynnsarvo	Esiintyy	Ei esiinny	Yhteensä	Prevalenssi (esiintymien osuus kokonaisnäytemäärästä)
Liejusimpukka	48 yks/m <sup>2</sup>	491	820	1 311	0,37
Valkokatka	39 yks/m <sup>2</sup>	481	815	1 296	0,37
Surviaissääsket	43 yks/m <sup>2</sup>	473	838	1 311	0,36
Liejuputkimadot	61 yks/m <sup>2</sup>	604	707	1 311	0,46
Sinisimpukka	500 yks/m <sup>2</sup> tai 5 %	847	27 324	28 189	0,03
Haurut	10 %	2 558	30 963	33 521	0,076
Vidat	25 %	1 746	33 263	35 009	0,049
Vesisammalet	1 %	1 569	33 397	34 966	0,045
Haarukkalevä	1 %	1 347	30 649	31 996	0,042
Järviruoko	25 %	587	34 063	34 650	0,017
Näkinpartaiset	10 %	3 239	31 770	35 009	0,093
Yksivuotiset rihmalevät	25 %	5 129	29 863	34 992	0,15

## Lajit ja lajiryhmät

Lajien levinneisyysmallinuksessa, jossa selvitettiin ilmastonmuutoksen vaikutuksia lajien tulevaisuuden levinneisyyteen, käytettiin kahtatoista Merenkurkun alueella esiintyvää merkittävää lajia ja lajiryhmää. Mallinnettavien lajien valinnan perusteena olivat niiden ekologinen merkitys ja kyky muodostaa habitaatteja sekä tuottaa ekosysteemipalveluita. Ilmastonmuutoksella odotetaan olevan vaikutuksia erityisesti Itämeren suolapitoisuuteen ja lämpötilaan, joten tutkimukseen valittiin myös näiden muuttujien kannalta olennaiset lajit, joiden kohdalla muutokset olisivat todennäköisiä. Näiden lajien levinneisyysalueiden mittava supistuminen tulevaisuudessa voisi johtaa siihen, että alueella ei olisi enää kykyä tuottaa tärkeitä ekosysteemipalveluita.

**Haurut (*Fucus* spp.)**  
**Blåstång & smaltång**  
**Rakkohauru & itämerenhauru**  
**(HELCOM HUB C1)**

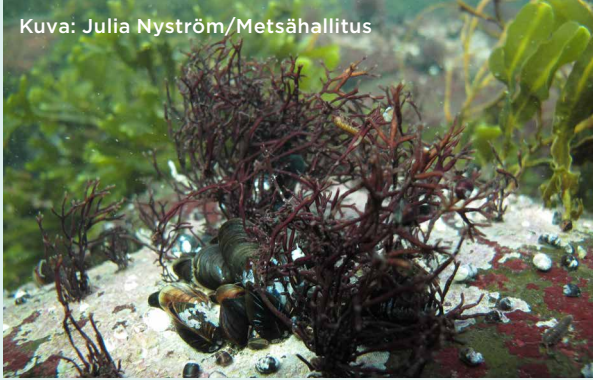


Kaksi *Fucus*-sukuun kuuluvaa lajia elää pohjoisella Itämerellä, *Fucus vesiculosus* (rakkohauru) ja *Fucus radicans* (itämerenhauru). Haurut ovat alkuperältään mereisiä makroleviä, jotka elävät kiinnittyneinä kovapintaisiin pohja-aineksiin, kuten kivikoihin ja kallioihin alueilla, joissa suolapitoisuus on yli 3–4 promillea (Kontula & Raunio 2018; Rugiu 2018). Haurut voivat esiintyä vähemmässä määrin myös kiinnittymättömässä muodossa pehmeillä pohjilla suojaisissa lahdissa, jotka katsotaan tällöin eri habitattityypiksi (HELCOM HUB Q1). Merenkurkun alue on pohjoisin esiintymisalue kummallakin lajille, sillä Perämerellä suolapitoisuus putoaa liian alhaiseksi lajeille elää. Nämä kaksi haurulajia ovat morfologisesti samankaltaisia, mutta itämerenhauru sietää rakkohaurua paremmin vähäsuo-

laisempaa vettä. Suotuisissa oloissa haurut voivat muodostaa tiiviitä ja yhtenäisiä kasvustoja noin 0,5–5 metrin syvyyteen, ja kirkkaassa vedessä lajia esiintyy jopa 10 metrin syvyydessä. Näistä morfologisesti hyvin samankaltaisista lajeista itämerenhaurua esiintyy pääasiassa Merenkurkun alueella Suomen rannikolla sekä Merenkurkun ja Selkämeren alueella Ruotsin rannikolla, kun taas rakkohauru esiintyy yleisesti kaikilla Merenkurkun eteläpuolisilla Suomen ja Ruotsin merialueilla, joissa se muodostaa habitaatteja muille lajeille (esim. Schagerström 2015). Laajoja kasvustoja muodostavina monivuotisina lajeina haurut, ja erityisesti rakkohauru, ovat yksi Itämeren avainlajeista. Ne muodostavat habitaatteja monille muille eliöille ja ylläpitävät monimuotoisuutta (esim. Wikström & Kautsky 2007). Niiden joukossa elää useita selkärangattomia lajeja (esim. *Idotea balthica*, *Jaera* spp., *Gammarus* spp., *Cerastoderma glaucum*), muita leviä (esim. *Cladophora* spp., *Ceramium* spp.) ja monia kalalajeja (esim. vaskikala, *Spinachia spinachia*, kivinilkka, *Zoarces viviparus*, merineulat, Syngnathidae). Haurukasvustot tarjoavat myös tärkeitä kutupaikkoja sekä habitaatteja kalanpoikasille ja ruokailualueita useille kalalajeille (Aneer 1989; HELCOM 2013a). Tämän lisäksi hauruilla on merkittävä rooli aineiden kierrossa, sillä ne sitovat vedestä ravinteita ja laajoina kasvustoina luovat hiilivaraston (esim. Heckwolf ym. 2021). Haurujen tulevaisuuden suurimmat uhat ovat rehevöityminen ja ilmastonmuutos (Kontula & Raunio 2018).

**Haarukkalevä**  
**Kräkel/ gaffeltång**  
**Red alga *Furcellaria lumbricalis***  
**(HELCOM HUB C2)**

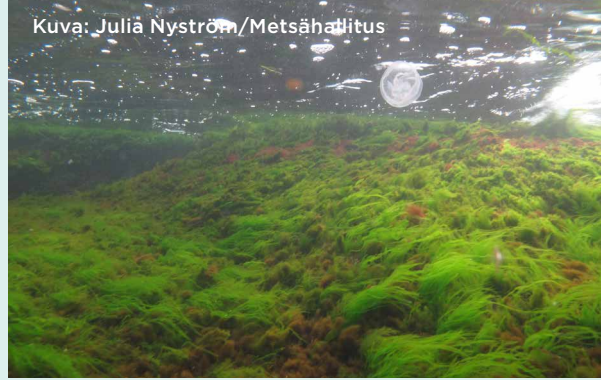
Kuva: Julia Nyström/Metsähallitus



Haarukkalevä (*Furcellaria lumbricalis*) on yleinen ja vahvarakenteinen punalevälaji, jota esiintyy lähes kaikkialla Itämerellä (HELCOM 2013c). Laji on mereistä alkuperää. Sen pohjoisin esiintymisalue rajoittuu Merenkurkkuun, josta pohjoisempaan Perämerellä suolaisuusgradientti putoaa liian alhaiseksi lajille (Kostamo 2008; Kontula & Raunio 2018). Haarukkalevä on kallioisten ja kivikkoisten merenpohjien laji, joka elää sekä haurujen muodostamalla levävyöhykkeellä että syvemmällä punalevävyöhykkeellä muiden punalevälajien kanssa, yleisimmin noin 3–8 metrin syvyydessä. Kirkkaissa vesissä se voi kuitenkin esiintyä jopa 15 metrin syvyydessä. Erityisesti syvemmissä vesissä elävä monivuotinen haarukkalevä muodostaa merkittäviä ja monimuotoisia habitaatteja, joissa elää lukuisia selkärangattomia (esim. sinisimpukka, *Mytilus trossulus x edulis*) ja monia muita merilevälajeja (esim. *Battersia arctica*, *Cladophora rupestris*, *Polysiphonia* spp.). Monet pienet selkärangattomat lajit (esim. *Jaera* spp. ja *Idotea balthica*; Kotta ym. 2000; Saarinen ym. 2018) löytävät suojaa ja ravintoa haarukkaleväkasvustoista ja pienet kalalajit ja kalanpoikaset voivat piiloutua pensaita muistuttavan kasvuston sekaan (esim. Olsson & Korpelainen 2013). Haurujen ja haarukkalevän muodostamat sekayhteisöt tarjoavat myös kutupaikkoja esimerkiksi silakalle (*Clupea harengus membras*) avoimilla ja kivikkoisilla rannoilla (Kontula & Raunio 2018). Haarukkalevä viihtyy kirkkaissa vesissä, mutta viimeisten vuosikymmenien aikana rehevöitymisen ja siitä aiheutuvan veden sameutumisen vuoksi laji on siirtynyt matalampiin vesiin. Tämän lisäksi ilmastonmuutos, liiallinen sedimentoituminen ja rihmalevien lisääntyminen uhkaavat lajia (Kontula & Raunio 2018).

**Yksivuotiset rihmalevät**  
**Ettåriga trådalger**  
**Filamentous annual algae**  
**(HELCOM HUB S1)**

Kuva: Julia Nyström/Metsähallitus



Useimmat yksivuotiset viher-, rusko-, ja punaleviin kuuluvat rihmalevälajit muodostavat habitaatteja kovapintaisille kallioisille ja kivikkoisille merenpohjille pinnalta noin 3–4 metrin syvyyteen asti (Kontula & Raunio 2018). Yleisimpiä lajeja ovat mm. *Cladophora glomerata*, *Dictyosiphon foeniculaceus*, *Ectocarpus siliculosus*, *Pylaiella littoralis* ja *Ulva* spp., ja toisinaan yhteisöissä esiintyy myös yksivuotista punalevää (esim. *Ceramium* spp.). Yksivuotisten rihmalevälajien muodostama habitatti on hyvin yleinen koko Itämeren alueella, vaikka alueilla, joissa meriveden suolapitoisuus on alhainen, lajien monimuotoisuus on vähäisempää, sillä monet lajeista ovat alkuperältään mereisiä (VELMU 2020). Yksivuotiset rihmalevät muodostavat laajoja, turkismaisia kasvustoja, jotka voivat peittää kivikkoiset ja kallioiset pinnat kauttaaltaan. Syvemmissä vesissä yksivuotisten rihmalevien vyöhyke vaihtuu haurujen muodostamaksi vyöhykkeeksi, vaikka yksivuotisia rihmaleviä esiintyy yleisesti haurukasvustoissa myös epifyytteinä (Kontula & Raunio 2018). Yksivuotiset rihmalevät muodostavat tärkeitä habitaatteja sekä tarjoavat suojaa ja ravintoa useille selkärangattomille lajeille (Zander ym. 2015; Kraufvelin & Salovius 2004). Yksivuotisten rihmalevien kasvustoissa elävä runsas selkärangattomien eläinten lajisto hyödyttää puolestaan eri kalalajeja, jotka ruokailevat kasvuston suojissa (Zander ym. 2015). Yksivuotiset rihmalevät ovat hyötyneet Itämeren kohonneista ravinnepitoisuuksista, ja epifyytteinä ne voivat tukahduttaa hauruja estämällä valon pääsyn haurujen sekovarteen (Kontula & Raunio 2018). Keväällä nopeakasvuiset yksivuotiset rihmalevät valtaavat myös uusia alueita tehokkaasti heikentäen samalla haurujen mahdollisuutta levitä uusille kasvupaikoille.

**Vesisammalet**  
**Akvatiska mossor**  
**Aquatic mosses**  
**(HELCOM HUB D)**

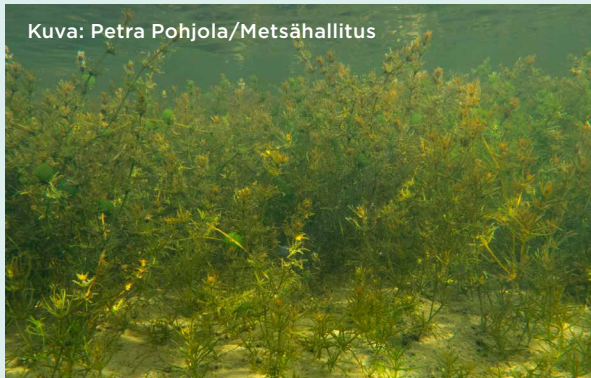
Kuva: Essi Keskinen/Metsähallitus



Vesisammalet ovat yksi Itämeren erikoisuuksista, sillä niitä esiintyy yleensä vain makeassa vedessä (Kontula & Raunio 2018). Etenkin vähäsuolaisella Perämerellä ja Merenkurkussa vesisammalet muodostavat monimuotoisia yhteisöjä kallioisille merenpohjille. Perämerellä, jossa hauruja ei esiinny veden alhaisen suolapitoisuuden vuoksi, vesisammalet muodostavat samankaltaisia habitaatteja, jotka lisäävät monimuotoisuutta kallioisilla ja kivikoisilla pohjilla. Monimuotoisuus näissä yhteisöissä ei kuitenkaan yllä hauruyhteisöjen tasolle. Vesisammalet tarjoavat habitaaatin, ravintoa ja suojaa selkärangattomille lajeille, ja matalammilla pohjilla sammalet, joiden lähellä kasvaa järviruokoa (*Phragmites australis*), ovat mieluisia elinympäristöjä hauen (*Esox lucius*) poikasille (Kallasvuo ym. 2011). Vesisammalet kasvavat pääasiassa melko avoimilla rannoilla 3–6 metrin syvyydessä. Veteen pääsevän valon määrä säätelee voimakkaasti niiden kasvusyvyttä, ja ne muodostavatkin tyypillisesti laikumaisia kasvustoja. Itämeressä kasvaa monia eri vesisammallajeja, joista yleisimpiä ovat *Fontinalis* spp., *Fissidens fontanus* ja *Oxyrrhynchium speciosum* (VELMU 2020). Vesisammallajien kirjo on moninainen siirryttäessä avomereltä kohti jokisualueita. Itämeressä kasvavien vesisammallajien tuntemus on ollut melko puutteellista, ja jopa aivan viime vuosina Perämereltä on löydetty lajeja, joita ei ole aiemmin osattu tunnistaa pohjoisella Itämerellä (Bergdahl ym. 2020). Monivuotisina lajeina vesisammallilla on merkitystä myös hiilen ja ravinteiden sidonnassa. Vesisammallajeja uhkaavat liiallinen sedimentaatio ja voimakas rihmalevien leviäminen (Kontula & Raunio 2018).

**Näkinpartaiset**  
**Kransalger**  
**Stoneworts**  
**(HELCOM HUB B4)**

Kuva: Petra Pohjola/Metsähallitus



Näkinpartaislevät (Charales) ovat makeassa vedessä ja murtovedessä elävien viherlevien lahko, mutta ne muistuttavat ulkonäöltään enemmän putkilokasveja kuin leviä (Schubert & Blindow 2003). Suomen ja Ruotsin rannikoilta tavataan useita lajeja neljästä eri suvusta *Chara*, *Nitella*, *Nitellopsis* ja *Tolypella*. Näkinpartaiset muodostavat niittymäisiä habitaatteja sekä suojaisille alueille, kuten mutapohjaisiin lahtiin ja fladoihin, että hiekkapohjaisille avoimemmille alueille (Kontula & Raunio 2018; HELCOM 2013d). Suurikokoisemmat lajit viihtyvät suojaisemmillä alueilla, ja niiden muodostamat niittymäiset kasvustot ovat korkeampia ja kerrostuneempia kuin avoimemmillä rannoilla kasvavien lajien muodostamat kasvustot. Näkinpartaislevien muodostamat vedenalaiset niityt ovat tärkeitä habitaatteja selkärangattomille ja kalalajeille tarjoten niille ravintoa ja suojaa. Erytyisesti suojaisilla alueilla näkinpartaiskasvustot toimivat kalojen kutualustoina ja tärkeinä elinympäristöinä kalanpoikasille (Viitasalo ym. 2017; Kontula & Raunio 2018). Tiheät ja laajat näkinpartaisniityt pidättävät sedimenttiä tehokkaasti paikallaan, sitovat ravinteita vedestä ja parantavat vedenlaatua (Blindow ym. 2002; Appelgren & Mattila 2005). Tämän lisäksi näkinpartaislajit voivat tuottaa yhdisteitä, jotka rajoittavat sinilevien ja muiden kasviplanktonlevien kasvua (Berger & Schagerl 2003). Lajit reagoivat herkästi liialliseen sedimentaatioon, rihmalevien lisääntymiseen, veden sameuteen ja vilkkaan meriliikenteen vaikutuksiin (Kontula & Raunio 2018).

**Vidat**  
**Nateväxter**  
**Pondweeds**  
**(HELCOM HUB B1)**

Kuva: Maja Wressel



Itämeressä esiintyy useita vitalajeja, mutta laajimmalle levinneitä ja runsaskasvuosimpia niistä ovat hapsivita *Stuckenia pectinata* ja ahvenvita *Potamogeton perfoliatus* (Mossberg & Stenberg 2012). Nämä lajit esiintyvät laajalti sekä makeanveden ympäristöissä että murtovesialueilla, ja sopeutuvina lajeina niitä tavataan lähes koko Itämeren rannikkoalueilla (GBIF 2021a). Hiekkainen ja mutainen pohja-aines on ihanteellinen kasvuympäristö molemmille lajeille, ja sopivissa olosuhteissa ne voivat muodostaa laajalle levinneitä ja yhtenäisiä kasvustoja (Kontula & Raunio 2018). Lisäksi molemmat lajit kasvavat korkeiksi, minkä vuoksi vitayhteisöt tarjoavat tärkeitä laajoja habitaatteja muille lajeille. Niiden joukossa elää useita selkärangattomia lajeja ja kaloja, jotka löytävät niistä suojaa ja ravintoa (Hansen ym. 2011; Hansen 2010). Vidat tarjoavat myös kutupaikkoja monille kaloille, esimerkiksi silakalle (Kääriä ym. 1997; Rajasilta ym. 1993) ja ahvenelle (*Perca fluviatilis*; Snickars ym. 2010). Myös muut vesikasvit viihtyvät vitojen joukossa, mikä lisää kasvustojen monimuotoisuutta. Monivuotiset vidat pidättävät sedimenttiä paikallaan ja ehkäisevät eroosiota (Zhang ym. 2020), tehostavat mikrobien toimintaa sedimentissä (Caffrey & Kemp 1990), vähentävät veden sameutta ja vaikuttavat veden kemialliseen koostumukseen sitomalla ravinteita (esim. Austin ym. 2017). Mahdollisia tulevaisuuden uhkia lajeille ovat vesien liiallinen rehevöityminen ja moottoroitu vesiliikenne, joka voi tuhota lähelle pintaa yltäviä kasvustoja ja samentaa vettä (Kontula & Raunio 2018).

**Järviruoko**  
**Bladvass**  
**Common reed**  
**(HELCOM HUB A1)**

Kuva: Linda Jokinen Thai/Metsähallitus



Järviruoko (*Phragmites australis*) on laajalle levinnyt kosteikkojen ja rantojen laji, joka voi kasvaa jopa 4-metriseksi ja muodostaa laajoja ja yhtenäisiä kasvustoja Itämeren rannoille (Hämet-Ahti ym. 1998). Se viihtyy monilla erilaisilla pohja-aineksilla ja erilaisissa ympäristöolosuhteissa, mutta vaatii kasvupaikoikseen melko suojaisia rantoja (Kontula & Raunio 2018). Järviruoko on ensisijaisesti makeaan veteen sopeutunut kasvi, mutta sietää hyvin myös murtovesiympäristöä. Monet lintulajit elävät ja lisääntyvät ruovikoiden elinympäristöissä, esimerkiksi ruokokertuset (*Acrocephalus* spp.), luhtakana (*Rallus aquaticus*) ja kaulushaikara (*Botaurus stellaris*). Järviruokokasvustot tarjoavat lisäksi suojaa ja ravintoa monille kalalajeille, sammakoille ja lepakoille, ja juuri kaloille ne ovat erityisen tärkeitä kutupaikkoina ja kalanpoikasten kasvuympäristöinä (esim. ahven, Snickars ym. 2010; hauki, Kallasvuo ym. 2011). Selkärangattomien lajien monimuotoisuus on runsasta järvi-ruokokasvustoissa (Ikonen & Hagelberg 2007). Rehevöityminen ja perinteisen karjan laidunnuksen väheneminen rannoilla on edistänyt järviruoko' on leviämistä, ja nykyisin se muodostaakin tiheämpiä kasvustoja ja on levinnyt uusille alueille (Niemelä 2012). Tämä on puolestaan vaikuttanut epäsuotuisasti erityisesti rantaniittyjen kasvilajien monimuotoisuuteen, kun järviruoko kookkaana ja nopeakasvuisena lajina on vallannut muilta lajeilta elintilaa. Järviruoko'olla on tärkeä rooli muun muassa rantojen ravinteiden kierrätyksessä (Struyf ym. 2007; Paavilainen 2005; Karstens 2016), typen sidonnassa ja eroosion hillitsijänä (Karstens 2016).

**Sinisimpukka**  
**Blåmussla**  
**Blue mussel**  
**(HELCOM HUB E1)**



Kuva: Essi Keskinen/Metsähallitus

Sinisimpukka (*Mytilus trossulus x edulis*) on yksi tärkeimmistä Itämerellä elävistä avainlajeista. Se elää kallioisilla ja kivisillä pohjilla erityisesti ulkosaariston riutoilla ja viihtyy alueilla, joissa merivirrat ja aallokot ovat voimakkaita (Viitasalo ym. 2017). Alkuperältään mereisenä lajina sinisimpukka tarvitsee vettä, jonka suolapitoisuus on yli 4 promillea. Jotta se voi muodostaa tiiviitä ja laajoja habitaatteja, on veden suolapitoisuuden oltava jopa tätäkin korkeampi, vähintään 5 promillea. Merenkurkun alue on pohjoisin lajin levinneisyysalue Itämerellä. Itämeren sinisimpukka on kahden merilajin, *M. trossulus*- ja *M. edulis* -lajien, hybridi (Waldeck & Larsson 2013), ja se kasvaa pienemmäksi kuin nämä meressä elävät sukulaislajinsa, vain noin 1–4 senttimetrin pituiseksi (Kontula & Raunio 2018). Laji muodostaa habitaatteja erityisesti hauru- ja punalevävyöhykkeiden alapuolella noin 8–12 metrin syvyydessä, mutta suotuisissa olosuhteissa se voi elää myös matalammilla tai syvemmillä pohjilla (Westerbom & Jattu 2006; Viitasalo ym. 2017). Sinisimpukkoita tavataan usein myös sekayhteisöissä, joita se muodostaa muiden kovilla merenpohjilla elävien lajien, esimerkiksi punalevien, kanssa. Sinisimpukat muodostavat ja ylläpitävät habitaatteja monille muille lajeille ja tarjoavat niille suojapaikkoja ja ravintoa (esim. Zander ym. 2015; Kautsky 1981). Yli 40:n makro-selkärangattomiin kuuluvan lajin (mm. katkat, siirat ja kotilot; Viitasalo ym. 2017) on havaittu elävän sinisimpukkayhteisöissä. Sinisimpukat ovat tärkeä ravinnon lähde useille linnuille (esim. haahka, *Somateria mollissima*, alli, *Clangula hyemalis*) ja kalalajeille (esim. kampela, *Platichthys flesus*, ja kiviiniikka; Kautsky 1981; Kontula & Raunio 2018). Simpukat suodattavat vedestä kasviplanktonia ja

muuta mikro-organismeja ravinnokseen ja samalla puhdistavat ja kirkastavat vettä tämän prosessin aikana (Viitasalo ym. 2017). Lajin kyky suodattaa vettä on valtava, ja niihin kertyykin suuria määriä sekä ravinteita että saasteita (Kautsky & Kautsky 2000). Ilmastonmuutos (kohoavat lämpötilat ja veden alhaisemmat suolapitoisuudet), rehevöitymiseen liittyvät tekijät (sedimentaatio ja rihmalevien runsastuminen), kilpailu vieraslajin kanssa (merirokko, *Amphibalanus improvisus*) sekä saasteet uhkaavat sinisimpukkaa tulevaisuudessa (Kontula & Raunio 2018).

**Liejusimpukka**  
**Östersjömussla**  
**Baltic clam**  
**(HELCOM HUB L1)**



Kuva: Petra Pohjola/Metsähallitus

Itämeren kaikkein laajimmalle levinnein simpukkalaji, liejusimpukka (*Limecola balthica*), elää hiekkaisissa ja mutaisissa pohjasedimenteissä jopa 190 metrin syvyyteen asti (Viitasalo ym. 2017; Kontula & Raunio 2018). Runsaimmin lajia esiintyy kuitenkin 2–5 metrin syvyydessä. Tämä merilaji kykenee elämään vedessä, jonka suolapitoisuus on hyvin alhainen, ja sietää murtovesiolosuhteita, joissa suolapitoisuus voi olla jopa vain 3 promillea. Näin ollen lajin esiintymisalue yltää Merenkurkusta pohjoiseen ja lajia tavataan siis myös Perämeren eteläosissa. Liejusimpukka sopeutuu helposti erilaisiin ympäristöolosuhteisiin, ja vaikka se on varsin pienikokoinen laji, joka kasvaa vain noin 2 senttimetrin pituiseksi, se on yksi tärkeimmistä selkärangattomista pohjaeläinlajeista Itämerellä. Liejusimpukka on pohjaeliöyhteisöissä yleensä biomassaltaan dominoiva laji, ja suotuisimmissa pohjaolosuhteissa yhdellä neliometrillä voi esiintyä jopa tuhansia yksilöitä (esim. Viitasalo ym. 2017; Laine 2003). Liejusimpukka on merenpohjaan kaivautuva simpukkalaji, joka kurottaa vain

sifoninsa sedimentin pintaan. Se liikkuu aktiivisesti sedimentissä parantaen näin hapen kulkeutumista syvemmälle pohja-ainekseen, mikä parantaa sedimentin kykyä sitoa fosforia. Liejusimpukka hajottaa orgaanista ainesta, ja sillä on näin ollen tärkeä rooli sedimentin ja veden rajapinnassa tapahtuvissa biogeokemiallisissa prosesseissa (Heilskov ym. 2006; Michaud ym. 2006). Se on myös tärkeä ravinnon lähde monille lintu- ja kalalajeille (Mustamäki ym. 2014; Lappalainen ym. 2004; Ejdung & Bonsdorff 1992). Lajin mahdollisia tulevaisuuden uhkia ovat hapettomat pohjaolosuhteet, ja tietyillä Itämeren alueilla hapettomuus on jo vaikuttanut lajin esiintymissyvyyteen (Kontula & Raunio 2018).

#### Valkokatka

##### Vitmärla

**Amphipod *Monoporeia affinis***  
(HELCOM HUB N1)



Kuva: Ari O. Laine

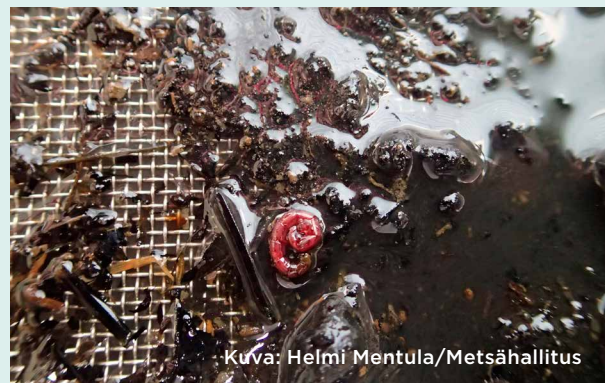
Katkalajeista valkokatka (*Monoporeia affinis*) on olennainen osa syvien ja pehmeäpohjaisten Itämeren alueiden pohjaeläinyhteisöä (Viitasalo ym. 2017). Se on alun perin makeanveden laji ja jääkauden reliktilaji, joka jäi viimeisen jääkauden jäänteinä Itämereen. Se sietää merivettä, jonka suolapitoisuus on jopa 18 promillea (HELCOM 2013b). Lajin levinneisyysalue kattaa lähes koko Itämeren kaikkein eteläisimpiä alueita lukuun ottamatta. Valkokatka on kylmien vesien laji, joka elää pehmeäpohjaisilla merialueilla noin 10 metrin syvyydestä jopa 200 metrin syvyyteen, vaikka Itämeren pohjoisosissa sitä esiintyy myös matalammassa vesissä (HELCOM 2013b). Laji kaivautuu aktiivisesti sedimenttiin ja käyttää ravinnokseen pohjaan vajoavaa planktonia ja muuta detritusta eli kuolleiden kasvien ja eläinten hajoamistuotteita. Katkojen kaivautuessa pohjaan sedimentti hapettuu tehokkaasti ja siihen sitoutuu enemmän fosforia. Valkokatka reagoi herkästi pohjien

matalaan happipitoisuuteen, minkä vuoksi laji on hävinnyt joiltakin sen esiintymisalueilta ympäristön alhaisten happipitoisuuksien vuoksi (Kontula & Raunio 2018). Valkokatkaa esiintyy runsaimmin pohjoisella Itämerellä ja erityisesti Pohjanlahdella, jossa pohjan happiolosuhteet ovat hyvät. Suotuisissa olosuhteissa yhdellä neliömetrillä voi olla jopa 10 000 yksilöä (Donner ym. 1987; Bonsdorff ym. 2003; Viitasalo ym. 2017). Laji on tärkeä ravinnon lähde muille selkärangattomille (esimerkiksi siiroihin kuuluva killki, *Saduria entomon*) ja kaloille (esim. silakka ja kuore, *Osmerus eperlanus*, sekä siika, *Coregonus lavaretus*; Hägerstrand ym. 2018; Donner ym. 1987; Englund ym. 2008).

#### Surviaissääskien toukat

##### Fjädermyggslarv

**Chironomid larvae**  
(HELCOM HUB P)



Kuva: Helmi Mentula/Metsähallitus

Surviaissääsket muistuttavat ulkonäöltään hyttysiä, mutta eivät pistä. Niitä elää kaikkialla maapallolla, ja lajinsisäinen monimuotoisuus on suurta (GBIF 2021b). Aikuiset yksilöt ovat pieniä lentäviä hyönteisiä, jotka parveilevat usein veden yllä ja rantojen kasvillisuuden seassa. Niiden toukat elävät hautautuneina pohjasedimenttiin sekä makeanveden ympäristöissä että murtovesialueilla (Viitasalo ym. 2017; Kontula & Raunio 2018). Useimpien surviaissääskilajien toukat ovat kooltaan hyvin pieniä, vaikka joidenkin suurimpien lajien yksilöt voivat kasvaa jopa 3 senttimetrin pituisiksi. Lajista riippuen surviaissääskien toukilla on erilaisia ravinnonhankintatapoja. Sedimentin kuollut orgaaninen aines tarjoaa useille lajeille ravintoa, mutta toisten lajien toukat ovat saalistajia tai loisia (Kahanpää & Salmela 2021). Matalissa rannikkovesissä surviaissääskien toukat elävät sekayhteisöissä muiden pohjaeläinlajien, kuten monisukasmatojen ja simpukoiden (esim. *Limecola balthica*), sekä muiden



vesihyönteisten ja niiden toukkien kanssa (Kontula & Raunio 2018). Syvempien vesien etenkin vähempi happisilla alueilla surviaissääskien toukista tulee dominoivia pohjaeliöyhteisöissä, ja yhdellä neliömetrillä voi elää jopa tuhansia yksilöitä (Viitasalo ym. 2017). Toukkien väritys vaihtelee lajin mukaan vihreästä ja keltaisesta punaiseen. Syvemmillä vesialueilla esiintyy erityisesti punaisen värisiä toukkia, sillä niissä on hemoglobiinin kaltaista ainetta, joka sitoo tehokkaasti happea ja auttaa punaisia toukkia selviytymään olosuhteissa, joissa happipitoisuus on hyvin alhainen. Surviaissääskien toukat ovat tärkeä ravinnon lähde eri kalalajeille, esim. ahvenelle (Mustamäki ym. 2014; Lappalainen ym. 2001), kampilalle (Uzars ym. 2003) ja siialle (Hägerstrand ym. 2018). Suuri määrä surviaissääskien toukkia edistää orgaanisen aineksen hajoamista sedimentissä (Andersen & Skovgaard 1991), ja niillä on myös tärkeä rooli ravinteiden kierrätyksessä (esim. Vanni 2002). Itämeren rehevöityminen on todennäköisimmin lisännyt surviaissääskien dominoimia habitaatteja (Kontula & Raunio 2018).

**Liejuputkimadot**  
**Nordamerikansk havsborstmask**  
**Polychaete *Marenzelleria* spp.**  
**(HELCOM HUB M3)**



Kuva: Metsähallitus

Liejuputkimadot (*Marenzelleria* spp.) ovat monisukasmatoihin kuuluvia vieraslajeja, jotka ovat todennäköisesti kulkeutuneet Itämerelle alun perin laivojen painolastiveden mukana ja jotka elävät nyt pehmeässä pohjasedimentissä koko Itämeren alueella (Katajisto ym. 2021). Pohjoisella Itämerellä Suomen ja Ruotsin vesillä elää kolme keskenään hyvin samankaltaista liejuputkimatolajia: *M. viridis*, *M. neglecta* ja *M. arctica*. *M. viridis* ja *M. neglecta* ovat alun perin lähtöisin Pohjois-Amerikasta, ja *M. arctica* on lähtöisin Jäämereltä, ilmeisesti Venäjän suurten jokien suistoalueilta (Katajisto ym. 2021). Liejuputkimadot voivat kasvaa jopa 10 senttimetrin pituisiksi, mutta vain muutamien senttimetrin pituiset ja sitäkin lyhyemmät madot ovat paljon yleisempiä. Liejuputkimadot ovat menestyneet hyvin Itämerellä (HELCOM 2012). Ne elävät pehmeillä pohjasedimenteillä sekä matalammissa että syvemmissä vesissä, ja erityisesti syvemmissä vesissä niitä voi esiintyä pohjalla hyvinkin runsaasti (Zettler ym. 2002; Kauppi ym. 2015). Liejuputkimadot kaivautuvat pohjasedimenttiin ja käyttävät ravinnokseen kuollutta orgaanista ainesta. Tässä prosessissa ne muodostavat syviä ja laajoja putkimaisia tunneleita, jotka edistävät hapen kulkeutumista sedimenttiin, mikä puolestaan edistää fosforin sitoutumista. Näiden vieraslajien on pelätty syrjäyttävän Itämeren kotoperäiset pehmeän pohjan selkärangattomat lajit, mutta tästä ei ole saatu selkeää tutkimusnäyttöä (Katajisto ym. 2021).

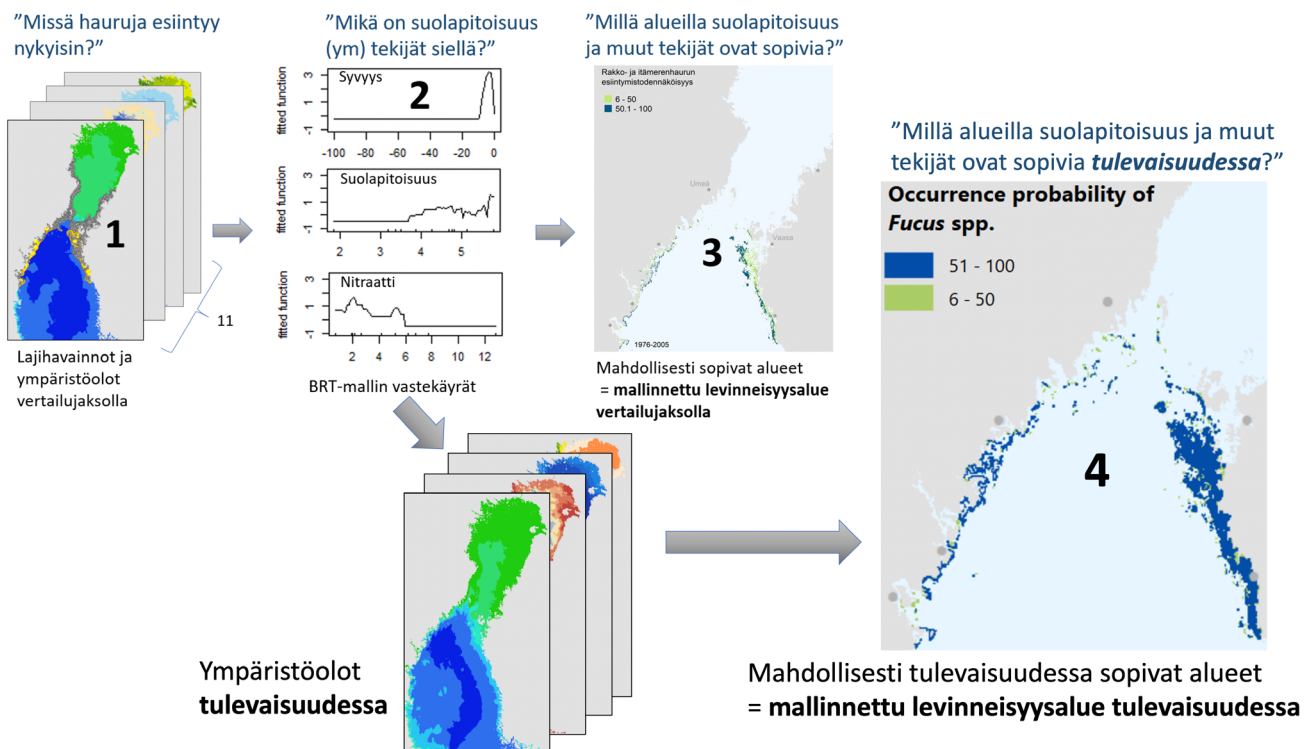
### 4.3. Mallinnus

Lajien levinneisyysmallinnus on mallinnustekniikka, jossa lajille suotuisat ympäristöolosuhteet päätellään inventointiaineiston perusteella ja yleistetään alueille, joilla inventointeja ei ole tehty. Toisin sanoen tavoitteena on ennustaa, missä lajia voisi esiintyä ympäristöolosuhteiden perusteella. Suotuisat ympäristöolosuhteet määritellään aineistona käytettävien kenttähavaintojen perusteella. Näin esiintymistä kuvaavasta pisteaineistosta voidaan tuottaa kartta, joka kuvaa lajin ennustettua esiintymistodennäköisyyttä laajemmalla alueella.

Tässä tutkimuksessa käytettiin 12 tutkimuslajin inventointiaineistoa yhdessä 11:n paikallisia olosuhteita kuvaavan ympäristömuuttujan kanssa. Kaksi ympäristömuuttujaa, syvyys ja merenpohjan avoimuus, perustuivat hankealueesta aiemman SeaGIS2.0-hankkeessa laadittuihin karttoihin, ja lisäksi tässä hankkeessa tuotettiin uutena muuttujana etäisyys rannikkoon. Loput kahdeksan meriveden ominaisuuksia kuvaavaa

muuttujaa perustuivat Ilmatieteen laitoksen ja SMHI:n Itämeren fysikaalisia ja biogeokemiallisia ominaisuuksia kuvaaviin malleihin. Nämä muuttujat olivat suolapitoisuus, lämpötila, jään paksuus, valon pystysuora vaimeneminen vedessä sekä happi-, typpi- (NO<sub>3</sub>), ammoniakki- (NH<sub>4</sub>) ja fosfaattipitoisuudet (PO<sub>4</sub>).

Tutkimuksessa pyrittiin selvittämään, kuinka eri lajit reagoisivat ilmastonmuutokseen. Tätä varten laadittiin kahdet mallit, jotka kuvasivat lajien levinneisyyttä vertailujaksolla ja tulevaisuudessa ja joita verrattiin keskenään (Kuva 3). Vertailujaksoksi määriteltiin 30 vuoden ajanjakso vuodesta 1976 vuoteen 2005 ja tulevaisuutta kuvaavaksi ajanjaksoksi 30 vuoden ajanjakso vuodesta 2070 vuoteen 2099. Vertailujakson ajoitus perustuu ilmastomallien pohjana olevaan CMIP5-pakotetdataan, eikä sitä voitu muuttaa. Pohjanlahden ympäristöolosuhteet, kuten ravinnetasot, eivät kuitenkaan ole dramaattisesti muuttuneet vertailujakson ja nykyhetken eli noin vuosien 2004–2020 välillä, jolta ajalta suurin osa lajidatasta on kerätty. Siksi tiedonkeruun ja mallinnettujen ympäristöolosuhteiden



Kuva 3. Havainnekuva lajien levinneisyyden mallintamisen tärkeimmistä vaiheista, esimerkkinä haurut. 1: Havainnot siitä, missä lajia esiintyy ja ei esiinny, yhdistetään ympäristömuuttujiin, esimerkiksi suolapitoisuuteen. 2: BRT-mallinnusprosessissa päätellään näistä tiedoista lajien vaste eri ympäristömuuttujiin, esimerkiksi se, että hauruja esiintyy todennäköisemmin näyteenottoaikoissa, joissa suolapitoisuus on korkeampi. 3) Vaiheessa 2 mallinnettujen vasteiden avulla tunnistetaan ympäristömuuttujia kuvaavista kartoista alueita, joissa olosuhteet muistuttavat olosuhteita niissä paikoissa, joissa hauruja esiintyy. 4) Vaihe 3 toistetaan käyttämällä mallinnettuja tulevaisuuden olosuhteita.

ajallinen epäsuhta ei vaikuta merkittävästi mallinnusprosessin luotettavuuteen.

Molempien ajanjaksojen, sekä vertailujakson että tulevaisuuden, keskimääräiset kasvukauden (touko-syyskuu) arvot laskettiin kaikille ympäristömuuttujille Ilmatieteen laitoksen ja SMHI:n mallien perusteella. Jään paksuudelle käytettiin joulukuun keskiarvoa. Ravinnepitoisuudet laskettiin sekä veden pintakerroksessa (0–3 metriä) että pohjaa lähimmässä vesikerroksessa. Muut muuttujat laskettiin vain joko pinnasta (jään paksuus) tai pohjasta (suolapitoisuus, lämpötila ja happipitoisuus). Molemmille ajanjaksoille käytettiin samoja arvoja muuttujille syvyys, merenpohjan avoimuus ja etäisyys rannikkoon, joten näiden kolmen muuttujan ei oletettu muuttuvan vertailujakson ja tulevaisuuden välillä.

Lajien levinneisyysmallit laadittiin BRT-mallinnuksella (Boosted Regression Trees). BRT on edistynyt additiivinen regressiomallinnusmenetelmä, joka yhdistää regressiopuupohjaisen tilastollisen lähestymistavan boosting-metodiin, jossa hyödynnetään suurta määrää suhteellisen yksinkertaisia regressiopuumalleja (Elith ym. 2008). Tämän seurauksena BRT-malleilla on useita etuja, mukaan lukien se, että niillä voidaan mallintaa epälineaarisia vasteita sekä käsitellä erilaisen ennustavien muuttujien luokkia ja niiden välisiä vuorovaikutuksia – ja mikä tärkeintä, näillä malleilla on hyvä ennustevoima (Elith ym. 2008). BRT-mallit ajettiin R-ohjelmointiympäristössä (R Core team 2019) käyttämällä R-kielen pakettien ”gbm” (Greenwell ym. 2019) ja ”dismo” (Hijmans ym. 2017) funktioita. R-paketteja voidaan kuvata työkalupakeiksi, jotka tarjoavat työkaluja (eli funktioita) eri tarkoituksiin, kuten tässä

tapauksessa lajien levinneisyyden mallinnukseen. Puun kompleksisuuden ja oppimismopeuden arvot valittiin siten, että malleissa oli pienin mahdollinen devianssi ja vähintään 1 000 puuta. Malleissa käytettiin jokaisella iteraatiokierroksella 75 prosenttia havainnoista. 70:tä prosenttia havainnoista käytettiin mallien kouluttamiseen ja 30:tä prosenttia mallien suorituskyvyn arvioimiseen. Otokoot on esitetty Taulukossa 2.

Kaikki selittävät muuttujat sisällytettiin alun perin malleihin, paitsi jos niillä oli liian korkea multikollineariteettia mittaava arvo (Variance inflation factor, VIF), jolloin ne jätettiin pois. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että malleihin vältettiin sisällyttämästä erittäin korreloituneita muuttujia, vaikka BRT-mallit eivät olekaan herkkiä muuttujien välisille korrelaatioille. Keskeiset muuttujat eli suolapitoisuus, lämpötila, nitraatti ja fosfaatti sisällytettiin kuitenkin aina malleihin, vaikka niillä olisi korkea VIF-arvo. Jokaisen mallin lopulliset muuttujat (Taulukko A2) valittiin alkuperäisistä muuttujista funktiolla ”gbm.simplify” siten, että vain mallin suorituskykyä parantavat muuttujat otettiin mukaan ja ne, jotka eivät parantaneet sitä, jätettiin pois.

Lajien levinneisyyden mallinnus tehtiin jokaiselle lajille erikseen ja selittävinä tekijöinä käytettiin vain ympäristömuuttujia. Toisin sanoen mallit eivät ota huomioon lajien välisiä vuorovaikutuksia. Toinen puute liittyy siihen, että malleissa ei huomioitu pohjan laatua, koska koko tutkimusalueen kattavia tarpeeksi tarkkoja karttoja ei ollut saatavilla. Näistä syistä malleilla on taipumus yliarvioida mallinnetuille lajeille suotuisaa aluetta, sillä pohjan laatua ja esimerkiksi haurujen ja rihmalevien välistä kilpailua ei ole otettu huomioon.

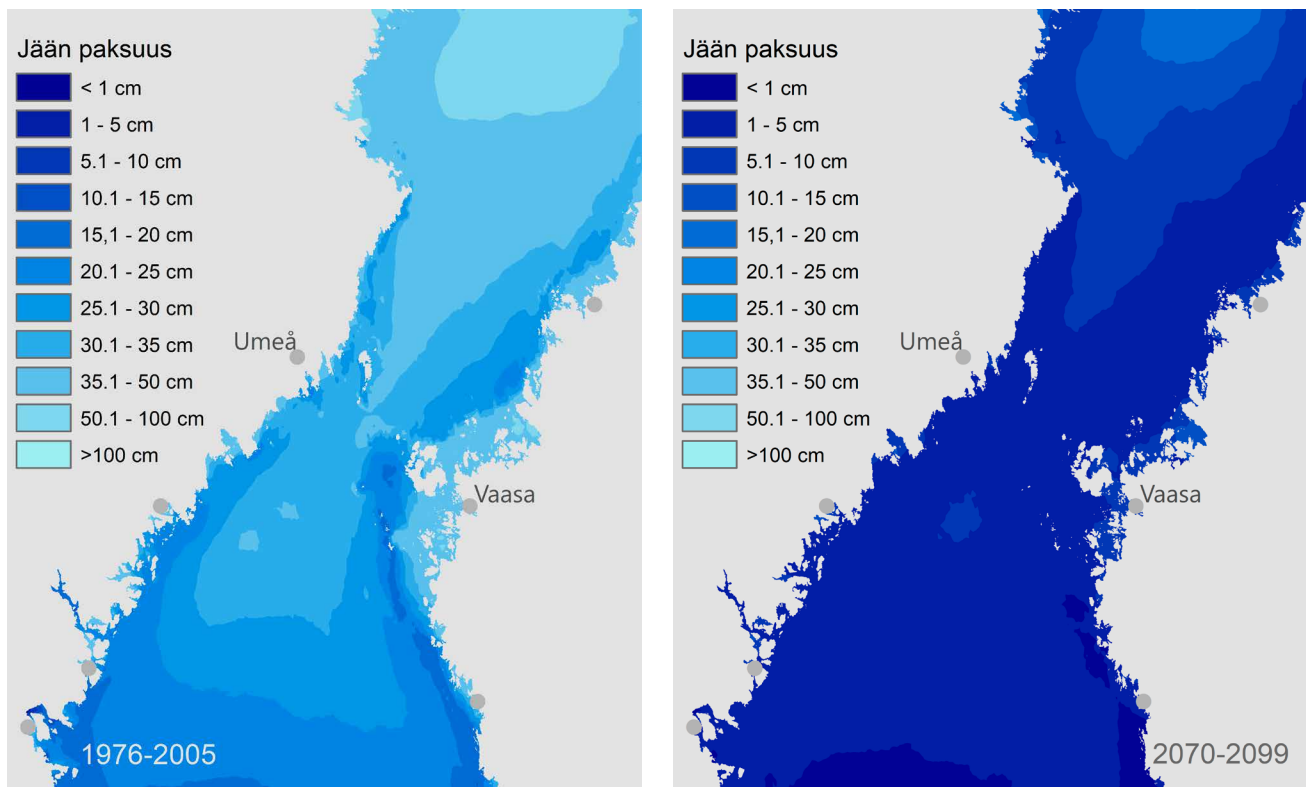
# 5. Tulokset

## 5.1. Muutokset ympäristömuuttujissa

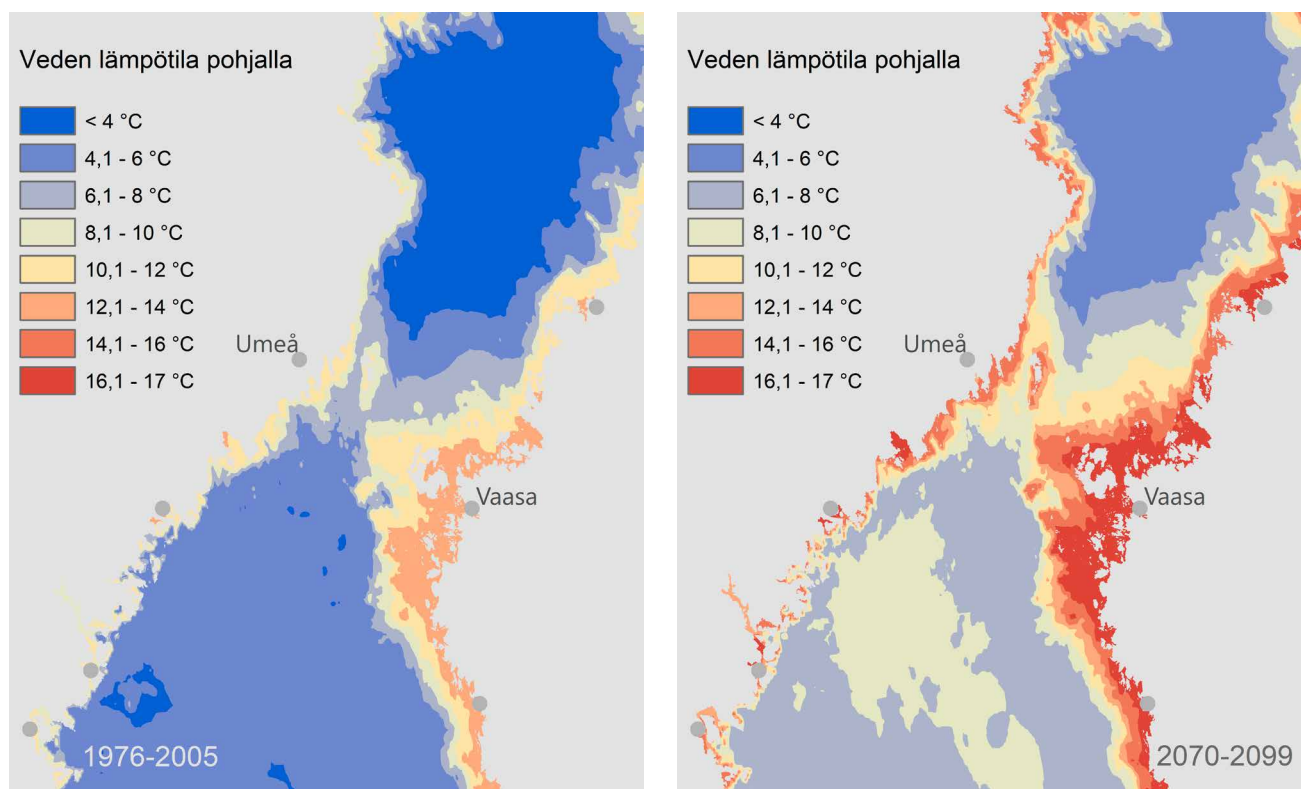
Ilmastomallien mukaan keskimääräiset kasvukauden olosuhteet Pohjanlahdella ovat tulevaisuudessa olennaisesti erilaiset kuin aiemmin. Vertaamalla mallinnettuja keskimääräisiä olosuhteita vertailujaksolla (1976–2005) ja tulevaisuudessa (2070–2099) havaittiin, että ilmastomuutoksen ennustetut vaikutukset meriympäristöön ovat linjassa useiden aikaisempien tutkimusten kanssa (ks. esim. katsausartikkelit Helcom & Baltic Earth 2021; Meier ym. 2021), luonnollisesti erityisesti niiden tutkimusten kanssa, joissa on käytetty samaa RCO-SCOB1-mallia (Saraiva ym. 2019a, b). On pidettävä mielessä, että näihin tuloksiin samoin kuin koko raportin tulevaisuuden ennusteisiin ja erityisesti

ilmastomalleihin liittyy monia epävarmuustekijöitä. Tutkimustuloksiin vaikuttavat luonnollisesti myös käytetyt skenaariot RCP8.5 ja BSAP. Suurimmat muutokset koskevat merijäätä ja veden lämpötilaa, joihin ilman lämpötilan nousu vaikuttaa suoraan.

**Merijää** tulee olemaan tulevaisuuden talvina ohuempaa. Keskimäärin yli 80 prosenttia jään paksuudesta häviää hankealueella vuoteen 2099 mennessä (Kuva 4). Tämä on seurausta useista samanaikaisista ja toisiinsa liittyvistä muutoksista. Avomeri ei jäädy joka talvi, ja jääpeitteen kesto on lyhyempi. Myös aikoina, jolloin meri on jään peittämä, jää on keskimäärin huomattavasti ohuempaa kuin vertailujaksolla. Kaikki nämä muutokset johtavat voimakkaaseen keskimääräisten olosuhteiden heikkenemiseen. Merijää ei kui-



Kuva 4. Mallinnettu keskimääräinen jään paksuus talvisin vertailujaksolla (vasemmalla) ja tulevaisuudessa (oikealla).



**Kuva 5. Pohjaa lähimmän vesikerroksen lämpötilan odotetaan nousevan kasvukaudella (touko-syyskuu) keskimäärin 3°C vertailujaksosta (vasemmalla) verrattuna tulevaisuuteen (oikealla).**

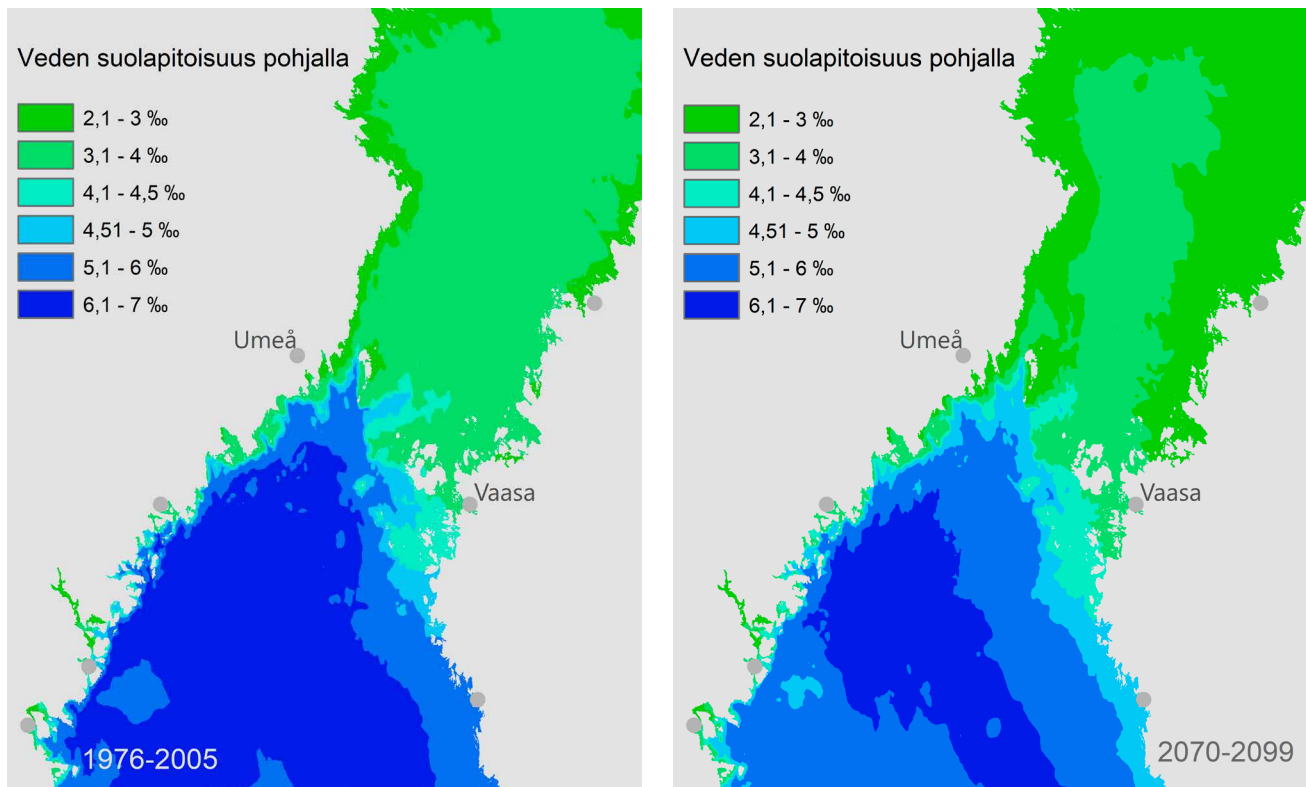
tenkaan häviää kokonaan, mutta talvet, joiden aikana jääpeite on ohut, kestää vain vähän aikaa tai puuttuu kokonaan, ovat yleisempiä.

**Pohjaa lähellä olevan veden keskilämpötila** kasvukauden aikana nousee hankealueella keskimäärin 3 °C. Tämä muutos on vielä suurempi matalilla alueilla ja vastaavasti pienempi syvemmällä vesialueilla (Kuva 5). Yleisesti ottaen ennusteita tulevasta (veden) lämpötilasta pidetään luotettavampina ja tarkempina kuin ennusteita muista ympäristömuuttujista, kuten suolapitoisuudesta, joihin kasvihuonekaasupitoisuuksien kasvu ei vaikuta suoraan vaan vain välillisesti. Merijään ja veden lämpötilan muutokset ovat varmempia muihin ympäristötekijöihin verrattuna.

**Suolapitoisuutta** pidetään tärkeimpänä abioottisena tekijänä, joka muuttaa sekä makean veden lajien että merilajien levinneisyyttä hankealueella ja erityisesti Merenkurkussa. Siksi suolapitoisuuden tulevat muutokset ovat erityisen mielenkiintoisia ja tärkeitä. Valitettavasti suolapitoisuus on tässä käsitellyistä muuttujista kaikista epävarmin. Suolapitoisuutta on vaikea mallintaa, sillä siihen vaikuttavat monimutkaiset fyysiset tekijät useiden toisiinsa kytkeytyneiden prosessien kautta.

Pohjaa lähimmän vesikerroksen suolapitoisuuden ennustettu keskimääräinen lasku hankealueella on -0,52 promillea eli -10 prosenttia vertailujaksoon verrattuna (Kuva 6.). Tämä ennustettu muutos on huomattavasti pienempi kuin joissakin aikaisemmissa malleissa (esim. Meier ym. 2006). Uudemmissa tutkimuksissa (Helcom & Baltic Earth 2021, Meier ym. 2021) suolapitoisuuden on kuitenkin ennustettu laskevan vain vähän. Niissä on myös huomattavaa vaihtelua mallien välillä eikä varmaa ole edes se, nouseeko vai laskeeko suolapitoisuus. Näissä viimeisimmissä arvioissa korostetaan entistä enemmän sitä, että tulevaisuudessa suolapitoisuutta koskevissa ennusteissa on suurta epävarmuutta.

Koska tässä raportissa on valittu keskittyä tulevaisuuteen, jossa ravinnekuormitus on vähentynyt BSAP:n mukaisesti, mallit ennustavat meriveden fosfaattipitoisuuden ( $PO_4$ ) huomattavaa laskua. **Fosfaattipitoisuus** hankealueella laskee noin 80 prosentilla. Tämän seurauksena myös perustuotanto vähenee, mikä johtaa **nitraattipitoisuuden ( $NO_3$ )** nousuun kasviplanktonin pienemmän kulutuksen vuoksi. Meriveden nitraattipitoisuuden kasvu kasvukauden aikana ei siis tarkoita lisääntynyttä maalta peräisin olevaa ravinnekuormitusta (koska tutkimuksessa käytetty ravinneskenaario



Kuva 6. Ilmastomallien perusteella tulevaisuuden suolapitoisuus (oikealla) on keskimäärin 0,5 promilleyksikköä matalampi kuin vertailujaksolla (vasemmalla).

oli BSAP) vaan sitä, että nitraatteja kertyy veteen biomassaan sitoutumisen sijasta, koska fosforin määrä rajoittaa perustuotantoa. Tästä syystä tulevaisuuden korkeampi nitraattipitoisuus vertailujaksoon verrattuna ei ole merkki meren huonommasta kemiallisesta tai ekologisesta tilasta. Vaikka ravinnetasot ovat olleet Selkämerellä ja Perämerellä jo pitkään melko alhaisia, niiden on havaittu kohonneen sen seurauksena, että Pohjanlahteen on virrannut ravinnepitaisia vesiä voimakkaasti rehevöityneestä Itämeren pääaltaasta ja Saaristomereltä (Rolff & Elfving 2015). Tämän ilmiön syitä ei vielä ymmärretä tarkkaan, mutta seuraukset on valitettavasti helpompi ennakoida. Jos ravinteiden virtaaminen eteläisiltä merialueilta Pohjanlahteen jatkuu tai lisääntyy, alueen ravinnetasot voivat kohota ja sen ekologinen tila heikentyä entisestään, koska Saaristomeren ja Itämeren pääaltaan ravinnetasot ovat tällä hetkellä huomattavasti Pohjanlahtea korkeammat. Kuitenkin päivitetystä BSAP-ohjelmasta (HELCOM 2021a) on ravinteiden vähennystavoitteita sekä Suomelle että Ruotsille Selkämeren ja Perämeren alueilla, ja mikäli nämä vähennystavoitteet sekä Saaristomeren ja Itämeren pääaltaan ravinteiden vähennystavoitteet saavutetaan tulevaisuudessa,

tulee kokonaisvaikutus Pohjanlahden vedenlaatuun olemaan positiivinen.

Mallit, joissa oletetaan BSAP:n toteuttamista, ennustavat että **happipitoisuus** pohjaa lähimmässä vesikerroksessa pysyy pääosin suunnilleen samalla tasolla, mutta alueellisesti happipitoisuudet voivat joko laskea tai nousta tulevaisuudessa. Biogeokemialliset mallit viittaavat hieman korkeampaan happipitoisuuteen tulevaisuudessa syvemmillä alueilla lähellä Ruotsin rannikkoa Västernorrlandissa, esimerkiksi Norra Ulvönin saarelta itään. Sitä vastoin happipitoisuus laskee matalilla alueilla, jotka ovat paljon lämpimämpiä, mutta ei niin paljoa, että niitä uhkaisu hypoksia. Kaiken kaikkiaan keskimääräisen kasvukauden aikana happipitoisuudet eivät tule olemaan ongelma tulevaisuudessa, jos BSAP-ohjelmaa noudatetaan.

## 5.2. Lajien levinneisyyden muutokset

Tässä luvussa esitetään tutkimuslajien mallinnetut nykyiset ja tulevat levinneisyydet. BRT-mallinnuksella

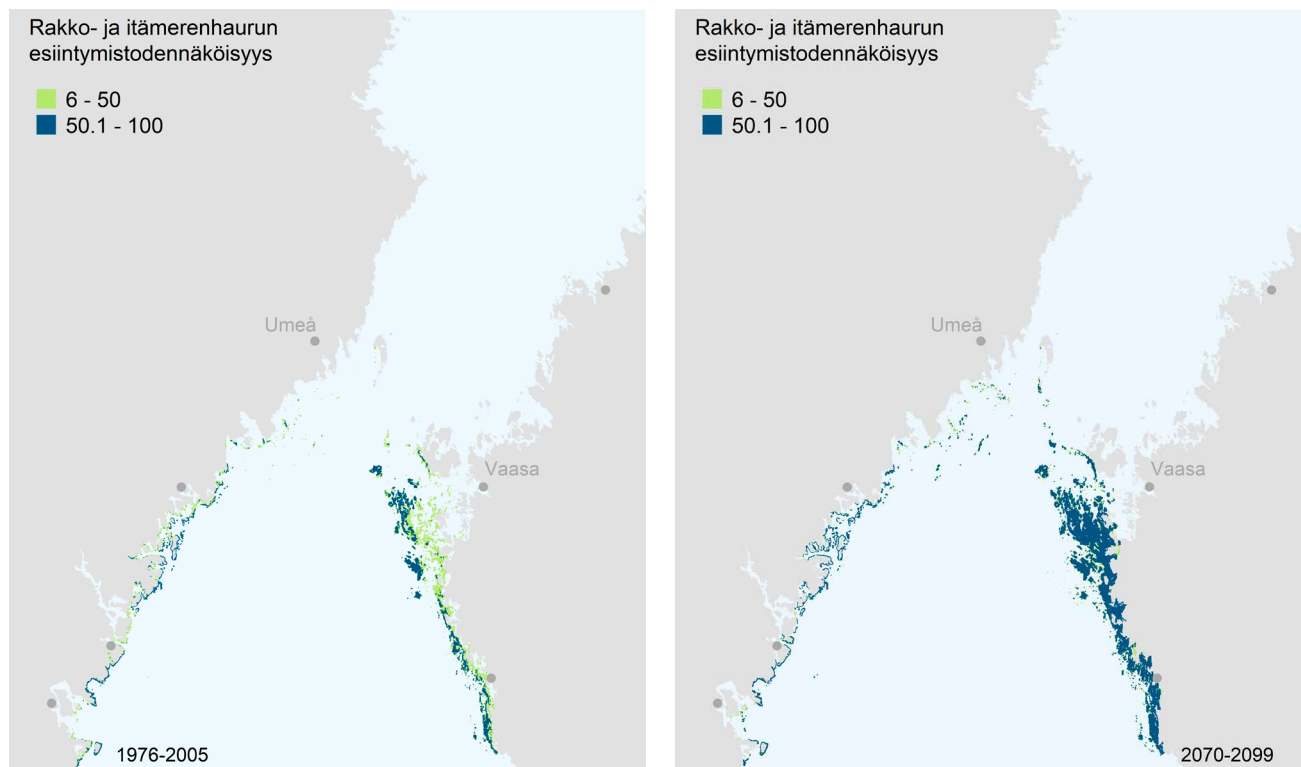
arvioitiin lajien esiintymistodennäköisyyksiä Pohjanlahden keskiosissa RCP8.5-ilmastoskenaarion mukaan ja olettaen, että BSAP:n tavoitteet saavutetaan. Eri ympäristömuuttujien suhteelliset vaikutukset kussakin mallissa sekä mallien ennustekykyä kuvaavat arvot on esitetty liitteissä Taulukossa A2.

### 5.2.1. Haurut

Vertailujakson (1976–2005) ja tulevaisuuden (2070–2099) ympäristöolosuhteiden mukaan ajatut lajien levinneisyysmallit viittaavat siihen, että hauruille (*Fucus vesiculosus* ja *F. radicans*) mahdollisesti suotuisia alueita voi tulevaisuudessa olla merkittävästi nykyistä enemmän (Kuva 7). Tähän on syynä se, että jääpeite ohenee tai puuttuu jatkossa kokonaan. Matalat kivikorannat, joita nykyisin jokatalvinen jääpeite hankaa ja jotka ovat sen vuoksi tällä hetkellä suotuisia kasvuympäristöjä vain yksivuotisille leville, muuttuvat jatkossa suotuisiksi kasvuympäristöiksi myös monivuotisille leville, kuten hauruille. Tämän lisäksi Itämeren kemiallisen tilan paraneminen ja sen myötä lisääntyvä valon määrä mahdollistavat sen, että haurut voivat levitä aiempaa laajemmalle syvyysalueelle. Tämän seurauksena ne voivat tulevaisuudessa kasvaa sekä

matalammilla että syvemmillä alueilla. Viimeisten 50 vuoden aikana näkösyvyys (Secchi-syvyys) on madaltunut, minkä vuoksi haurukasvustoille suotuisia alueita on merkittävästi vähemmän kuin aiemmin (Sahla ym. 2020). Näin ollen sitä, että niiden määrän ennustetaan lisääntyvän tulevaisuudessa, voidaan pitää osittain elpymisenä sen lisäksi, että haurut leviävät myös uusille alueille. Itämeren leutojen talvien on jo osoitettu johtavan siihen, että haurukasvustoista tulee tiheämpiä lähellä pintaa (Kiirikki & Ruuskanen 1996).

Haurut ovat mereisiä lajeja, joille veden suolapitoisuuden on oltava vähintään noin 3–4 promillea, lajista ja mahdollisesti myös paikallisiin olosuhteisiin sopeutuneesta genotyypistä riippuen (Rugiu 2018). Tässä tutkimuksessa käytettyjen mallien perusteella suolapitoisuus tulee alenemaan niin vähän, että sen muutokset eivät vaikuta merkittävästi hauruihin sukutasolla tarkasteltuna. Suolapitoisuuden aleneminen kuitenkin estää niitä leviämästä pohjoisemmaksi uusille alueille, vaikka muut ympäristöolosuhteet muuttuisivatkin niille suotuisammiksi. Lisäksi levinneisyysalueen pohjoisosissa itämerenhaurun oletetaan korvaavan korkeampaa suolapitoisuutta vaativan rakkohaurun. Useissa aiemmissa tutkimuksissa, joissa on käytetty



Kuva 7. Mallinnetut hauruille suotuisat alueet vertailujaksolla (vasemmalla) ja tulevaisuudessa (oikealla). Mallit perustuvat meriveden olosuhteita kuvaaviin ympäristömuuttujiin, kuten suolapitoisuuteen, lämpötilaan sekä kasvillisuuden käytettävissä olevan valon ja ravinteiden määrään. Tutkimuksessa ei ole huomioitu pohja-ainesta, joten mallien ennustamat alueet ovat suotuisia vain siinä tapauksessa, että niillä on kovaa pohja-ainesta, johon haurut voivat kiinnittyä.

lajien levinneisyyksmallinnusta, on ennustettu, että haurujen levinneisyyden pohjoisraja siirtyy etelään päin, mutta tämän muutokseen suuruus riippuu käytetystä ilmastoskenaariosta (esim. Jonsson 2018; Kotta ym. 2019; Saari 2021; Viitasalo & Bonsdorff 2021). Tässä tutkimuksessa käytetyt ilmastomallit ennustavat suolapitoisuuden muutoksen olevan vähäisempi kuin useimmissa aiemmissa tutkimuksissa, mikä selittää useimmat erot haurujen ennustetuissa tulevaisuuden levinneisyyksissä. Myös jään vaikutusten huomioiminen tai huomioimatta jättäminen vaikuttaa siihen, lisääntyvätkö vai vähenevätkö haurut ennusteiden mukaan tulevaisuudessa.

Veden lämpötilan kohoamisella voi olla sekä positiivisia että negatiivisia vaikutuksia hauruihin. Korkeamat lämpötilat huonontavat haurulajien selviytymis- ja lisääntymismahdollisuuksia mutta voivat toisaalta myös edistää niiden kasvua (Takolander ym. 2017a; Rugiu 2018). Vaikka kasvukauden keskilämpötila pysyisikin siedettävänä, helleaallot voivat olla haitallisia. Tämän vuoksi matalat vesialueet, jotka voisivat jääpeitteen ohenemisen vuoksi olla tulevaisuudessa suotuisia kasvuympäristöjä hauruille, eivät välttämättä sittenkään ole niille suotuisia, jos lämpötila kohoaa liian korkeaksi.

Tämän lisäksi ravinnepitoisuuksien alenemisen (olettaen, että BSAP-ohjelmaa noudatetaan) seurauksena on odotettavissa, että rihmalevät menettävät etulyöntiasemansa suhteessa hauruihin, mikä puolestaan parantaa entisestään haurujen kasvuolosuhteita tulevaisuudessa. Kun rihmalevät eivät enää yhtä voimakkaasti tukahduta haurukasvustoja, haurut voivat myös paremmin kilpailla rihmalevien kanssa uusista vähäjäisistä habitaateista (Wallentinus 1979; Kiirikki 1996).

Eteläisen Merenkurkun laajojen, näennäisesti suotuisien alueiden koko on todennäköisesti yliarvioitu, koska pohja-ainesta ei ole huomioitu malleissa. Tämän seurauksena hauruille suotuisiksi mallinnetut alueet ovat niille suotuisia ympäristöjä vain, jos niissä on kovaa pohja-ainesta, kuten kalliopohjaa tai suuria kiviä, joiden pintaan levät voivat kiinnittyä. Lisäksi jääolosuhteet tulevat vaihtelemaan eri talvina ja ajoittaiset ankarat talvet ja paksu jääpeite tulevat rajoittamaan haurujen esiintymistä matalilla kalliouisilla rannoilla myös tulevaisuudessa. Keskimääräiset olosuhteet ovat lajeille suotuisampia, mutta luonnollisestikaan ne eivät tule vallitsemaan koko ajan. Näin ollen, kuten kaikkien mallien kohdalla, on todennäköistä, että mallit antavat oikeansuuntaisia viitteitä tulevasta muutoksista, mutta varsinaisiin arvoihin ja kartoilla kuvattuihin alueisiin tulee suhtautua varauksella. Haurut menestyvät

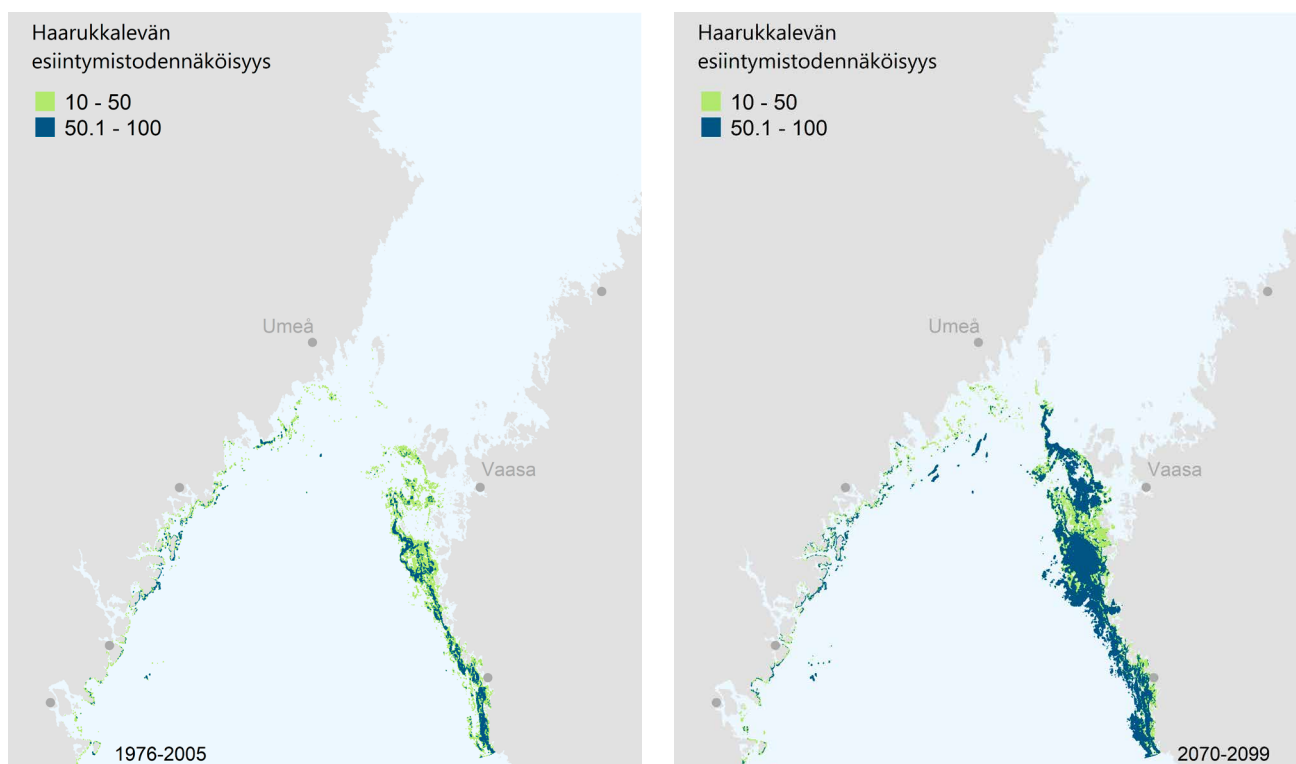
todennäköisesti hyvin tulevaisuudessa, ja ne voivat esiintyä sekä nykyistä matalammalla että syvemmillä, sillä vesi on tulevaisuudessa kirkkaampaa, kasvillisuudelle käytettävissä olevan valon määrä lisääntyy ja rannoilla on vähemmän jäätä.

### 5.2.2. Haarukkalevä

Veden suolapitoisuuden aleneminen vaikuttaa jonkin verran negatiivisesti haarukkalevään (*Furcellaria lumbricalis*), ja sen lisäksi kohonneet veden lämpötilat voivat johtaa siihen, että kannat pienenevät paikallisesti jossain osissa rannikkoa. Haarukkalevän esiintymisen kokonaistodennäköisyys kuitenkin kasvaa erityisesti Suomen puolella hankealuetta (Kuva 8). BSAP-ohjelmasta seuraavan rehevöitymisen vähenemisen seurauksena vedet kirkastuvat, jolloin valon määrä lisääntyy. Valon määrän lisääntyminen tekee alueen syvemmistä osista, joissa veden suolapitoisuus on riittävän korkea, lajille todennäköisesti aiempaa suotuisampia. Haarukkalevä viihtyy syvemmissä vesissä, sillä monien muiden punalevien tavoin se on sopeutunut syvällä vallitseviin valo-olosuhteisiin. Tämä sopeuma tuo lajille kilpailuetua muihin leviin nähden. Rehevöityminen ja siitä seuraava veden sameus ovat saaneet lajin siirtymään matalampiin vesiin (esim. Kontula & Raunio 2018), mutta se voi levitä tulevaisuudessa takaisin syvemmillä vesialueille yllä käsiteltyjen haurujen tapaan. Näin odotetaan tapahtuvan myös Ruotsin puoleisella hankealueella, vaikka se ei näykään kartalla. Syynä tähän on se, että Ruotsin rannikko syvenee niin nopeasti, että samanlaista selkeää ja laajamittaista lajin siirtymistä syvemmillä vesialueille ei voida erottaa tällä resoluutiolla.

Verrattuna matalampiin alueisiin syvemmillä vesialueilla on vähemmän kilpailua muiden lajien kanssa, mikä voi olla haarukkalevän kannalta suotuisaa tulevaisuudessa. Mallit eivät kuitenkaan välttämättä ota riittävästi huomioon nousevan lämpötilan vaikutuksia leviin. Syvemmissä vesissä lämpötilan kohoaminen voi olla eduksi, mutta matalammissa vesissä lämpötilat voivat kohota niin korkeiksi, että se on lajille haitallista. Torn ym. (2020) ennustivat, että lämpötilojen kohoaminen tulee olemaan haarukkalevälle haitallisempaa kuin suolapitoisuuden aleneminen, mikä johtaa sen levinneisyyden voimakkaaseen supistumiseen. Pajusalun ym. (2016) mittauksen mukaan haarukkalevän yhteyttämistehokkuus on korkeimmillaan 10 asteessa, minkä jälkeen se laskee lähes minimiin 25 asteessa. Tulevaisuudessa keskilämpötilat ylittävät ennusteiden mukaan tämän optimiarvon reilusti. Lisäksi tässä hankkeessa käytetyt mallit perustuvat kasvukauden keskilämpötilaan, mutta niissä ei huomioida sitä, että





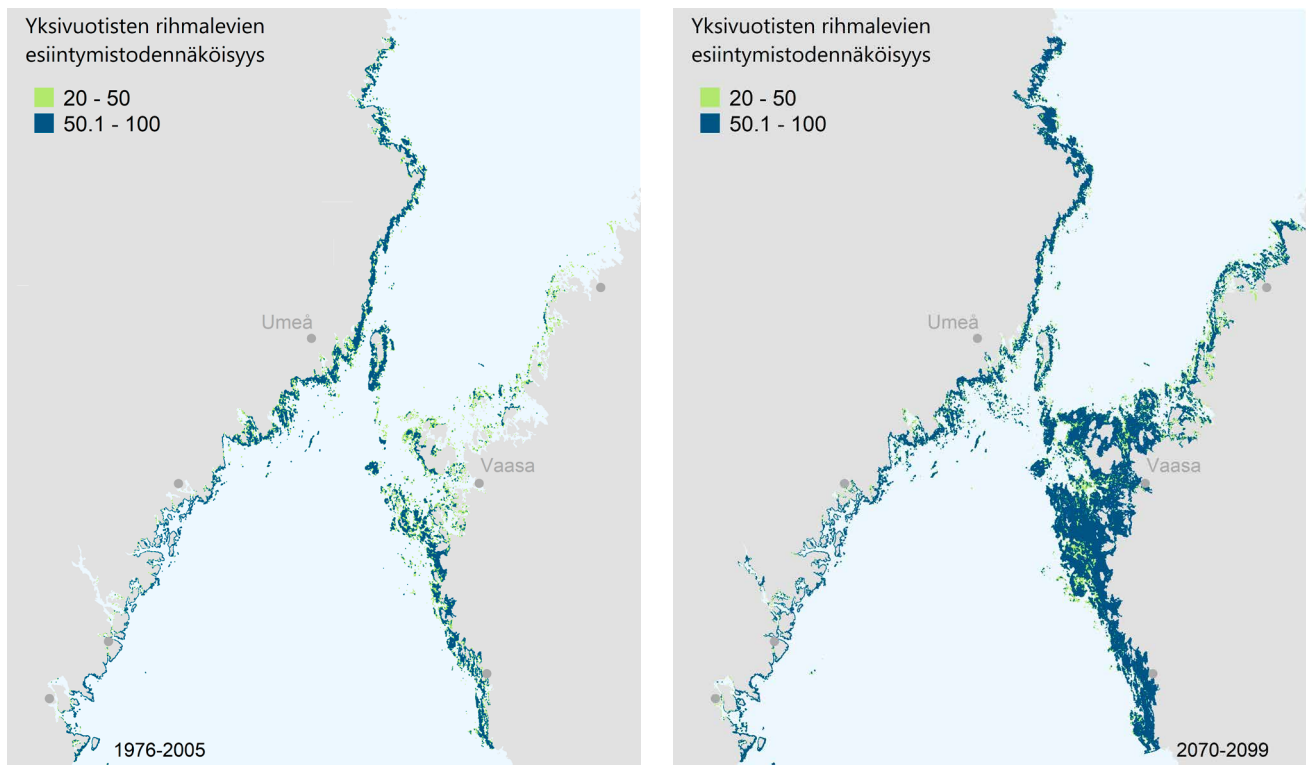
**Kuva 8. Haerikkalevän esiintymistodennäköisyys vertailujaksolla (vasemmalla) ja tulevaisuudessa (oikealla). Mallit perustuvat meriveden olosuhteita kuvaaviin ympäristömuuttujiin, kuten suolapitoisuuteen, lämpötilaan sekä kasvillisuuden käytettävissä olevan valon ja ravinteiden määrään. Pohja-ainesta ei ole huomioitu, joten mallien ennustamat alueet ovat suotuisia kasvuympäristöjä vain, jos niissä on kovaa pohja-ainesta, johon haerikkalevä voi kiinnittyä.**

tulevaisuudessa helleaallot voivat yleistyä ja kestää pidempään, mikä vaikuttaa haitallisesti syvempiin ja viileämpiin vesiin sopeutuneeseen lajeihin. Näin ollen osa mallinnetuista tulevaisuuden korkeista esiintymistodennäköisyyksistä suhteellisen matalilla vesialueilla on mitä todennäköisimmin yliarvioituja.

### 5.2.3. Yksivuotiset rihmalevät

Vaikka BSAP:n onnistunut toteuttaminen vähentää levien kasvuun välttämättömän vedessä olevan fosforin määrää, mallit viittaavat siihen, että yksivuotisille rihmaleville mahdollisesti suotuisat alueet tulevat lisääntymään voimakkaasti lämpötilan nousun vuoksi. Muutos on erityisen voimakas Perämerellä (Kuva 9), jossa lämpötilan nousu merkitsee suhteellisesti suurempaa kasvuolosuhteiden paranemista kuin jo ennestään lämpimillä eteläisillä alueilla. Mallit kuitenkin todennäköisesti yliarvioivat rihmalevien leviämisen tulevaisuudessa, sillä useiden kasvi- ja levälajien ennustetaan lisääntyvän ja niiden yhteenlaskettu ravinteiden otto yhdessä BSAP:n vaikutusten kanssa ei välttämättä jätä yksivuotisille leville riittävästi ravin-

teita niiden leviämiseksi mallin ennustamalla tavalla. Koska fosforin saatavuus rajoittaa perustuotantoa Perämerellä (kun taas Itämeren useilla muilla merialueilla perustuotantoa rajoittaa tyyppi) (Rolf & Elfving 2015), ennustettujen meriveden fosforipitoisuuksien alenemisen vuoksi on epätodennäköistä, että yksivuotisten rihmalevien esiintymisalue laajenisi yhtä paljon kuin malleissa esitetään. Rihmalevät dominoivat kasvivyhteisöjä ravinteikkaissa vesissä, mutta ravinnepitoisuuksien laskiessa muut lajit, kuten haurut, alkavat kilpailla tilasta enemmän. Toinen rihmaleviin vaikuttava mielenkiintoinen tekijä on tulevaisuuden jääpeite. Jäätömien talvien ansiosta rihmalevien talvehtiminen onnistuu paremmin, minkä seurauksena leväyhteisöstä tulee monimuotoisempi ja runsaampi, kun jää ei hankaa talvisin rantoja (Kiirikki & Lehvo 1997). Jos kuitenkin jäätömiä talvia on useita peräkkäin, haurut alkavat levittäytyä yhä enemmän matalien vesien rihmalevävyöhykkeelle ja kilpailla elintilasta rihmalevien kanssa (Wallentinus 1979; Kiirikki 1996). Koska lajien levinneisyysmalleissa ei oteta huomioon kilpailua tai muita eliöiden välisiä vuorovaikutuksia, yksivuotisten rihmalevien levinneisyys on tulevaisuudessa todennä-



**Kuva 9. Rihmalevien esiintymistodennäköisyys vertailujaksolla (vasemmalla) ja tulevaisuudessa (oikealla). Mallit perustuvat meriveden olosuhteita kuvaaviin ympäristömuuttujiin, kuten suolapitoisuuteen, lämpötilaan sekä kasvillisuuden käytettävissä olevan valon ja ravinteiden määrään. Pohja-ainesta ei ole huomioitu, joten mallien suotuisiksi ennustamat alueet ovat suotuisia kasvuypäristöjä vain, jos niissä on kovaa pohja-ainesta, johon levät voivat kiinnittyä.**

köisesti pienempi kuin tulevaisuuden malli ennustaa, mutta silti laajempi kuin vertailujaksolla.

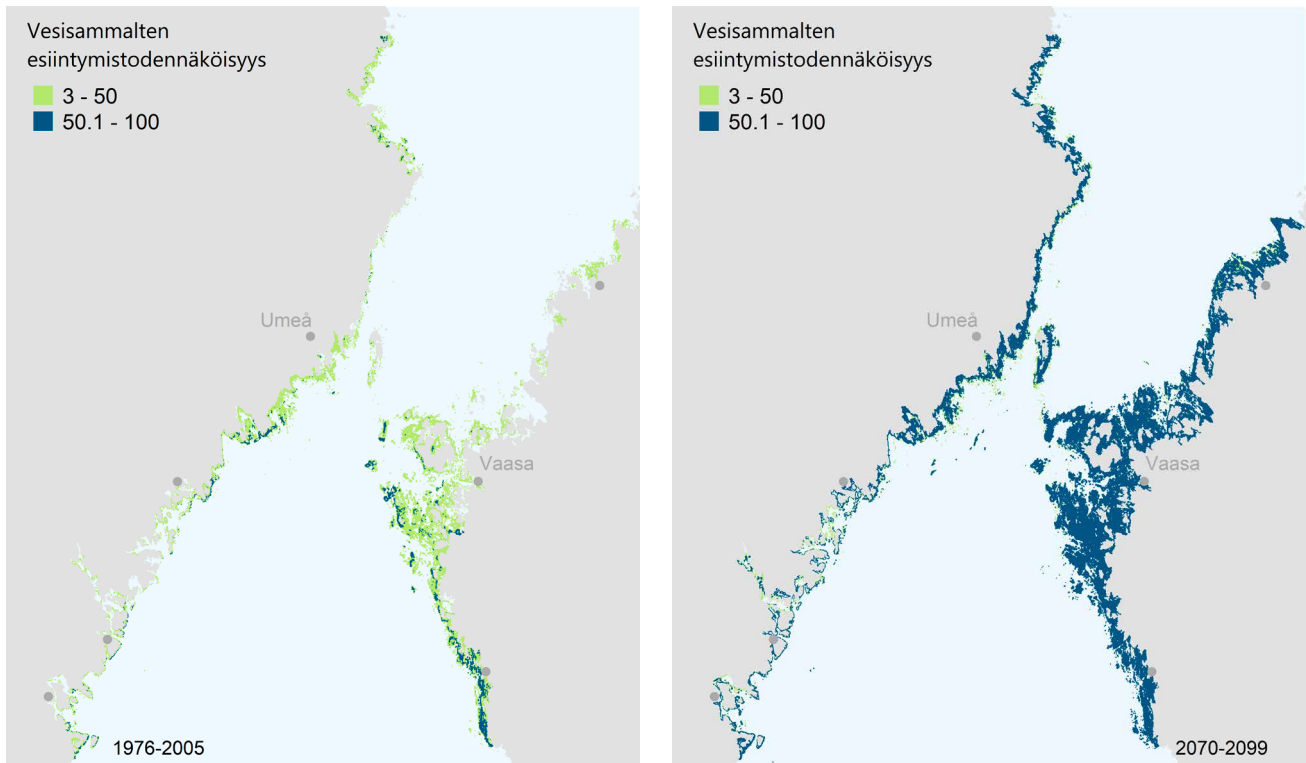
#### 5.2.4. Vesisammalet

Mallit viittaavat siihen, että vesisammalille suotuisia alueita on tulevaisuudessa huomattavasti nykyistä enemmän (Kuva 10). Tämä johtuu pääasiassa siitä, että vedet lämpenevät ja BSAP:n tavoitteiden mukaan rehevöityminen tulee vähenemään, mikä parantaa olosuhteita vesisammalten kannalta. Pidempi kasvu-kausi ja lämpimämpi vesi hyödyttävät vesisammalia pohjoisella Itämerellä, ja kirkkaammissa vesissä sammalat voivat kasvaa aiempaa syvemmillä. Matala suolapitoisuus olisi myös eduksi alun perin makean veden ympäristöistä peräisin oleville sammalille, mutta koska ennusteiden mukaan suolapitoisuus laskee vain vähän, suolapitoisuuden muutosten vaikutukset vesisammalten levinneisyyteen pysyvät tulevaisuudessa vähäisinä. Suolapitoisuustasot voivat kuitenkin laskea pienemmässä mittakaavassa ja paikallisesti rannikkoalueilla siinä määrin, että se hyödyttäisi vesisammalia. Jääpeitteen ja jään hankaavan vaikutuksen väheneminen tulevaisuudessa voi myös hyödyttää kaikkein matalimpien rannikkoalueiden lajeja. Vesisammalet

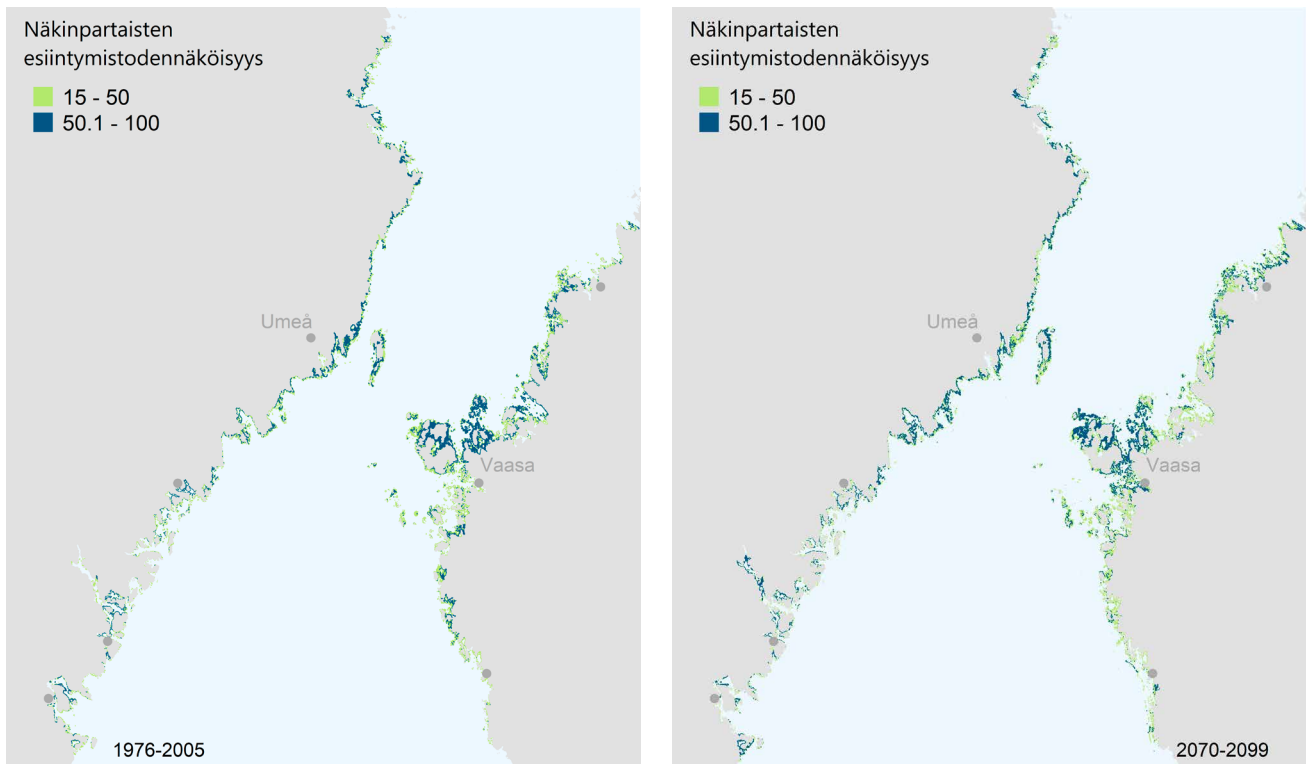
esiintyvät Itämerellä tyypillisesti hajanaisina laikkuina, ja huolimatta siitä, että niiden esiintymistodennäköisyys kasvaa, niiden ei oleteta esiintyvän tiheinä kasvustoina myöskään tulevaisuudessa. Tämän lisäksi Perämerellä vesisammalilla on kovapohjaisilla alueilla vain vähän kilpailevia lajeja matalan suolapitoisuuden vuoksi, mutta tilanne on toinen Merenkurkussa ja sen eteläpuolella, jossa esimerkiksi haurut kilpailevat niiden kanssa elintilasta. Tämä tulee jatkossakin rajoittamaan vesisammalten esiintymistä hankealueella.

#### 5.2.5. Näkinpartaiset

Ympäristöolojen ennustetuilla muutoksilla on vain vähäinen vaikutus näkinpartaisten mahdollisiin levinneisyysalueisiin tulevaisuudessa (Kuva 11). Yleisesti ottaen hankealueella elävien näkinpartaisten kasvua voi rajoittaa BRT-malleissa huomioituja abiottisia olosuhteita enemmän se, että niille ei löydy suotuisia habitaatteja, kuten fladoja ja muita suojaaisia, pehmeäpohjaisia ja matalia alueita. Näkinpartaisille ympäristöolojen puolesta suotuisien alueiden odotetaan hieman lisääntyvän joissakin osissa hankealuetta ja vähenevän toisilla, mikä johtaa pieneen negatiiviseen nettomuutokseen. Näkinpartaisten mahdollinen



**Kuva 10. Vesisammalten esiintymistodennäköisyys vertailujaksolla (vasemmalla) ja tulevaisuudessa (oikealla). Mallit perustuvat meriveden ominaisuuksia kuvaaviin ympäristömuuttujiin, kuten suolapitoisuuteen, lämpötilaan sekä kasvillisuuden käytettävissä olevan valon ja ravinteiden määrään. Pohja-ainesta ei ole huomioitu, joten mallien suotuisiksi ennustamat alueet ovat suotuisia kasvu-ympäristöjä vain, jos niissä on kovaa pohja-ainesta, johon sammalet voivat kiinnittyä.**



**Kuva 11. Näkinpartaisille suotuisat alueet vertailujaksolla (vasemmalla) ja tulevaisuudessa (oikealla). Mallit perustuvat meriveden olosuhteita kuvaaviin ympäristömuuttujiin, kuten suolapitoisuuteen, lämpötilaan sekä kasvillisuuden käytettävissä olevan valon ja ravinteiden määrään. Pohja-ainesta ei ole huomioitu, joten mallien suotuisiksi ennustamat alueet ovat suotuisia kasvu-ympäristöjä vain, jos niissä on pehmeää pohjaa, jolla näkinpartaiset voivat kasvaa.**

lisääntyminen johtuu pääosin lämpötilan kasvusta, rehevöitymisen vähenemisestä ja yhteyttämiseen käytettävissä olevan valon määrän lisääntymisestä, minkä seurauksena niiden on mahdollista siirtyä uusille alueille, jotka aiemmin ovat voineet olla liian sameita. Myös Torn ym. (2020) ovat ennustaneet näkinpartaisten levinneisyyden kasvavan kohoavien lämpötilojen ja niistä johtuvan pidemmän kasvukauden ansiosta. Mahdollinen suolapitoisuuden aleneminen ei ole näkinpartaisille vahingollista, vaan ne saattavat pikemminkin jopa hieman hyötyä siitä.

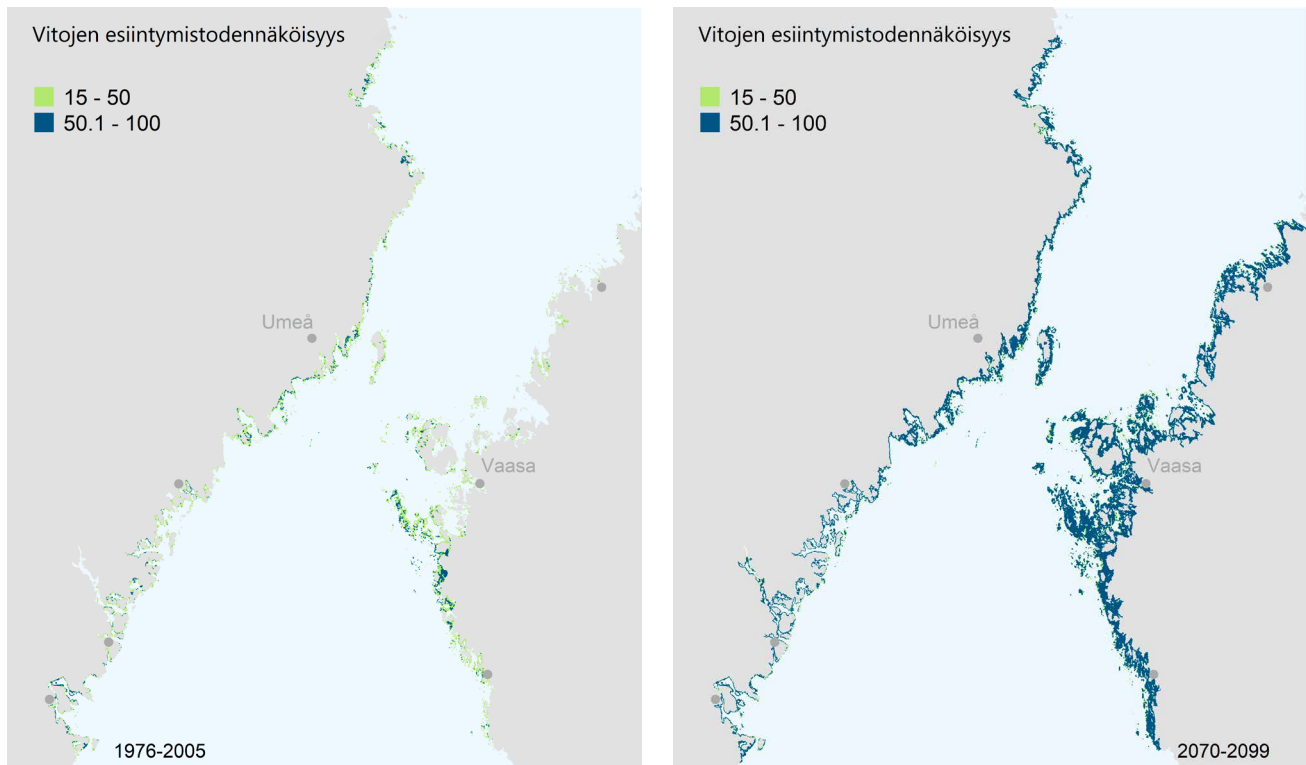
Hyvin matalilla alueilla jää voi muovata näkinpartaisten ja koppisiemenisten kasvien yhteisöjä (Herkül ym.), 2017), ja näkinpartaiset voivat hyötyä jäästä, sillä se antaa niille kilpailuetua suhteessa vitoihin (Herkül ym. 2011). BRT-malleissa jään paksuuden vaikutus näkinpartaisten esiintymiseen oli vähäinen mutta positiivinen. Tämän vuoksi näkinpartaispopulaatioiden ennustettu pieneneminen hankealueen joissakin osissa johtuu todennäköisesti jään ohenemisesta.

Jotkin näkinpartaislajit ovat herkkiä reagoimaan aaltojen liikkeeseen ja voivat viihtyä paremmin syvemmillä alueilla, joissa aaltojen vaikutus on vähäisempi (Torn

ym. 2019). Viime vuosikymmeninä veden sameus on rajoittanut näkinpartaisten esiintymistä syvemmissä vesissä (Torn ym. 2019). Koska tulevaisuudessa näkösyvyys saattaa kuitenkin kasvaa, on mahdollista, että useat lajit, myös näkinpartaiset, levittäytyvät syvemmillä alueille, jos muut ympäristöolosuhteet ovat siellä suotuisat. Näkinpartaiset kärsivät rihmalevien leviämisestä, ja rihmalevät saattavat mallien mukaan lisääntyä tulevaisuudessa. Kuten aiemmin on mainittu, malleissa ei kuitenkaan ole huomioitu lajien välisiä vuorovaikutuksia, eivätkä rihmalevät välttämättä leviä tulevaisuudessa niin laajalle kuin mallit ennustavat. Näkinpartaiset ovat herkkiä rehevöitymisen aiheuttamalle veden sameudelle, kun taas rihmalevät hyötyvät rehevöitymisestä. Koska tässä tutkimuksessa käytetyssä tulevaisuusskenaariossa oletetaan, että BSAP-ohjelmaa noudatetaan, näkinpartaisten ei oleteta olevan uhattuina tulevaisuudessa.

### 5.2.6. Vidat

Lajien levinneisyysmallit viittaavat siihen, että vidoille (*Potamogeton perfoliatus* ja *Stuckenia pectinata*) suotuisat alueet tulevat lisääntymään tulevaisuudessa merkittävästi koko hankealueella (Kuva 12). Tämä on



**Kuva 12.** Vidoille suotuisat alueet vertailujaksolla (vasemmalla) ja tulevaisuudessa (oikealla). Mallit perustuvat meriveden olosuhteita kuvaaviin ympäristömuuttujiin, kuten suolapitoisuuteen, lämpötilaan sekä kasvillisuuden käytettävissä olevan valon ja ravinteiden määrään. Pohja-ainesta ei ole huomioitu, joten mallien suotuisiksi ennustamat alueet ovat suotuisia kasvuympäristöjä vain, jos niissä on pehmeää pohjaa, jolla vidat voivat kasvaa.

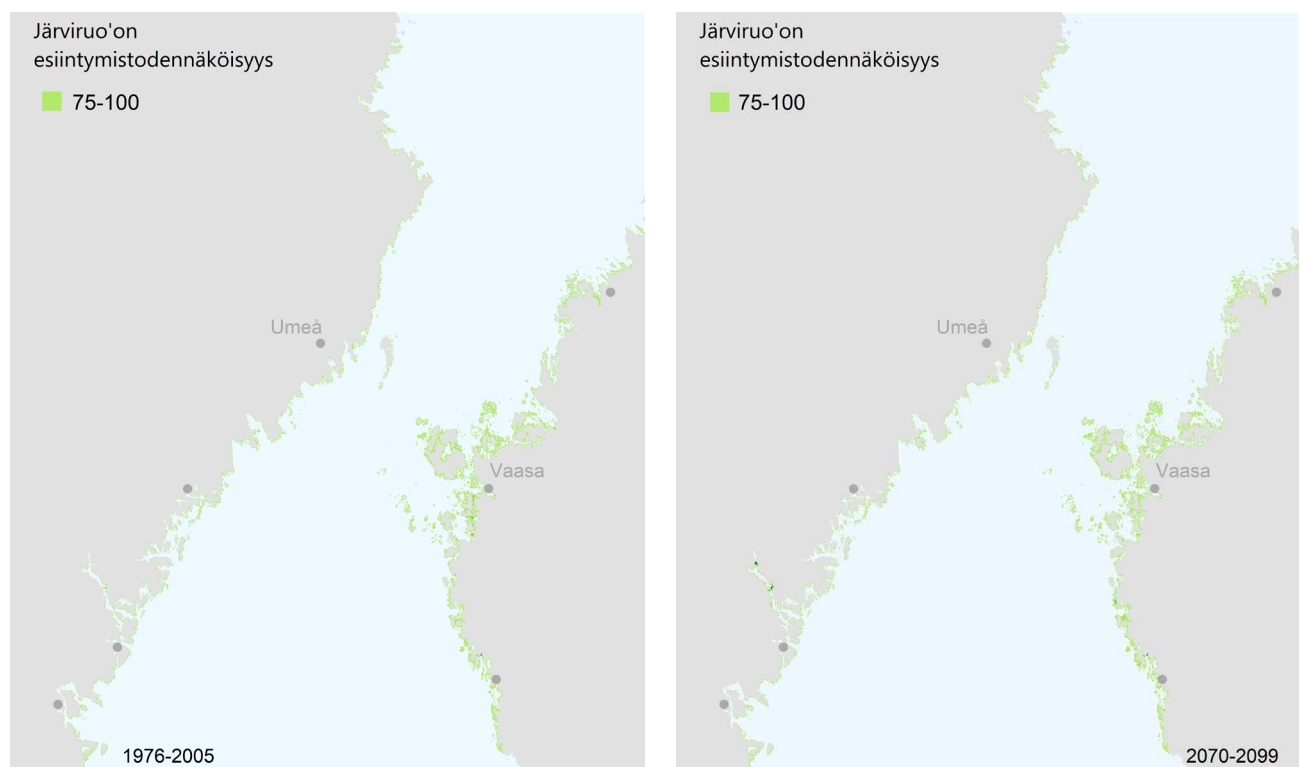
jossain määrin yllättävää, sillä vidat sietävät rehevöitymistä (Hansen & Snickars 2014) ja tässä käytetyssä skenaariossa rehevöitymisen oletetaan vähenevän BSAP:n noudattamisen myötä. Vidat hyötyvät kuitenkin muiden kasvien ja levien tavoin tulevaisuudessa veden kirkastumisesta. Toisin kuin esimerkiksi haurut, vidat hyötyvät myös lämpimämmästä ja vähäsuolaisemmasta vedestä, sillä ne ovat alkuperältään makeanveden lajeja. Herkül ym. (2017) huomauttavat lisäksi, että jääpeitteen kesto voi vaikuttaa vitayhteisöihin, sillä ne ovat monivuotisia. Mallit osoittavat, että jään paksuuden keskimääräinen oheneminen olisi vidoille edullista kaikkein matalimmilla rannikkoalueilla, sillä jäät eivät siinä tapauksessa raapisi niitä irti joka vuosi. Jään paksuuden ennustettu oheneminen kuitenkin koskee keskimääräisiä kasvuolosuhteita, ja todennäköisimmin ajoittain tulee vielä myös talvia, jolloin jääpeite on paksu.

Kaikkien näiden suotuisien muutosten ansiosta vidat ovat yksi niistä lajiryhmistä, joihin tulevat muutokset vaikuttavat kaikista positiivisimmin verrattuna muihin mallinnettuihin lajiryhmiin. Torn ym. (2019) odottavat lisäksi ilmastonmuutoksen vaikuttavan positiivisesti ahvenvitaan (*Potamogeton perfoliatus*), mutta heidän tutkimuksissaan sillä ei havaittu olevan merkittävää

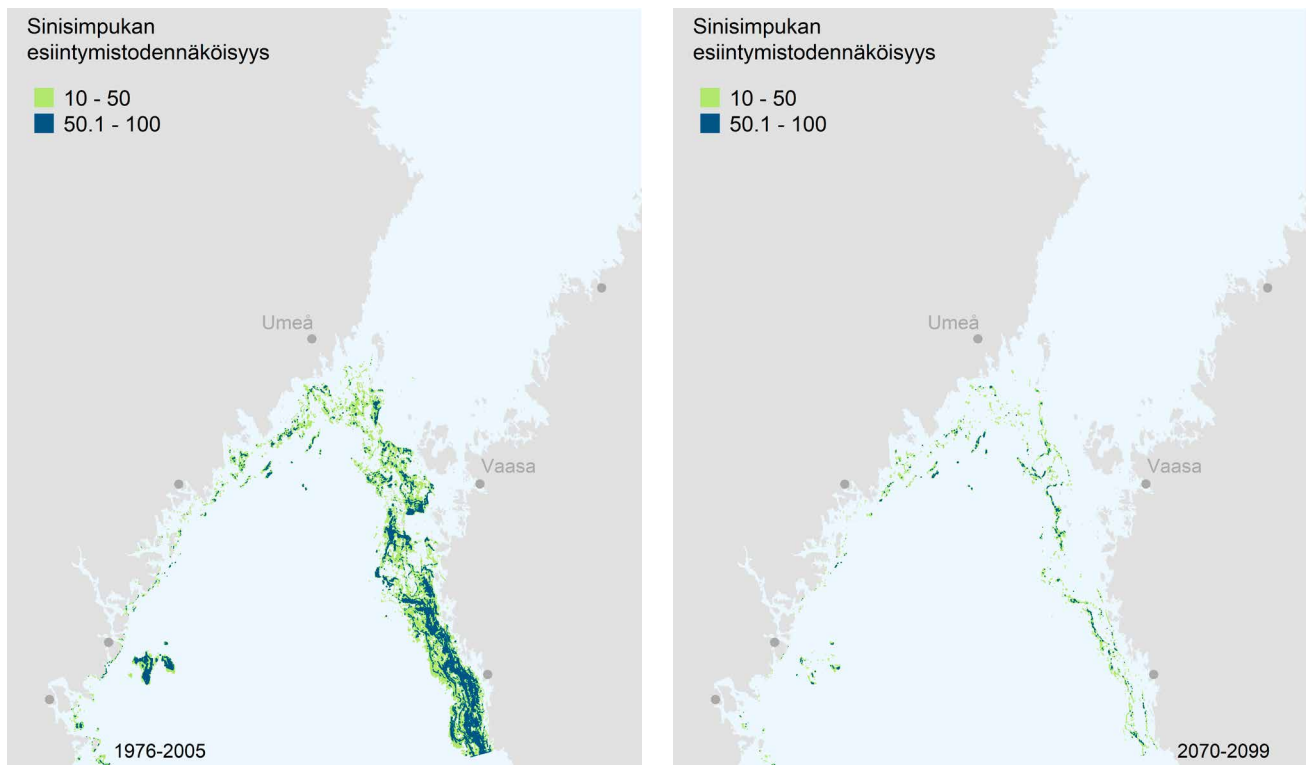
vaikutusta hapsivitaan (*Stuckenia pectinata*). Mallinuksessa ei otettu huomioon lajienvälisiä vuorovaikutuksia, minkä vuoksi ei ole mahdollista ennustaa, mitkä pehmeän pohjan kasvit tai näkinpartaiset valtaavat tulevaisuudessa ne alueet, joille niiden kaikkien on ennustettu leviävän.

### 5.2.7. Järviruoko

Lajien levinneisyysmallien mukaan järviruoko (*Phragmites australis*) esiintymisalueet eivät tule paljon muuttumaan, sillä tulevaisuudessa niille suotuisia alueita on vain hieman nykyistä enemmän (Kuva 13). Järviruoko on lisääntynyt laajalti viime vuosikymmeninä rehevöitymisen vuoksi ja myös siksi, että rantaniittyjä avoimina pitävä karjan laiduntaminen rantaviivan tuntumassa on vähentynyt. Tämän seurauksena lajia esiintyykin nyt lähes kaikkialla rannikon matalilla alueilla. Osasy vähäiseen muutokseen tulevaisuudessa on se, että järviruoko on jo nyt niin yleinen, että se ei juuri voi levittäytyä enää nykyistä laajemmalle. Lämpimämmät vedet edistävät järviruoko kasvuja, mutta kasvillisuudelle käytettävissä olevan fosforin määrän väheneminen voi rajoittaa lajin leviämistä.



**Kuva 13.** Järviruokoille suotuisat alueet vertailujaksolla (vasemmalla) ja tulevaisuudessa (oikealla). Mallit perustuvat meriveden olosuhteita kuvaaviin ympäristömuuttujiin, kuten suolapitoisuuteen, lämpötilaan sekä kasvillisuuden käytettävissä olevan valon ja ravinteiden määrään. Pohja-ainesta ei ole huomioitu, joten mallien suotuisiksi ennustamat alueet ovat suotuisia kasvuympäristöjä vain, jos niissä on järviruokoille sopivaa sedimenttiä.



**Kuva 14. Mallinnetut sinisimpukalle suotuisat alueet vertailujaksolla (vasemmalla) ja tulevaisuudessa (oikealla). Sinisimpukalle suotuisat alueet tulevat todennäköisesti pienenevään tulevaisuudessa veden lämpenemisen ja suolapitoisuuden alenemisen vuoksi. Mallit perustuvat meriveden ominaisuuksia kuvaaviin ympäristömuuttujiin, kuten suolapitoisuuteen, lämpötilaan ja ravinteiden määrään. Pohja-ainesta ei ole huomioitu, joten mallien suotuisiksi ennustamat alueet ovat suotuisia elinympäristöjä vain, jos niissä on kovaa pohja-ainesta, johon simpukat voivat kiinnittyä.**

### 5.2.8. Sinisimpukka

Lajien levinneisyysmallien mukaan ilmastonmuutos vaikuttaa negatiivisesti sinisimpukkaan (*Mytilus trossulus x edulis*, Kuva 14). Sinisimpukat elävät jo nyt sietokykynsä ääri rajoilla hankealueen matalan suolapitoisuuden vuoksi, ja niiden pohjoisimmat esiintymisaluet sijaitsevat Merenkurkussa. Mitkä tahansa epäsuotuisat muutokset voivat johtaa populaatioiden häviämiseen, sillä ympäristöolot aiheuttavat jo nyt simpukoille fysiologista stressiä. Mallien mukaan suolapitoisuus voi laskea alle 4,5 promilleen Suomen rannikolla Raippaluodon ja Bergön saarten välillä, jossa tällä hetkellä elävät pohjoisimmat sinisimpukapopulaatiot. Suolapitoisuuden aleneminen vaikuttaa enemmän sinisimpukkaan kuin toisiin avainlajeihin eli hauruihin, sillä haurujen levinneisyys mallinnettiin sukutasolla, ja kahdesta haurulajista itämerenhauru sietää matalaa suolapitoisuutta.

Kohoava lämpötila kuormittaa sinisimpukoita ja heikentää niiden elinolosuhteita entisestään. Suolapitoisuuden alenemisen ja korkeampien lämpötilojen

yhteisvaikutus voikin johtaa sinisimpukkakantojen pienemiseen. Myös muissa viimeaikaisissa tutkimuksissa on saatu vastaavia tuloksia (Jaatinen ym. 2020). Lisäksi pohjaa lähimmän vesikerroksen korkea keskilämpötila viittaa siihen, että enimmäislämpötilat tulevat olemaan vieläkin korkeampia, ja meren helleaallot voivat olla tuhoisia sinisimpukoille jo nykyisessä ilmastossa (Seuront ym. 2019). Sinisimpukat voivat hävitä etenkin matalista vesistä, sillä matalien vesialueiden ennustetaan lämpenevän syviä alueita enemmän. Mallit ennustavatkin, että sinisimpukalle suotuisina pysyvät alueet sijaitsevat tulevaisuudessa kauempana rannikosta, nykyistä syvemmällä alueilla. Sinisimpukat eivät kuitenkaan voi siirtyä loputtomasti syvemmälle etsimään matalampia lämpötiloja ja korkeampaa suolapitoisuutta, koska ravintoa (tuoretta kasviplanktonia) ei ole riittävästi tarjolla noin yli 40 metrin syvyydessä. Syvemmällä alueilla myös pohja-aines on usein pehmeää sedimenttiä, ja sinisimpukat tarvitsevat kovaa kivistä pohjaa kiinnittyäkseen. Malleissa ei ole otettu huomioon pohja-ainesta, joten ennustetut esiintymisaluet ovat suotuisia vain, jos niillä on kovaa pohja-ainesta, johon sinisimpukat voivat kiinnittyä.

### 5.2.9. Liejusimpukka

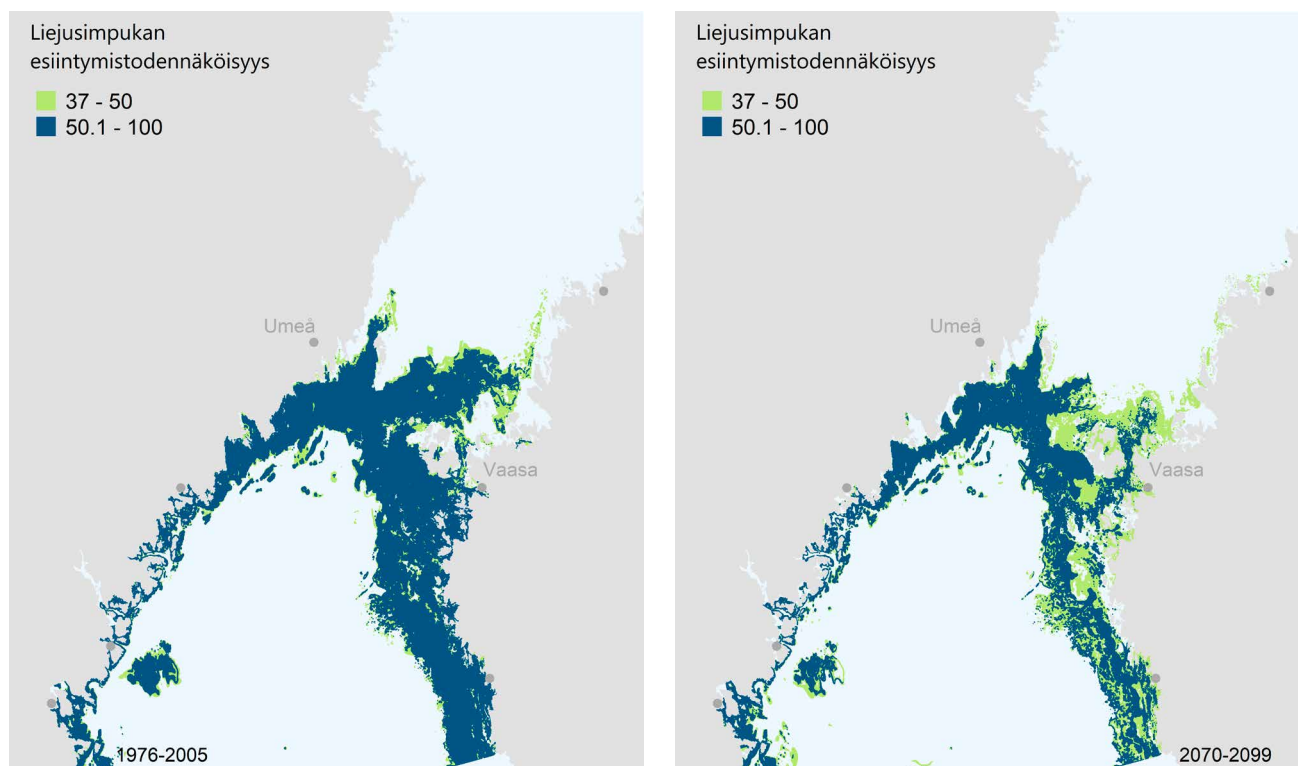
Liejusimpukka (*Limecola balthica*) sietää sinisimpukkaa alhaisempia suolapitoisuuksia, jopa noin 3 promilleen saakka, vaikka sekin on alkuperältään mereinen laji. Madaltuva suolapitoisuus voi kuitenkin vaikuttaa hieman myös siihen. Mallien mukaan sen levinneisyysalueen pohjoisreuna voi siirtyä hieman etelämmäksi tai ainakin levinneisyysalueen rajoilla elävät populaatiot, esimerkiksi Suomen rannikolla Vaasasta ja Raipaluodon saaresta pohjoiseen, ovat tulevaisuudessa pienempiä. Lisäksi jotkin mannerta lähinnä olevat rannikkoalueet sekä Suomen että Ruotsin rannikolla voivat muuttua lajille vähemmän suotuisiksi (Kuva 15).

Lajien levinneisyysmallit viittaavat siihen, että meriveden fosforipitoisuus korreloi positiivisesti liejusimpukoiden runsauden kanssa. Liejusimpukkakannat ovat kasvaneet viime vuosikymmeninä, mikä johtuu todennäköisesti rehevöitymisestä ja lisääntyneestä ravinnon saatavuudesta (Ehrnsten ym. 2019). Kun fosfaattipitoisuus laskee tulevaisuudessa merkittävästi BSAP:n mukaisesti, liejusimpukoilla on jälleen vähemmän ravintoa, mikä voi johtaa kantojen pienenemiseen

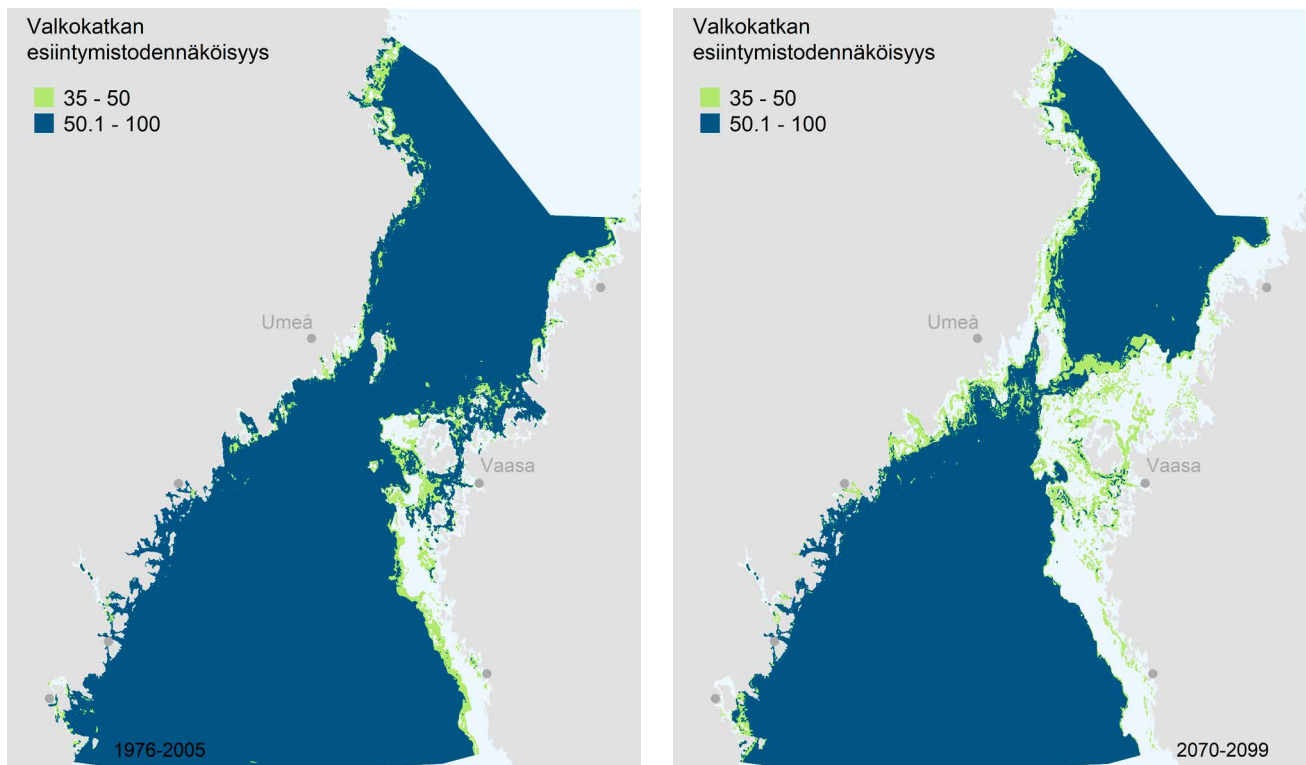
(Ehrnsten ym. 2020). Ennusteiden mukainen kantojen pieneneminen tulevaisuudessa voi sen vuoksi johtua ainakin kahden stressitekijän yhteisvaikutuksesta: vähäsuolaisemmasta vedestä populaation reuna-alueilla ja heikommasta ravinnon saatavuudesta koko hankealueella. Tästä huolimatta liejusimpukka on resilientti ja sopeutuvainen laji, ja olosuhteiden muuttuessa se todennäköisesti sopeutuu muutoksiin paremmin kuin jotkin muut pohjaeläimet, esimerkiksi valkokatka (ks. seuraava kappale). Liejusimpukka selviytyy todennäköisesti hyvin myös tulevaisuuden ilmastossa koko hankealueella, mutta sen levinneisyysalue ja paikallisten populaatioiden tiheys riippuu monesta tekijästä, kuten ympäristöolosuhteista, lajienvälisestä vuorovaikutuksesta ja ehkä kaikkein eniten ravinnon saatavuudesta.

### 5.2.10. Valkokatka

Valkokatka (*Monoporeia affinis*) menestyy syvässä ja kylmissä vesissä, joten se tulee kärsimään lämpötilan kohoamisesta. Koska se on alkuperältään makeanveden laji, suolapitoisuuden aleneminen ei kuitenkaan



Kuva 15. Liejusimpukalle suotuisat alueet vertailujaksolla (vasemmalla) ja tulevaisuudessa (oikealla). Laji tulee olemaan runsaslukuinen myös tulevaisuudessa, mutta sen kannat voivat pienentyä ravinnon saannin vaikeutumisen ja veden suolapitoisuuden alenemisen vuoksi. Mallit perustuvat meriveden olosuhteita kuvaaviin ympäristömuuttujiin, kuten suolapitoisuuteen, lämpötilaan ja ravinteiden määrään. Pohja-ainesta ei ole huomioitu, joten mallien suotuisiksi ennustamat alueet ovat suotuisia elinympäristöjä vain, jos niissä on pehmeää pohjaa.



**Kuva 16. Mallinnetut valkokatkaalle suotuisat alueet vertailujaksolla (vasemmalla) ja tulevaisuudessa (oikealla). Veden lämpötilan nousun seurauksena Merenkurkun matalien keskiosien oletetaan muuttuvan lajille vähemmän suotuisiksi. Mallit perustuvat meriveden olosuhteita kuvaaviin ympäristömuuttujiin, kuten suolapitoisuuteen, lämpötilaan sekä hapen ja ravinteiden määrään. Pohja-ainesta ei ole huomioitu, joten mallien suotuisiksi ennustamat alueet ovat suotuisia elinympäristöjä vain, jos niissä on pehmeää pohjaa.**

vaikuta siihen. Näin ollen se ei siis joudu kärsimään yhtä aikaa liian vähäsuolaisesta vedestä ja lämpimästä elinympäristöstä, kuten mereiset lajit. Tämän lisäksi valkokatka reagoi herkästi veden rehevöitymiseen ja happitason muutoksiin. Tulevaisuuden mallien mukaan happipitoisuuksissa ei tule tapahtumaan merkittäviä muutoksia eikä rehevöityminen lisääny, jos BSAP toteutetaan. Tämän vuoksi näiden kahden tekijän ei odoteta vaikuttavan valkokatkan levinneisyyteen tulevaisuudessa.

Tästä huolimatta levinneisyysmallien mukaan tulevaisuuden muutokset vaikuttavat kuitenkin juuri valkokatkaan kaikkein negatiivisimmin, enemmän kuin muihin mallinnettuihin pehmeän pohjan lajeihin (Kuva 16). Mallien mukaan suurin osa hankealueen rannikoista, erityisesti Merenkurkun keskiosissa, voi muuttua lajille epäsuotuisiksi veden lämpötilan kohoamisen vuoksi. Ääritapauksessa populaatiota voi jopa uhata jakautuminen pohjoiseen Perämeren populaatioon ja eteläiseen Selkämeren populaatioon. On kuitenkin huomioitava, että lajien levinneisyysmallit on ajettu tietyllä vähimmäistiheydelle. Näin ollen suotuisiksi ennustettujen alueiden puuttuminen ei tarkoita sitä, etteikö

lajia esiintyisi alueella ollenkaan, vaan ainoastaan sitä, että kyseinen alue ei ole suotuisa vähimmäistiheyttä tiheämmille populaatioille, jolle malli on kehitetty. Toisin sanoen Merenkurkun keskiosien valkokatkakanta tulee todennäköisemmin pienenemään lämpimillä ja matalilla alueilla kuin häviämään kokonaan.

Malleissa ei oteta huomioon erilaista lajienvälisiä vuorovaikutuksia pohjaeläinyhteisössä. Pohjanlahdella pohjaeliöstössä on tapahtunut muutos, kun valkokatkakanta on pientynyt ja liejuputkimadot (*Marenzelleria* spp.) ovat alkaneet vallata aluetta. Molemmat lajit käyttävät ravinnonlähteenään kasviplanktonia (Kotta & Ólaffson 2003; Eriksson Wiklund & Andersson 2014), ja perustuotannon vähentyessä tulevaisuudessa BSAP:n noudattamisen tuloksena kasviplanktonin määrä tulee vähenemään nykyisestä. Tämä voi vaikuttaa edelleen negatiivisesti valkokatkoihin (Eriksson Wiklund & Andersson 2014). Pohjaeläinyhteisössä tapahtui 1990-luvun lopussa ja 2000-luvun alussa muutos, joka saattoi olla seurausta tavallista vähäisemmästä perustuotannosta Pohjanlahdella. Tuolloin valkokatkakannat pienenevät merkittävästi, mikä antoi liejuputkimadoille enemmän tilaa levittäytyä alueelle



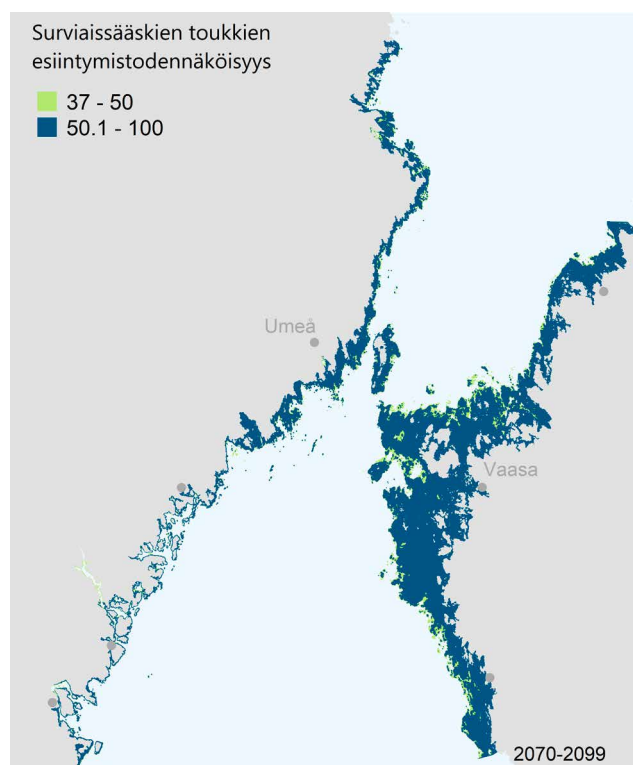
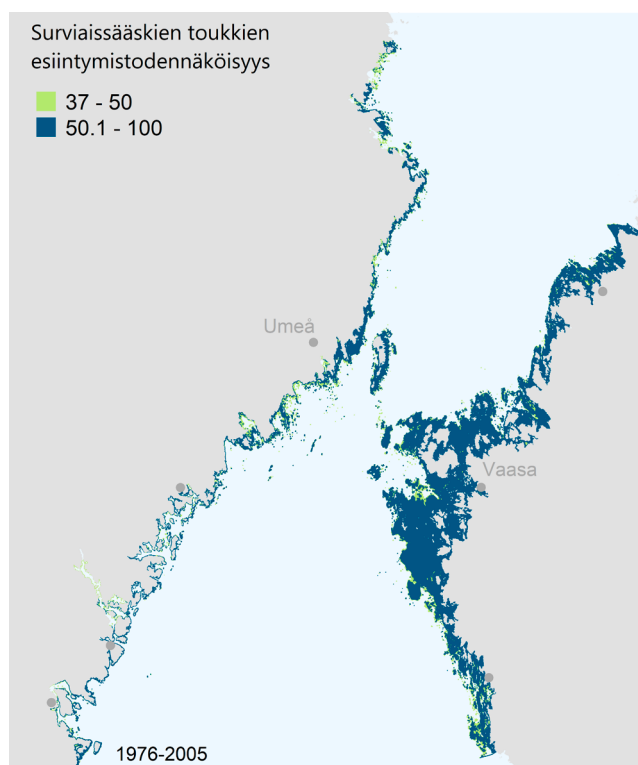
(Eriksson Wiklund & Andersson 2014). Karlson ym. (2015) ovat kuitenkin osoittaneet, että *Marenzelleria arctica* ei kilpaile kotoperäisten lajien kanssa, vaan se näyttää vallanneen erilaisen, aiemmin vapaan ekologisen lokeron. Myös liejusimpukan on havaittu hyötyvän valkokatkakantojen heikkenemisestä ja valtaavan alueita, joilta valkokatka on hävinnyt (Kauppi ym. 2015). Vaikuttaa kuitenkin siltä, että valkokatkat estävät nuorten liejusimpukoiden asettumisen alueelle (Ejdung ym. 2000).

### 5.2.11. Surviaissääskien toukat

Surviaissääskien toukat ovat lajiryhmä, joka voi selviytyä hyvin erilaisissa ympäristöolosuhteissa, minkä vuoksi ne ovat runsaslukuisia monenlaisissa vesistöissä. Jotkin surviaissääskilajeista (kuten *Chironomus plumosus*) sietävät alhaisempia happipitoisuuksia kuin useimmat muut pohjaeläimet. Monia surviaissääskilajeja pidetään kuitenkin merkinä vesistöjen hyvästä ekologisesta tilasta. Koska surviaissääskien toukat ovat useista lajeista ja sukuista koostuva suuri ryhmä, jotkin niistä voivat reagoida ympäristöolosuhteiden muutoksiin muista poikkeavilla tavoilla. Tämän vuoksi

niiden vasteita ryhmänä ei ole niin helppo mallintaa tai tulkita kuin yksittäisten lajien kohdalla.

Surviaissääskien toukat ovat tällä hetkellä runsaslukuisia ja laajalle levinneitä, eikä juuri mikään näytä uhkaavan niitä tulevaisuudessa (Kuva 17). On mahdollista, että merenpohjan veden lämpötila rajoittaa nykyisellään syvyysaluetta, jolla niitä esiintyy. Jos näin on, niiden kannat saattavat lisääntyä jatkossa. Myös BRT-malleissa näkyy surviaissääskien selkeä positiivinen vaste veden lämpötilaan. Jos veden lämpötilan kohoaminen on surviaissääskien toukille edullista, se voi johtaa niiden esiintymisalueen laajentumiseen myös syvemmille vesille. Muilla muutoksilla ei odoteta olevan suurta vaikutusta surviaissääskien toukkiin ryhmänä, mutta on mahdollista, että tiettyjen lajien ja sukujen suhteelliset osuudet voivat muuttua. Tulevaisuuden olosuhteista eniten hyötyvät lajit saavat kilpailuedun niihin lajeihin nähden, joiden kannalta aiemmat olosuhteet olivat edullisemmat. Myös maalla tapahtuvat ekosysteemin ja ympäristötekijöiden muutokset voivat vaikuttaa surviaissääskiin, sillä vain niiden toukat elävät vedessä. Näitä vaikutuksia ei kuitenkaan ole tarkasteltu tässä hankkeessa.



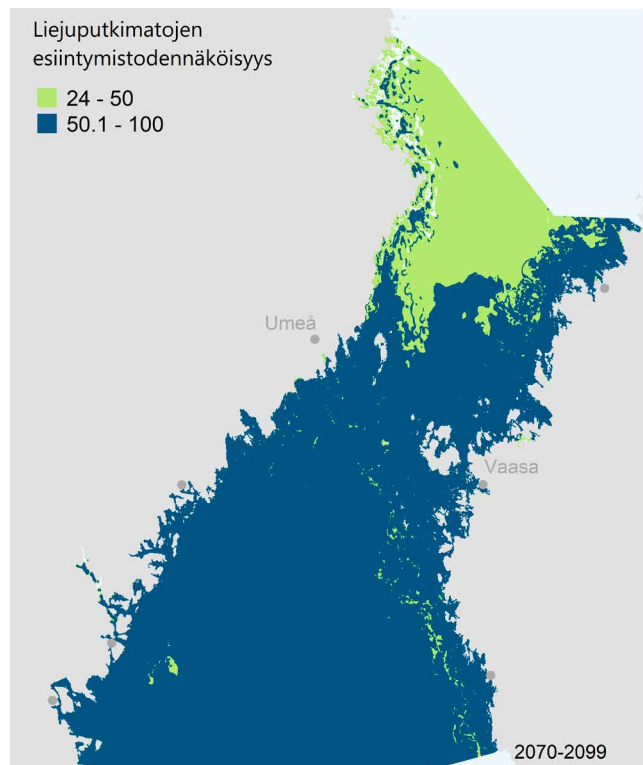
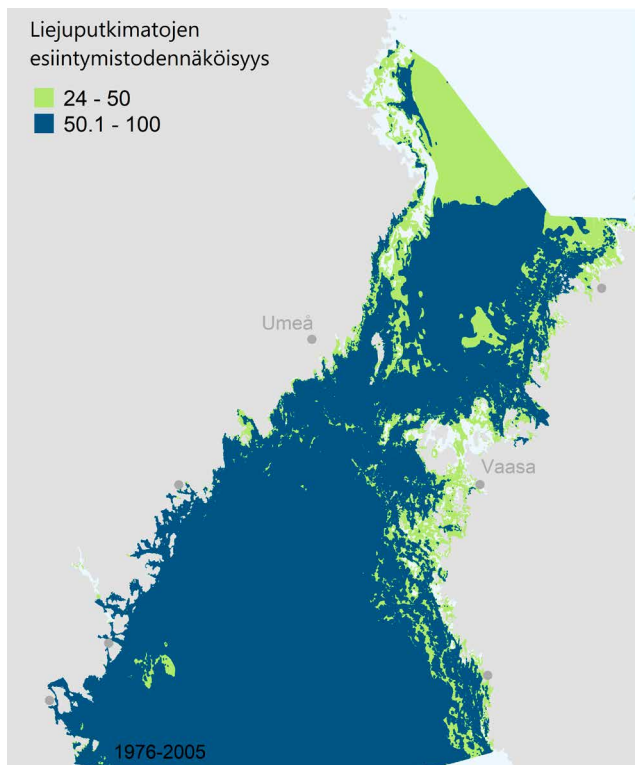
Kuva 17. Surviaissääskien toukat, jotka ovat runsaslukuisia ja joiden levinneisyysalue on tällä hetkellä laaja (vasemmalla), menestyvät hyvin myös tulevaisuudessa (oikealla). Veden lämpötilan kohoaminen voi tehdä syvemmistä alueista niille suotuisampia habitaatteja, mikä laajentaa syvyysaluetta, jolla niitä esiintyy. Mallit perustuvat meriveden olosuhteita kuvaaviin ympäristömuuttujiin, kuten suolapitoisuuteen, lämpötilaan ja ravinteiden määrään. Pohja-ainesta ei ole huomioitu, joten mallien suotuisiksi ennustamat alueet ovat suotuisia elinympäristöjä vain, jos niissä on pehmeää pohjaa.

### 5.2.12. Liejuputkimadot

Liejuputkimadot (*Marenzelleria* spp.) ovat Itämerellä tulokaslajeja, jotka ovat alkuperältään mereisiä tai murtovetisiä mutta sietävät hyvin erilaisia suolapitoisuuksia (esim. Zettler ym. 2002). Niitä esiintyy eri syvyysalueilla ja siten myös erilaisissa veden lämpötiloissa. Koska niiden esiintymisympäristön olosuhteet vaihtelevat näin paljon, ne ovat levinneet Itämerellä laajalle alueelle eikä ennustettu ilmastonmuutos tule vaikuttamaan niihin merkittävästi. EConnect-hankealueen pohjoisimpien osien syvemmät merenpohjat voivat muuttua niille hieman epäsuotuisammiksi alhaisemman suolapitoisuuden vuoksi (Kuva 18). On kuitenkin tärkeää huomioida, että liejuputkimatoja esiintyy kauempana pohjoisella Perämerellä, jossa on hyvin alhainen suolapitoisuus (VELMU 2020). Vaikka lajien esiintymistodennäköisyys siis laskisi hieman pohjoisen syvässä merenpohjissa, ympäristöolosuhteet olisivat niille edelleen riittävän hyvät, jotta ne pysyvät alueella elinvoimaisina. Sitä vastoin monet hankealueen osat, erityisesti matalat rannikkoalueet, muuttuvat näille lajeille suotuisammiksi ennustetun lämpötilojen kohoamisen seurauksena. Liejuputkimadot viihtyvät tunnetusti korkeammissa lämpötiloissa (Zettler ym. 2002; Andersson ym. 2015), mutta niiden

kannat eivät useinkaan kasva kovinkaan runsaiksi matalilla pohja-alueilla, jos niillä esiintyy runsaasti putkilokasveja tai näkinpartaisia (Janas & Kendzierska 2014). Tämän vuoksi tiheämpiä kantoja tavataan todennäköisimmin syvemmillä alueilla, joilla ei tulevaisuudessakaan esiinny kasvillisuutta.

Eteläisellä ja itäisellä Itämerellä liejuputkimadot ovat levinneet pohja-alueille, joilta valkokatka on hävinnyt pääasiassa alhaisten happipitoisuuksien vuoksi. Sama on tapahtunut Pohjanlahdella mahdollisesti perustuotannon vähenemisen seurauksena (Eriksson Wiklund & Andersson 2014). Jos valkokatkakannat pienenevät myös tulevaisuudessa, on mahdollista, että liejuputkimadot leviävät muilta lajeilta vapautuneille pohja-alueille. Liejuputkimatojen kantojen kasvu ei kuitenkaan välttämättä johdu valkokatkojen kantojen pienenemisestä, vaan siitä, että liejuputkimadot ovat jatkaneet leviämistään uusille alueille, ja nämä kaksi ilmiötä ovat vain tapahtuneet samaan aikaan. On myös tärkeää huomioida, että liejuputkimatojen ja muiden ekologiaaltaan samankaltaisten, pohjassa elävien selkärangattomien eläinten lajienvälisiä vuorovaikutuksia ei tunneta edelleenkään tarkasti ja niiden keskinäisiin kilpailuasetelmiin liittyy vielä epävarmuustekijöitä.



**Kuva 18.** Liejuputkimadoille suotuisat alueet vertailujaksolla (vasemmalla) ja tulevaisuudessa (oikealla). Mallit perustuvat meriveden olosuhteita kuvaaviin ympäristömuuttujiin, kuten suolapitoisuuteen, lämpötilaan ja ravinteiden määrään. Pohja-ainesta ei ole huomioitu, joten mallien suotuisiksi ennustamat alueet ovat suotuisia elinympäristöjä vain, jos niissä on pehmeää pohjaa.

## 6. Pohdinta

Hankealueen vedenalainen luonto tulee tulevaisuudessa todennäköisimmin muistuttamaan meille nykyisin tuttua luontoa. Alueella esiintyy samoja lajeja kuin nykyisin, mutta pienemmässä mittakaavassa ne voivat olla hävinneet joiltakin alueilta ja toisaalla taas levinneet uusille alueille, tai niiden suhteelliset osuudet ja siten myös lajien ja lajiryhmien väliset runsaussuhteet ovat voineet muuttua. Tässä tutkimuksessa lajiryhminä mallinnettujen lajiyhteisöjen koostumuksessa ja lajien suhteellisissa osuuksissa ryhmien sisällä voi myös tapahtua muutoksia. Pääasialliset tekijät, jotka aiheuttavat nämä muutokset, ovat veden lämpötilan kohoaminen, jään paksuuden oheneminen ja suolapitoisuuden aleneminen. Meren ekologisen tilan paraneminen ja siitä seuraava eliöiden käytettävissä olevan valon määrän lisääntyminen hyödyttävät monia lajeja. Useat kasvit ja levät menestyvät laajemmalla syvyysalueella, tai niillä on laajempi levinneisyysalue. Tämä levinneisyysalueiden laajeneminen johtuu lajista riippuen jään ohenemisesta, lämpimämmästä vedestä, valon määrän lisääntymisestä tai näiden tekijöiden yhteisvaikutuksesta. Monissa tapauksissa lajeille suotuisien alueiden laajeneminen hankealueen keski- ja eteläosissa enemmän kuin kompensoi pohjoisimpien populaatioiden mahdollista häviämistä tarkasteltaessa aluetta kokonaisuutena.

Vaikka suolapitoisuudessa tapahtuvat muutokset ovat hyvin epävarmoja, uusimmat mallit viittaavat lievään suolapitoisuuden laskuun. Ennustettu lasku on lievä, erityisesti verrattuna moniin aiempiin ennusteisiin (esim. Meier ym. 2006), ja siitä johtuvat lajien levinneisyyden muutokset ovat suuruusluokaltaan arviolta muutamia kymmeniä kilometrejä. Siitä huolimatta jopa tämä lievä suolapitoisuuden lasku voi johtaa muutoksiin sinisimpukan ja liejusimpukan levinneisyydessä. Sitä vastoin ekologisesti tärkeiden haurujen esiintymisen ei odoteta vähenevän, sillä itämerenhauru sietää alhaista suolapitoisuutta ja voi hyötyä muista ympäristön muutoksista, erityisesti kasvillisuudelle käytettävissä olevan valon määrän lisääntymisestä ja jään keskikaksuuden ohenemisesta. Suuremmissa mittakaavassa tarkasteltuna lajit eivät siis häviä suolapitoisuuden lievien muutosten seurauksena, vaan levinneisyydessä tapahtuu vain

alueellisia muutoksia tai sitten ne eivät reagoi muutoksiin lainkaan.

Monissa aiemmissa tutkimuksissa haurujen on ennustettu pikemminkin vähenevän kuin runsastuvan tulevaisuudessa (Vuorinen ym. 2015; Jonsson 2018; Kotta ym. 2019; Saari 2021; Viitasalo & Bonsdorff 2021). Suurimmat erot tämän ja useimpien aiempien tutkimusten välillä ovat hyvin erilaiset suolapitoisuutta koskevat ennusteet ja jään vaikutuksen huomioiminen tulevaisuudessa. Jää on vahingollista monivuotisille kasveille, sillä se hankaa kasvillisuuden pois matalilta rannoilta joka talvi. On mahdollista, että jään vähenemisen vaikutukset, vaikka ne olisivat positiivisia, ovat tässä hankkeessa käytetyissä malleissa liioiteltuja taustalla olevasta aineistorakenteesta johtuen. Sekä jään paksuus että haurujen esiintyminen muuttuvat huomattavasti etelästä pohjoiseen mentäessä, mikä voi vaikuttaa tuloksiin. Myöskään aineistojen resoluutio ei ole optimaalinen, jotta jään vaikutukset voitaisiin ottaa huomioon luotettavasti. Jään vaikutuksen arvioimiseksi ajettiin haurujen levinneisyysmalleista myös versio, johon ei sisällytetty jään vaikutuksia. Kun BRT-mallit ajettiin ilman jään vaikutusta, ne ennustivat, että hauruille suotuisien alueiden määrä vähenisi suolapitoisuuden alenemisen ja lämpötilojen kohoamisen vuoksi, samoin kuin esimerkiksi Saari (2021) on osoittanut. Jään oheneminen on kuitenkin yksi tulevaisuuden muutoksista, johon liittyy vähiten epävarmuutta. Toisin sanoen näyttää todennäköisemmältä, että jää ohenee kuin että suolapitoisuus laskee. Tämän vuoksi päädyttiin käyttämään täyttämällä mallia, jossa on mukana myös jään oheneminen. Tästä huolimatta on huomattava, että jos jään vaikutuksia ei oteta huomioon, myös tulokset ovat erilaiset. Jään oheneminen ei ole ainoa positiivinen muutos haurujen kannalta tulevaisuudessa, sillä myös kasvillisuuden käytettävissä olevan valon määrän lisääntyminen tulee hyödyttämään niitä. Edes lievä suolapitoisuuden lasku ei välttämättä olisi hauruille niin tuhoisa kuin yleisesti ajatellaan, sillä jotkin itämerenhauru-tyksilöt ovat koeolosuhteissa kasvaneet jopa paremmin jäljiteltäessä tulevaisuuden olosuhteita, jossa suolapitoisuus on jopa vain 2,5 promillea (Rugiu ym. 2018). Kaiken kaikkiaan näyttää mahdolliselta, että

hauruille suotuisat alueet tulevat lisääntymään, mutta on muistettava, että myös toisenlainen tulevaisuus on mahdollinen.

Veden lämpenemisen ja jään ohenemisen ennustetaan olevan voimakkaimmat ympäristöoloja koskevista muutoksista, ja niihin liittyy vähiten epävarmuutta. Ne myös aiheuttavat merkittävimmät ja laajimmat muutokset lajien levinneisyydessä. Erityisesti sinisimpukan ja valkokatkan kannat tulevat pieneneen laajoilla alueilla, kun taas vidat, rihmalevät, vesisammalet ja haarukkalevä tulevat lisääntymään useimilla alueilla ja erityisesti Selkämeren rannoilla. Myös surviaissääskien toukat saattavat hyötyä lämpötilan kohoamisesta.

Meren helleaallot ovat yleistynyt ilmiö, josta on keskusteltu viime aikoina paljon (esim. Smale ym. 2019; Paalme ym. 2020). Helleaallot voivat aiheuttaa paitsi kalojen myös selkärangattomien, kuten sinisimpukoiden, ja jopa makrolevien massakuolemia (Graiff ym. 2020; Takolander 2017a). Tämän hankkeen lajien levinneisyysmallinnuksessa käytettiin kuitenkin 30 vuoden kasvukausien keskimääräisiä olosuhteita, joten ääriolosuhteiden, kuten meren helleaaltojen, esiintymistä tai vaikutusta ei tässä yhteydessä huomioitu. Todellisuudessa ääriolosuhteilla voi olla huomattava vaikutus erityisesti hauruihin ja sinisimpukkaan, joiden on jo nyt havaittu kuolevan äärimmäisten tai toistuvien helteiden aikana (Takolander ym. 2017b; Seuront ym. 2019). Tässä tutkimuksessa on käytetty keskimääräisiä ympäristöolosuhteita, koska niiden mallinnukseen liittyy vähemmän epävarmuutta ja koska ne oletusarvoisesti vallitsevat suurimman osan ajasta, toisin kuin vähimmäis- tai enimmäisarvot. On silti hyvä muistaa, että ilmastonmuutoksen ennustetaan voimistavan äärimmäisten sääilmiöiden todennäköisyyttä myös merellä (Meier ym. 2019).

On myös monia lajeja, joiden levinneisyydessä mallit eivät ennusta tapahtuvan suuria muutoksia. Lajeihin, joiden ennustetaan menestyvän suurin piirtein yhtä hyvin tulevaisuudessa kuin nykyäänkin, kuuluvat järvi-ruoko, näkinpartaiset, surviaissääsket ja liejuputkimadot. Suuressa mittakaavassa niiden levinneisyysalueet säilyvät samoina kuin vertailujaksolla.

Osa ennustetuista muutoksista edustaa lajeille ainakin osittain paluuta aiempaan tilaan pikemminkin kuin varsinaista uutta tilannetta. Tämä koskee hauruja ja haarukkalevää, jotka saattavat siirtyä takaisin syvemille alueille, jos näkösyvyys paranee lähelle historiallista tasoa. Samoin se koskee myös liejusimpukkaa, jonka kannat voivat hieman pienentyä ravinnon saata-

vuuden heikkenemisen vuoksi. Liejusimpukkakannat ovat lisääntyneet rehevöitymisen seurauksena, joten niissä on odotettavissa pientä laskua, kun meriveden ravinnepitoisuudet laskevat lähemmäs luonnollista tasoa.

Useat ennustetuista tulevaisuuden lajien levinneisyyden muutoksista riippuvat siitä, noudatetaanko BSAP-ohjelmaa. Monet lajit hyötyvät veden pienemmästä fosfaattipitoisuudesta, mikä johtaa kasviplanktonin vähenemiseen. Tämän seurauksena vesistä tulee kirkkaampia ja valon määrä lisääntyy. Jos Itämeren ympäröivät maat eivät pysty toteuttamaan BSAP:n edellyttämiä ravinnekuormituksen vähennyksiä, tulevaisuus voi näyttää hyvin erilaiselta. Useissa tutkimuksissa onkin päädytty siihen tulokseen, että ainakin lyhyellä aikavälillä ravinteiden määrä vaikuttaa mereen enemmän kuin ilmastonmuutos (Saraiva ym. 2019a; Pihlainen ym. 2020; Viitasalo & Bonsdorff 2021). Tutkimukset viittaavat siihen, että ilmastonmuutos tulee voimistamaan rehevöitymisen vaikutuksia (Saraiva ym. 2019a), mikä voi ylittää useiden meren avainlajien, kuten haurujen ja sinisimpukan stressinsietokyvyn. Merilajit tuskin sietävät molempia muutoksia samanaikaisesti, joten ravinnekuormituksen vähentäminen on välttämätöntä, jotta meren eliöstö voi käyttää resilienssiään ilmastonmuutokseen sopeutumiseen.

Lopuksi on huomioitava, että tässä tutkimuksessa käytetty ilmastoskenaario oli RCP8.5, joka kuvaa huonointa mahdollista tilannetta. Jos kasvihuonekaasupäästöjä onnistutaan vähentämään ja ilmaston lämpenemistä hillitsemään riittävästi, meressä tapahtuvat muutokset muistuttaisivat tässä kuvattuja trendejä mutta olisivat paljon lievempiä, mikä olisi sekä ekosysteemin että siitä riippuvaisten ihmisten kannalta turvallisempi vaihtoehto.

## 6.1. Virhelähteet ja epävarmuustekijät

Kaikkiin tulevaisuutta koskeviin ennusteisiin ja mallinnukseen liittyy aina epävarmuutta. Tässä esiteltyihin skenaarioihin ja tuloksiin liittyy useita epävarmuustekijöitä ja mahdollisia virhelähteitä, jotka on otettava huomioon arvioitaessa tutkimuksen tuloksia. Epävarmuustekijöillä viitataan tässä siihen, että ei ole mahdollista tietää tarkkaan, kuinka ilmasto, yhteiskunta ja lopulta kasvihuonekaasupitoisuudet ja muut siitä riippuvat abioottiset muuttujat ovat kytköksissä toisiinsa ja kehittyvät tulevaisuudessa. Virheilä puolestaan viitataan malleja, menetelmiä ja aineistoja koskeviin puutteisiin. Esimerkiksi lisääntyvien kasvi-

huonekaasupitoisuuksien vaikutukset suolapitoisuuden ovat epävarmoja, sillä ei tiedetä tarkkaan, kuinka paljon esimerkiksi sadanta ja jokien valumat lisääntyvät, mutta jos sadanta olisi ilmastomalleissa laskettu väärin, suolapitoisuutta koskevissa arvioissa olisi myös virhe. Tässä osiossa pohditaan mahdollisia epävarmuustekijöitä ja virhelähteitä tutkimuksen työnkuluksissa ilmastomalleista lajien levinneisyyden muutoksiin sadan vuoden kuluessa.

Kaikki EConnect-hankkeessa esitetyt arvot ja arviot, jotka kuvaavat tulevaisuuden lajien levinneisyyttä, ekosysteemipalveluita (ES) ja kytkeytyneisyyttä, perustuvat pohjimmiltaan valittuihin RCP8.5- ja BSAP-tulevaisuusskenaarioihin. BSAP:n tavoitteiden saavuttaminen on mahdollista ja vaikuttaa kohtuullisen todennäköiseltä, kuten luvussa 3.1 on esitetty. RCP8.5-skenaariota puolestaan pidetään pahimpana mahdollisena ilmastoskenaariona. On kuitenkin mahdollista, että tulevaisuuden näkymät eivät ole niin äärimmäisiä ilmastomuutoksen suhteen kuin mitä RCP8.5-mallissa ennakoitaan. Riippumatta siitä, mitä skenaariota on käytetty, skenaarion valintaan liittyy aina vääjäämätöntä epävarmuutta, sillä ei voida tietää, mitä tulevaisuus tuo tullessaan.

Toinen epävarmuustekijä liittyy RCO-SCOB1-malliin ja ilmastojärjestelmämalleihin (Earth System models) A, B ja D, joihin ympäristömuuttujat perustuvat. Epävarmuus on otettu tässä tutkimuksessa huomioon käyttämällä kolmen eri mallin (A, B ja D) ennusteiden keskiarvoa. Tutkimustuloksiin liittyy kuitenkin edelleen monia epävarmuustekijöitä, sillä esimerkiksi suolapitoisuuden vaikuttaa useita eri prosesseja, joista yhtäkään ei pystytä mallintamaan täydellisesti. Ne myös sisältävät mahdollisia virhelähteitä, sillä virtausmallien avulla saatujen tulosten muuntaminen BRT-mallinnuksessa käytetyiksi rasteritasoiksi käsittää useita vaiheita, joissa on mahdollista, joskin epätodennäköistä, että tiedot vääristyvät.

BRT-mallinnus on tehokas mallinnusmenetelmä, jonka avulla voidaan käsitellä puuttuvia arvoja ja korreloituja muuttujia muiden yleisten ongelmien lisäksi. Kuten kaikkien muidenkin mallinnusmenetelmien yhteydessä on kuitenkin huomioitava, että tutkimustulokset ovat parhaimmillaankin juuri niin laadukkaita kuin tutkimukseen käytetty aineisto. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että sekä vertailujakson että tulevaisuuden lajien levinneisyyksille vaikuttavat lajien havaintoaineistojen laatu ja malleissa käytetyt ympäristömuuttujatasot. Etenkin kasveja ja leviä koskevissa aineistoissa on biologiseksi aineistoksi poikkeuksellisen suuri otoskoko, sillä aineisto on kerätty kymme-

nistä tuhansista havaintopisteistä. Tuloksiin vaikuttaa kuitenkin esimerkiksi esiintymistä (1) ja esiintymättömyyttä (0) kuvaavien arvojen suhde eli esiintyvyyden ns. prevalenssi. Prevalenssi on puolestaan osittain tulosta siitä, että tiettyä määriteltyä kynnsarvoa pienemmät arvot luokitellaan nolaksi. Kynnsarvojen määrittely on jossain määrin mielivaltaista, mutta niitä käytettiin tutkimuksessa, koska malleissa haluttiin keskittyä elinvoimaisiin populaatioihin, jotka voisivat muodostaa biotooppeja eli luontotyyppejä ja tarjota ekosysteemipalveluita. Samalla haluttiin erottaa tiheät populaatiot yksittäisiä tai vain muutamia yksilöitä koskevista havainnoista.

Tutkimuksessa käytetty lajiaineisto on laadukasta, ja ainoa mahdollinen ongelma liittyy havaitsemistodennäköisyyteen. Esimerkiksi erittäin pienikokoiset yksilöt eivät välttämättä näy drop-videoissa, jos ne ovat rihmalevien peitossa. Koska havainnot, joissa tiheys on lajikohtaista kynnsarvoa pienempi, luokiteltiin joka tapauksessa esiintymättömyyttä kuvaaviksi arvoiksi (0), tällä ei ollut vaikutusta tuloksiin.

Kaikkein ilmeisin ja vakavin epävarmuustekijä ja virhelähde mallinnusprosessissa on sekä Suomen että Ruotsin puoleisten alueiden merenpohjan pohja-ainesta kuvaavien riittävän tarkkojen karttojen puute. Sessiilien lajien esiintyminen edellyttää, että alueella on oikeanlaista pohja-ainesta. Koska lajien levinneisyyksille puuttuu tieto pohjan laadusta, lajeille suotuisiksi ennustetut alueet ovat väistämättä yliarvioituja.

Ympäristömuuttujia kuvaavien rasteritasojen resoluutio on suhteellisen matala. Lajien levinneisyyksille on sama resoluutio, koska ne perustuvat näihin ympäristömuuttujiin. Tämän seurauksena saaristoalueiden tai rannikon pienimittakaavaiset gradientit eivät välttämättä näy kunnolla kartoissa. Lajien levinneisyyskartat voivat sekä ali- että yliarvioida lajien esiintymistä. Useimmilla ympäristömuuttujilla oli alun perin vielä alhaisempi resoluutio, mutta niiden solukoko muutettiin samaksi kuin syvyys- ja pohjan avoimuus-aineistoissa, joissa oli pienempi solukoko.

BRT-mallit ajettiin erikseen kullekin lajille, eikä tietoja muiden lajien esiintymisestä käytetty. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että mallit eivät ota huomioon lajienvälisiä vuorovaikutuksia. Todellisuudessa lajien välinen kilpailu on tärkeä lajiyhteisöjä ja lajien levinneisyyksiä muovaava tekijä. Tämä puute tarkoittaa sitä, että lajien levinneisyyksille suotuisiksi ennustetut alueet ovat todennäköisesti monissa tapauksissa liian suuria, koska osa alueesta tulee olemaan joidenkin

kilpailevien lajien elinympäristöä. Koska malleissa ei huomioida pohjan laatua eikä lajienvälisiä vuorovaikutuksia, mallinnettuja esiintymisalueita tulisi siis tarkastella karttoina mahdollisesti suotuisista alueista, jos niiden pohja-aines sattuu olemaan lajille suotuisa ja jos mikään muu laji ei estä mallinnetun lajin leviämistä alueelle.

Mallinnusprosessissa on määritettävä useita parametreja, jotka voivat jossain määrin vaikuttaa tulokseen. Joissain tapauksissa nämä tekijät voivat johtaa hieman erilaisiin lopputuloksiin, ja ne voidaan siten nähdä epävarmuustekijöinä, mutta suuremmassa mittakaavassa niiden merkitys on vähäinen. Mallinnusprosessi ylipäätään on monimutkainen, ja siinä on aina olemassa inhimillisen virheen mahdollisuus. Tämä mahdollisuus minimoitiin ja mallien riittävän hyvä laatu varmistettiin antamalla vertailujakson lajien levinneisyysmallit paikallisten asiantuntijoiden arvioitavaksi.

BRT-mallinnusprosessissa keskeistä on se, että lajien vaste ympäristömuuttujiin päätellään lajihavaintoaineistoista ja ympäristömuuttujien arvoista näillä paikoilla. Näiden vasteiden avulla voidaan tämän jälkeen ennustaa, kuinka suotuisia tietyn lajin kannalta ovat alueet, joilta ei ole kerätty biologista tietoa, mutta joiden ympäristöolot tunnetaan. Tulevaisuuden lajien levinneisyyden mallintamisessa vertailujakson tiedoista pääteltyjä vasteita sovelletaan ennustettuihin

tulevaisuuden ympäristöolosuhteisiin, jotta voidaan ennustaa, missä suotuisia alueita mahdollisesti on tulevaisuudessa. Tämän lähestymistavan taustalla on oletus, että lajien vasteet ympäristömuuttujiin ja niiden toleranssi muuttujien suhteen eivät muutu tulevaisuudessa. Biologiselta kannalta tarkasteltuna lajien ei siis oleteta sopeutuvan muuttuviin olosuhteisiin, vaan vain siirtyvän uusille alueille ja yrittävän pysyä samanlaisessa ympäristössä, joka oli niille aiemmin suotuisa. On epätodennäköistä, että lajien vasteet ja toleranssit muuttuisivat lyhyessä ajassa, ja juuri tästä syystä nopeat ympäristömuutokset ovatkin uhka monille lajeille.

BRT-malleissa tärkeässä osassa ovat ns. vastekäyrät, jotka mallinnusprosessi päättelee aineistoista. Joidenkin lajien ja abioottisten muuttujien osalta on olemassa ennakkotietoa siitä, mikä kunkin lajin vaste tiettyyn muuttujaan on, kuten esimerkiksi se, että haurut suosivat suolaisempaa vettä. Vastekäyriä ei kuitenkaan ole mahdollista muokata suoraan, ja käyrien muotoihin voidaan vaikuttaa vain syöttöaineistoja muokkamalla. Muutamissa tapauksissa, joissa ”oikea” vaste on tiedossa ja joissa vastekäyrä näytti jostain päästä vinoutuneelta, syöttöaineistosta poistettiin harhaanjohtavia havaintoja, jolloin vaste saatiin paremmin todellisuutta vastaavaksi. Useimpien vasteiden osalta tämä ei kuitenkaan ollut tarpeen, koska vasteet vaikuttivat oikeilta, tai se ei ollut mahdollista, koska lajien toleranssit eivät ole tiedossa.

## 7. Johtopäätökset

Hankkeen tavoitteena oli tuottaa uutta materiaalia siitä, miten ilmastonmuutos voi vaikuttaa hankealueeseen sadan vuoden päästä. Koko alueen kattavia ennusteita ei ole aiemmin tehty ilmastonmuutoksen vaikutuksista lajien levinneisyyteen, ekosysteemi-palveluihin tai elinympäristöjen kytkeytyneisyyteen. Tuotettu materiaali on tarkoitettu paitsi suuren yleisön käyttöön myös käytettäväksi ilmastonmuutokseen sopeutumisessa ja yhteiskunnallisessa suunnittelussa. Ilmastonmuutoksen mereen kohdistuvien vaikutusten ennustaminen voi auttaa suunnittelemaan mahdollisiin muutoksiin sopeutumista myös luonnonsuojelun näkökulmasta ja ymmärtämään, mitkä alueet voivat olla tulevaisuudessa erityisen tärkeitä lajeille ja ekosysteemeille.

Tässä hankkeessa käytetyt ilmastomallit osoittavat, että suurimmat ympäristömuutokset tapahtuvat veden lämpötilassa ja jääpeitteessä, ja siten niillä on suurin vaikutus lajeihin ja ekosysteemeihin. Lajien levinneisyyteen voimakkaasti vaikuttavan suolapitoisuuden ei odoteta muuttuvan merkittävästi seuraavien sadan vuoden kuluessa, vaikka tulevaisuuden suolapitoisuutta koskevat ennusteet ovatkin varsin epävarmoja. Jos suolapitoisuus alenisi enemmän kuin mallit ennustavat, muutokset lajien levinneisyydessä voisivat olla suurempia ja vaikuttaa edelleen niiden tuottamiin ekosysteemi-palveluihin. Yleisesti ottaen mallien mukaan hankealueen kasvisto ja eläimistö tulevat olemaan myös tulevaisuudessa pitkälti samankaltaisia kuin vertailujaksolla. Tulevaisuudessa tapahtuvien lajien levinneisyyteen liittyvien merkittävimpien muutosten taustalla ovat aiempaa lämpimämmät ja kirkkaammat vedet, jääpeitteen oheneminen ja nykyistä hieman alhaisempi suolapitoisuus. Merilajit, jotka elävät jo nyt alhaisen suolapitoisuuden suhteen sietokykynsä rajoilla (esim. sinisimpukka), voivat vähentyä tulevaisuudessa, samoin kuin viileitä vesiä suosivat lajit (esim. valkokatka). Lisäksi oheneva ja vähenevä jääpeite hyödyttää erityisesti monivuotisia leviä ja kasveja, koska jää ei hankaa kasvustoja pois joka vuosi. BSAP:ssa esitettyjen ravinteiden vähennystavoitteiden saavuttaminen johtaisi kirkkaampiin vesiin, mikä hyödyttää useimpia lajeja, jotka ovat alun perin sopeutuneet matalampiin ravinnetasoihin.

Ekosysteemi-palveluiden ja ekologisen kytkeytyneisyyden muutokset heijastelevat monelta osin muutoksia lajien levinneisyydessä ja runsaudessa. Lajien tuottamat ekosysteemi-palvelut eivät sinänsä muutu, mutta koska lajien levinneisyysalueissa odotetaan tapahtuvan muutoksia, myös alueellinen ekosysteemi-palvelujen tarjonta muuttuu. Lisätietoja ekosysteemi-palveluihin liittyvistä odotettavissa olevista muutoksista on saatavilla EConnect-raportista *Ekosysteemi-palvelut Pohjanlahden keskiosissa*.

Kytkeytyneisyysanalyysien tulokset viittaavat siihen, että Merenkurkku on lajeille tärkeä reitti Ruotsin ja Suomen välillä. Lajien liikkuminen on helpompaa Pohjanlahden Suomen puoleisella alueella, koska ranta on matala, minkä johdosta ekosysteemit ovat monilajisia ja verraten laajoja. Ruotsin puolella lajien liikkumista vaikeuttaa monin paikoin jyrkästi syvenevä rannikko, mikä rajoittaa monien lajien esiintymisen melko kapealle vyöhykkeelle ja heikentää niiden leviämismahdollisuuksia eri alueiden välillä. Ruotsin rannikkoa Pohjanlahden keskiosissa voidaan siis pitää luontaisesti pirstoutuneena ja herkkänä elinympäristönä. Elinalueiden keskinäistä kytkeytyneisyyttä käsittelevien analyysien tarkemmat tulokset ovat luettavissa EConnect-raportista *Ecological connectivity and resilience of marine protected areas in the central Gulf of Bothnia*. Lajit ja ekosysteemit voivat sopeutua ympäristön muutoksiin, jos muutokset ovat asteittaisia ja tapahtuvat pitkän ajan kuluessa (Jansen ym. 2007; Viitasalo ym. 2015). Ihmisen aiheuttama ilmastonmuutos ei ole asteittainen ilmiö vaan etenee nopeasti (Jansen ym. 2007; Viitasalo ym. 2015) ja asettaa valtavia haasteita lajien sopeutumiskyvylle (Viitasalo ym. 2015; Urban 2015).

Hankkeessa käytettyjen mallien mukaiset ympäristömuuttujiin liittyvät muutokset ovat linjassa muiden Itämeren ja Pohjanlahden tulevaisuutta koskevien ennusteiden kanssa (erityisesti HELCOM & Baltic Earth 2021 ja Meier ym. 2021). On syytä muistaa, että hankkeen tulokset koskevat tiettyjä skenaarioita, lajeja, ekosysteemi-palveluita ja ekologista kytkeytyneisyyttä käsitteleviä analyysejä hankealueella eivätkä välttämättä ole yleistettävissä laajemmin. Tulokset antavat

viitteitä siitä, miten tutkitut lajit voivat reagoida ilmastomuutokseen ja miten ilmastomuutos voi vaikuttaa näihin lajeihin liittyviin erilaisiin ekosysteemipalveluihin ja elinalueiden keskinäiseen kytkeytyneisyyteen. On kuitenkin huomattava, että jos tulevaisuus noudattelee toista ilmastoskenaariota kuin mitä tässä tutkimuksessa on käytetty tai jos BSAP-ohjelmaa ei onnistuta toteuttamaan, tulevaisuus voi näyttää erilaiselta kuin tässä hankkeessa on esitetty. Lisäksi, kuten aiemmin todettiin, ilmastomuutoksen vaikutusten ennustamiseen liittyy paljon epävarmuutta.

EConnect-hanke on keskittynyt ilmastomuutoksen vaikutuksiin Pohjanlahden keskiosissa. Kuten tässäkin raportissa on toistuvasti todettu, myös muilla tekijöillä on merkittävä vaikutus meren tulevaisuuteen. Yksi näistä stressitekijöistä on biodiversiteetin köyhtyminen, joka liittyy läheisesti ilmastomuutokseen.

Tasapainoinen ja toimiva ekosysteemi on ihmisen hyvinvoinnin perusta, ja ympäristökriiseihin reagoimatta jättäminen voi vaarantaa ihmisen hyvän elämänlaadun (IPBES-IPCC 2021). On ratkaisevan tärkeää, että biodiversiteetin köyhtymisen ja ilmastomuutoksen torjumiseksi tehtyjä toimenpiteitä ei nähdä toisistaan erillisinä asioina. Sen sijaan tulisi tehdä toimia, joilla voidaan samanaikaisesti vastata molempiin ongelmiin (Pörtner ym. 2021). Sama pätee muihinkin ympäristöongelmiin, kuten rehevöitymiseen, saastumiseen, merien roskaantumiseen ja muihin lisääntyneestä ihmisen toiminnasta johtuviin haasteisiin, jotka vaikuttavat Itämereen ja Pohjanlahteen. Esimerkiksi rehevöitymisen vähentäminen auttaa samanaikaisesti hillitsemään ilmastomuutoksen vaikutuksia. Jos ymmärrämme tämän, olemme lähempänä tavoitettamme saavuttaa terve meriympäristö kuin mihin pääsisimme keskittymällä kuhunkin ongelmaan erikseen.



# Liitteet

Taulukko A1. Tutkimuksessa käsiteltyihin lajiryhmiin kuuluvien tutkimuslajien ja taksonien latinankieliset nimet.

Lajit/lajiryhmä	Lajit tai suvut
Haurut	<i>Fucus vesiculosus</i> , <i>F. radicans</i>
Vidat	<i>Potamogeton perfoliatus</i> , <i>Stuckenia pectinata</i> (syn. <i>Potamogeton pectinatus</i> )
Vesisammalet	<i>Drepanocladus</i> spp., <i>Fissidens</i> spp., <i>Fontinalis</i> spp., <i>Marchanthiophyta</i> , <i>Warnstorfia</i> spp., <i>Calliergon</i> spp., <i>Platyhypnidium</i> spp.
Haarukkalevä	<i>Furcellaria lumbricalis</i>
Järviruoko	<i>Phragmites australis</i>
Näkinpartaiset	<i>Chara</i> spp., <i>Nitella</i> spp., <i>Nitellopsis</i> sp., <i>Tolypella</i> sp.
Yksivuotiset rihmalevät	<i>Acrosiphonia</i> sp., <i>Aglaothamnion</i> sp., <i>Bangia</i> sp., <i>Batrachospermum</i> spp., <i>Ceramium</i> spp., <i>Chaetomorpha</i> sp., <i>Cladophora fracta</i> , <i>Cladophora glomerata</i> , <i>Dictyosiphon</i> spp., <i>Ectocarpus</i> sp., <i>Elachista</i> sp., <i>Enteromorpha</i> spp., <i>Mougeotia</i> sp., <i>Pylaiella</i> sp., <i>Rhizoclonium</i> sp., <i>Spirogyra</i> sp., <i>Spongomorpha aeruginosa</i> , <i>Stictyosiphon</i> sp., <i>Ulothrix</i> spp., <i>Ulva</i> spp., <i>Urospora</i> sp., <i>Zygnema</i> sp.
Sinisimpukka	<i>Mytilus trossulus x edulis</i>
Liejusimpukka	<i>Limecola balthica</i> (syn. <i>Macoma balthica</i> )
Surviaissääskien toukat	<i>Ablabesmyia</i> sp., <i>Ablabesmyia monilis</i> , <i>Ablabesmyia phatta</i> , <i>Chironominae</i> , <i>Chironomini</i> , <i>Chironomus</i> sp., <i>Chironomus anthracinus</i> , <i>Chironomus plumosus</i> -t., <i>Chironomus semireductus</i> -t., <i>Chironomus thummi</i> -t., <i>Cladopelma viridulum</i> , <i>Cladotanytarsus</i> sp., <i>Cryptochironomus</i> sp., <i>Demicryptochironomus vulneratus</i> , <i>Dicrotendipes</i> sp., <i>Dicrotendipes nervosus</i> , <i>Dicrotendipes pulsus</i> , <i>Endochironomus albipennis</i> , <i>Endochironomus tendens</i> , <i>Harnischia curtilamellata</i> , <i>Microchironomus tener</i> , <i>Micropsectra</i> sp., <i>Orthoclaadiinae</i> , <i>Pagastiella orophila</i> , <i>Parakiefferiella</i> sp., <i>Parakiefferiella smolandica</i> , <i>Paralauterborniella nigrohalteralis</i> , <i>Polypedilum</i> sp., <i>Polypedilum nubeculosum</i> , <i>Polypedilum pullum</i> , <i>Procladius</i> sp., <i>Psectrocladius</i> sp., <i>Psectrocladius psilopterus</i> -agg., <i>Psectrocladius sordidellus</i> -agg., <i>Pseudochironomus</i> sp., <i>Pseudochironomus prasinatus</i> , <i>Sergentia</i> sp., <i>Stempellinella edwardsi</i> , <i>Stictochironomus</i> sp., <i>Tanypodinae</i> , <i>Tanypus punctipennis</i> , <i>Tanypus vilipennis</i> , <i>Tanytarsini</i> , <i>Tanytarsus</i> sp.
Valkokatka	<i>Monoporeia affinis</i>
Liejuputkimadot	<i>Marenzelleria</i> sp., <i>Marenzelleria viridis</i> , <i>M. neglecta</i>

Taulukko A2. Ympäristömuuttujien suhteelliset vaikutukset lajien levinneisyysmalleissa ja mallien AUC- ja D2-arvot.

	<i>Fucus</i> spp.	Sinisimpukka	Liejusimpukka	Surviaissääs- kien toukat	<i>Monoporeia</i> <i>affinis</i>	Vidat	Vesisammalet	<i>Furcellaria</i> <i>lumbricalis</i>	Järviuoko	Näkinpartaiset	Yksivuotiset rihmalevät	<i>Marenzelleria</i>
Syvyys	32,4	10,9	18,6	46,7	37,6	21	14,80	14,5	78,2	25,4	15,1	33,4
Nitraatti NO <sub>3</sub> , pinta/pohja	14,7	16,4	26,4	5,1	9,6	8,7	11,80	8,8	2,2	9,1	7,3	6,3
Jään paksuus	12,9	8,3	7,1	3,6	8,2	6,9	6,60	8,3	1	7,8	6,3	7,5
Avoimuus	9,6	4,2	8,5	3,7	4,5	13,1	11,40	7,2	1,4	10,7	18,7	5,8
Suolapitoisuus, pohja	7,5	10,6	4,5	8,2	6,3	10,4	7,00	17,7	1,2	8,9	7,2	19,2
Lämpötila, pohja	5,8	13,8	4	13,7	18,3	6,7	11,60	10	12,1	6,6	12,2	7,8
Vedessä pystysuora valon vaimeneminen	6,6					14,4	9,10	14,2	1	8,4	10,9	
Fosfaatti PO <sub>4</sub> , pinta/pohja	5,6	7,7	19,5	12,1	3,3	9,1	15,40	6,2	2,3	8,8	6,2	8,8
Happipitoisuus		13,3	7,8	3	7,3		6,50	7		7,9	7	4,5
Etäisyys rannikkoon	4,7	14,8	3,6	4	4,9	9,7	5,80	6,1	0,6	6,4	9,1	6,7
Mallitilastot												
AUC	0,97	0,96	0,88	0,92	0,79	0,92	0,94	0,94	0,98	0,92	0,83	0,84
D2	0,62	0,52	0,35	0,47	0,22	0,36	0,45	0,46	0,69	0,39	-0,27	0,27

# Lähteet

- Andersen, F. Ø. & Skovgaard J., H. 1991. The influence of chironomids on decomposition of organic matter and nutrient exchange in a lake sediment. *Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen*, 24(5), 3051-3055.
- Andersson, A., Meier, H. M., Ripszam, M., Rowe, O., Wikner, J., Haglund, P. & Elmgren, R. 2015. Projected future climate change and Baltic Sea ecosystem management. *Ambio*, 44(3), 345-356.
- Aneer, G. 1989. Herring (*Clupea harengus* L.) spawning and spawning ground characteristics in the Baltic Sea. *Fisheries Research* 8, 169-195.
- Appelgren, K. & Mattila, J. 2005. Variation in vegetation communities in shallow bays of the northern Baltic Sea. *Aquatic Botany* 83, 1-13.
- Austin, Å. N., Hansen, J. P., Donadi, S. & Eklöf, J. S. 2017. Relationships between aquatic vegetation and water turbidity: A field survey across seasons and spatial scales. *PloS one*, 12(8).
- Bergdahl, L., Gipson, A., Haapamäki, J., Heikkinen, M., Holmes, A., Kaskela, A., Keskinen, E., Kotilainen, A., Koponen, S., Kovanen, T., Kågesten, G., Kratzer, S., Nurmi, M., Philipson, P., Puro-Tahvanainen, A., Saarnio, S., Slagbrand, P. & Virtanen, E. 2020. Seamless Maps and Management of the Bothnian Bay SEAmBOTH - Final report, Interreg Nord.
- Berger, J. & Schagerl, M. 2003. Allelopathic activity of *Chara aspera*. *Hydrobiologia* 501, 109-115.
- Bermudez, R., Winder, M., Stuhr, A., Almén, A-K., Engström-Öst, J. & Riebesell, U. 2016. Effect of ocean acidification on the structure and fatty acid composition of a natural plankton community in the Baltic Sea. *Biogeosciences*. 13. 6625-6635.
- Blindow, I., Hargeby, A. & Andersson, G. 2002. Seasonal changes of mechanisms maintaining clear water in a shallow lake with abundant *Chara* vegetation. *Aquatic Botany* 72, 315-334.
- Bonsdorff, E., Laine, A. O., Hanninen, J., Vuorinen, I. & Norkko, A. 2003. Zoobenthos of the outer archipelago waters (N. Baltic Sea) - the importance of local conditions for spatial distribution patterns. *Boreal Environment Research*, 8(2), 135-146.
- Caffrey, J. M. & Kemp, W. M. 1990. Nitrogen cycling in sediments with estuarine populations of *Potamogeton perfoliatus* and *Zostera marina*. *Marine Ecology Progress Series*, 147-160.
- Climate Change in the Baltic Sea. 2021 Fact Sheet. Baltic Sea Environment Proceedings n°180. HELCOM/Baltic Earth 2021.
- Cubasch, U., D. Wuebbles, D. Chen, M.C. Facchini, D. Frame, N. Mahowald, & J.-G. Winther, 2013: Introduction. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- Collins, M., R. Knutti, J. Arblaster, J.-L. Dufresne, T. Fichefet, P. Friedlingstein, X. Gao, W.J. Gutowski, T. Johns, G. Krinner, M. Shongwe, C. Tebaldi, A.J. Weaver & M. Wehner, 2013: Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Donaldi, S., Bergström L., Berglund J.M.B., Bäck, A., Mikkola, R., Saarinen, A. & Bergström U. 2020. Perch and pike recruitment in coastal bays limited by stickleback predation and environmental forcing. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 246.1-11
- Donner, K. O., Lindström, A. & Lindström, M. 1987. Seasonal variation in the vertical migration of *Pontoporeia affinis* (Crustacea, Amphipoda). *Annales Zoology Fennica* 24, 305–313.
- Ehrnsten, E., Bauer, B. & Gustafsson, B. G. 2019 Combined Effects of Environmental Drivers on Marine Trophic Groups – A Systematic Model Comparison. *Front. Mar. Sci.* 6:492. doi: 10.3389/fmars.2019.00492
- Ehrnsten, E., Norkko, A., Müller-Karulis, B., Gustafsson, E. & Gustafsson, B. G. 2020. The meagre future of benthic fauna in a coastal sea—Benthic responses to recovery from eutrophication in a changing climate. *Glob Change Biol.* 26: 2235–2250. <https://doi.org/10.1111/gcb.15014>
- Eilola, K., Meier, HEM., & Almroth, E. 2009. On the dynamics of oxygen, phosphorus and cyanobacteria in the Baltic Sea; A model study. *J. Mar. Syst.* 75, 163–184. doi: 10.1016/j.jmarsys.2008.08.009.
- Ejdung, G., Byrén, L. & Elmgren, R. 2000. Benthic predator–prey interactions: evidence that adult *Monoporeia affinis* (Amphipoda) eat postlarval *Macoma balthica* (Bivalvia). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 253 (2): 243–251.
- Ejdung, G. & Bonsdorff, E. 1992. Predation on the bivalve *Macoma balthica* by the isopod *Saduria entomon*: laboratory and field experiments. *Marine Ecology Progress Series*, 207–214.
- Elith, J., Leathwick, JR. & Hastie, T. 2008. A working guide to boosted regression trees. *Journal of Animal Ecology* 77, 802–813.
- Englund, G., Rydberg, C. & Leonardsson, K. 2008. Long-term variation of link strength in a simple benthic food web. *Journal of animal ecology*, 883–890.
- Eriksson Wiklund, A. K. & Andersson A. 2014. Benthic competition and population dynamics of *Monoporeia affinis* and *Marenzelleria* sp. in the northern Baltic Sea. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 144: 46–53.
- Friedman, A. R., Hwang, Y.-T., Chiang, J. C. H. & Frierson, D. M. W. 2013. Interhemispheric Temperature Asymmetry over the Twentieth Century and in Future Projections. *Journal of Climate* 24: 5419–5433.
- GBIF Secretariat. 2021a. *Potamogeton* L. Global Biodiversity Information Facility. Retrieved 15.4.2021 from <https://www.gbif.org/species/2756560>
- GBIF Secretariat. 2021b. *Chironomidae*. Global Biodiversity Information Facility. Retrieved 28.4.2021 from <https://www.gbif.org/species/3343>.
- Graiff, A., Liesner, D., Karsten, U. & Bartsch, I. 2020. Temperature tolerance of western Baltic Sea *Fucus vesiculosus* - growth, photosynthesis and survival, *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 471, 8–16.

- Greenwell, B., Boehmke, B., Cunningham, J., & GBM Developers. 2019. gbm: Generalized Boosted Regression Models. R package version 2.1.5. <https://CRAN.R-project.org/package=gbm>
- Gusian, A. & Thuiller, W. 2005. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*. 8. 993-1009
- Hansen, J. P., Wikström, S. A., Axemar, H. & Kautsky, L. 2011. Distribution differences and active habitat choices of invertebrates between macrophytes of different morphological complexity. *Aquatic Ecology*, 45(1), 11-22.
- Hansen, J. 2010. Effects of morphometric isolation and vegetation on the macroinvertebrate community in shallow Baltic Sea land-uplift bays. Doctoral dissertation, Department of Botany, Stockholm university.
- Heckwolf, M. J., Peterson, A., Jänes, H., Horne, P., Künne, J., Liversage, K., Sajeva, M., Reusch, T. & Kotta, J. 2020. From ecosystems to socio-economic benefits: A systematic review of coastal ecosystem services in the Baltic Sea. *Science of the Total Environment*, 142565.
- Heilskov, A. C., Alperin, M. & Holmer, M. 2006. Benthic fauna bio-irrigation effects on nutrient regeneration in fish farm sediments. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 339(2), 204-225.
- HELCOM & Baltic Earth. 2021. Climate Change in the Baltic Sea. 2021 Fact Sheet. Baltic Sea Environment Proceedings n°180. HELCOM/Baltic Earth 2021.
- HELCOM. 2021a. Baltic Sea Action Plan, 2021 update. HELCOM. Baltic Marine Environment Protection Commission.
- HELCOM. 2021b. Revised Nutrient Input Ceilings to the BSAP update. HELCOM. Baltic Marine Environment Protection Commission.
- HELCOM. 2020. First draft of the updated BSAP. Retrieved 5.3.2021 from: <https://helcom.fi/first-draft-of-the-updated-baltic-sea-action-plan-is-unveiled-to-helcom-decision-makers-at-hod-59-2020/>
- HELCOM. 2018a. HELCOM Thematic assessment of biodiversity 2011-2016. Baltic Sea Environment Proceedings No. 158. Retrieved 21.4.2021 from: <http://stateofthebalticsea.helcom.fi/wp-content/uploads/2019/09/BSEP158-Biodiversity.pdf>
- HELCOM. 2018b. Implementation of the Baltic Sea Action Plan 2018: Three years left to reach good environmental status. Retrieved 5.3.2021 from: <https://helcom.fi/wp-content/uploads/2019/06/Implementation-of-the-BSAP-2018.pdf>
- HELCOM. 2017. First version of the 'State of the Baltic Sea' report - June 2017 - to be updated in 2018. Retrieved 5.3.2021 from: [http://stateofthebalticsea.helcom.fi/wp-content/uploads/2017/07/HELCOM\\_State-of-the-Baltic-Sea\\_First-version-2017.pdf](http://stateofthebalticsea.helcom.fi/wp-content/uploads/2017/07/HELCOM_State-of-the-Baltic-Sea_First-version-2017.pdf)
- HELCOM. 2013a. Species information sheet: *Fucus vesiculosus*. HELCOM Red List Macrophyte Expert Group.
- HELCOM. 2013b. Species information sheet: *Monoporeia affinis*. HELCOM Red List Macrophyte Expert Group.
- HELCOM. 2013c. Species information sheet: *Furcellaria lumbricalis*. HELCOM Red List Macrophyte Expert Group.
- HELCOM. 2013d. Biotope information sheet: Baltic photic muddy or coarse sediment, sand or mixed substrate dominated by Charales. HELCOM Red List Biotope Expert Group.
- HELCOM. 2013e. Climate change in the Baltic Sea area: HELCOM thematic assessment in 2013. Balt. Sea Environ. Proc. No. 137

- HELCOM. 2012. Abundance and distribution of *Marenzelleria* species in the Baltic Sea. Baltic Sea environment fact sheet 2012.
- HELCOM. 2009. Biodiversity in the Baltic Sea – An integrated thematic assessment on biodiversity and nature conservation in the Baltic Sea. Balt. Sea Environ. Proc. No. 116B. Retrieved 2.3.2021 from: <https://helcom.fi/wp-content/uploads/2019/08/BSEP116B.pdf>
- Herkül, K., Torn, K. & Möller, T. 2017. The environmental niche separation between charophytes and angiosperms in the northern Baltic Sea. Botany Letters 165, 115-127.
- Herkül, K., Kotta, J. & Pärnoja, M. 2011. Effect of physical disturbance on the soft sediment benthic macrophyte and invertebrate community in the northern Baltic Sea. Boreal Environmental Research 16: 209 - 219.
- Hijmans, R.J., Phillips, S., Leathwick, J., & Elith, J. 2017. dismo: Species Distribution Modelling. R package version 1.1-4. <https://CRAN.R-project.org/package=dismo>
- Hägerstrand, H., Himberg, M., Saks, L. & Verliin, A. 2018. Stomach content of whitefish, *Coregonus lavaretus* (Actinopterygii: Salmoniformes: Salmonidae), off the Åland islands, Baltic Sea. Acta Ichthyologica et Piscatoria, 48(1), 71-74.
- Hämet-Ahti, L., Suominen, J., Ulvinen, T. & Uotila, P. 1998. Retkeilykasvio, 4. New edition, Luonnontieteellisen keskuksen kasvimuseo, Helsinki, 656.
- Ikonen, I. & Hagelberg, E. 2007. Ruovikot ja merenrantaniityt. Luontoarvot ja hoitokokemuksia Etelä-Suomesta ja Virossa. Lounais-Suomen ympäristökeskus, Turku. Suomen ympäristö 37/2007, 99.
- IPBES-IPCC. 2021. Scientific outcome of the IPBES-IPCC co-sponsored workshop on biodiversity and climate change. From: [https://ipbes.net/sites/default/files/2021-06/2021\\_IPCC-IPBES\\_scientific\\_outcome\\_20210612.pdf](https://ipbes.net/sites/default/files/2021-06/2021_IPCC-IPBES_scientific_outcome_20210612.pdf)
- IPCC. 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- IPCC. 2019. Summary for Policymakers. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. In press.
- Jaatinen, K., Westerbom, M., Norkko, A., Mustonen, O., Koons, D. N. 2020. Detrimental impacts of climate change may be exacerbated by density-dependent population regulation in blue mussels. Journal of Animal Ecology, 00:1-12. DOI: 10.1111/1365-2656.13377
- Jakobsson, M., Stranne, C., O'Regan, M., Greenwood S.L., Gustafsson, B., Humborg, C. & Weidner, E. 2019. Bathymetric properties of the Baltic Sea. Ocean Science. 15. 905-924
- Janas, U. & Kendzierska, H. 2014. Benthic non-indigenous species among indigenous species and their habitat preferences in Puck Bay (southern Baltic Sea). Oceanologia, 56(3), 603-628.
- Jansen, E., J. Overpeck, K.R. Briffa, J.-C. Duplessy, F. Joos, V. Masson-Delmotte, D. Olago, B. Otto-Bliesner, W.R. Peltier, S. Rahmstorf, R. Ramesh, D. Raynaud, D. Rind, O. Solomina, R. Villalba and D. Zhang, 2007: Palaeoclimate. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- Jonsson, P. R., Kotta, J., Andersson, H. C., Herkül, K., Virtanen, E. Sandman, A. N. & Johannesson, K. 2018. High climate velocity and population fragmentation may constrain climate-driven range shift of the key habitat former *Fucus vesiculosus*. *Diversity and Distributions* 24: 892 - 905.
- Kahanpää, J. & Salmela, J. 2021. Chironomidae. Finnish Biodiversity Info Facility/Suomen Lajitietokeskus. Retrieved 10.4.2021 from <https://laji.fi/taxon/MX.253681>.
- Kallasvuo, M., Lappalainen, A. & Urho, L. 2011. Coastal reed belts as fish reproduction habitats. *Boreal Environment Research* 16, 1-14.
- Kallio, T., Malinen, R., Rönkä, O., Bonn, C., Salminen, P. Jutila, H & Lindberg, W. 2019. Merialuesuunnittelu. Pohjoisen Selkämeren, Merenkurkun ja Perämeren suunnittelalueen ominasipiirteet.
- Karlson, A., Gorokhova, E. & Elmgren, R. 2015. Do deposit-feeders compete? Isotopic niche analysis of an invasion in a species-poor system. *Scientific Reports* 5: 9715.
- Karstens, D. G. S. 2016. Ecosystem services in coastal *Phragmites* wetlands at the southern Baltic Sea: Nutrient regulation, water purification and erosion control. Doctoral dissertation, Universität Rostock.
- Katajisto, T., Lehtiniemi, M. & Setälä, O. 2021. Liejuputkimadot – *Marenzelleria* spp. Vieraslajiportaali, Invasive Alien Species in Finland, SYKE. Retrieved 27.4.2021 from <https://vieraslajit.fi/lajit/MX.53460/show>.
- Kauppi, L., Norkko, A. & Norkko, J. 2015. Large-scale species invasion into a low-diversity system: spatial and temporal distribution of the invasive polychaetes *Marenzelleria* spp. in the Baltic Sea. *Biological Invasions*, 17(7), 2055-2074.
- Kautsky, L. & Kautsky, N. 2000. The Baltic Sea, including Bothnian Sea and Bothnian Bay. Chapter 8. In: Shepper, C. Seas at the millennium: an environmental evaluation. Elsevier Science Amsterdam, 1-3, 121-133.
- Kautsky, N. 1981. On the trophic role of the blue mussel (*Mytilus edulis* L.) in a Baltic coastal ecosystem and the fate of the organic matter produced by the mussels. *Kieler Meeresforschungen Sonderheft*, 5, 454-461.
- Kontula, T. & Raunio, A. 2018. Suomen luontotyyppien uhanalaisuus 2018. Luontotyyppien punainen kirja – Osa 1: Tulokset ja arvioinnin perusteet & Osa 2: luontotyyppien kuvaukset. Suomen ympäristökeskus ja ympäristöministeriö, Helsinki. Suomen ympäristö 5/2018. 388 s. & 925 s.
- Kostamo, K. 2008. The life cycle and genetic structure of the red alga *Furcellaria lumbricalis* on a salinity gradient. *Walter and André de Nottbeck Foundation Scientific Reports* 33, 34.
- Kotta, J. & Ólafsson, E. 2003. Competition for food between the introduced polychaete *Marenzelleria viridis* (Verrill) and the native amphipod *Monoporeia affinis* Lindström in the Baltic Sea. *Journal of Sea Research*, 50(1), 27-35.
- Kotta, J., Paalme, T., Martin, G. & Mäkinen, A. 2000. Major Changes in Macroalgae Community Composition Affect the Food and Habitat Preference of *Idotea baltica*. *International Review of Hydrobiology: A Journal Covering all Aspects of Limnology and Marine Biology*, 85(5-6), 697-705.
- Kotta, J., Vanhatalo, J., Jänes, H., Orav-Kotta, H., Rugiu, L., Jormalainen, V., Bobsien, I., Viitasalo, M., Virtanen, E., and Sandman, A. N. 2019. Integrating experimental and distribution data to predict future species patterns. *Scientific reports* 9, 1821.
- Kraufvelin, P. & Salovius, S. 2004. Animal diversity in Baltic rocky shore macroalgae: can *Cladophora glomerata* compensate for lost *Fucus vesiculosus*? *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 61(2), 369-378.

- Kiirikki, M. 1996. Experimental evidence that *Fucus vesiculosus* (Phaeophyta) controls filamentous algae by means of the whiplash effect. *European Journal of Phycology* 31:61-66.
- Kiirikki, M. & Ruuskanen, A. 1996. How does *Fucus vesiculosus* survive ice scraping? *Botanica Marina*, 39, 133-139.
- Kiirikki, M. & Lehvo, A. 1997. Life strategies of filamentous algae in the northern Baltic Proper. *Sarsia*, 82(3), 259-267.
- Kääriä, J., Rajasilta, M., Kurkilahti, M. & Soikkeli, M. 1997. Spawning bed selection by the Baltic herring (*Clupea harengus membras*) in the Archipelago of SW Finland. *ICES Journal of Marine Science*, 54(5), 917-923.
- Laine, A. O. 2003. Distribution of soft-bottom macrofauna in the deep open Baltic Sea in relation to environmental variability. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 57(1-2), 87-97.
- Lappalainen, J., Kurvinen, L., Kuismanen, L. 2020. Suomen ekologisesti merkittävät vedenlaiset mariluontoalueet (EMMA) – Finlands ekologiskt betydelsefulla marina undervattensmiljöer (EMMA). Suomen Ympäristökeskuksen raportteja. 8. Suomen ympäristökeskus, Merikeskus.
- Lappalainen, A., Westerborn, M. & Vesala, S. 2004. Blue mussels (*Mytilus edulis*) in the diet of roach (*Rutilus rutilus*) in outer archipelago areas of the western Gulf of Finland, Baltic Sea. *Biology of the Baltic Sea*, s. 87-92. Springer, Dordrecht.
- Lappalainen, A., Rask, M., Koponen, H. & Vesala, S. 2001. Relative abundance, diet and growth of perch (*Perca fluviatilis*) and roach (*Rutilus rutilus*) at Tvärminne, northern Baltic Sea, in 1975 and 1997: responses to eutrophication? *Boreal Environment Research*, 6(2), 107-118.
- Leppäranta, M. & Myrberg, K. 2009. Physical Oceanography of the Baltic Sea. Chapter 1. Springer-Praxis books in geophysical sciences, Springer, Berlin.
- Littell, J.S., McKenzie, D., Kerns, B.K., Cushman, S. & Shaw, C.G. 2011. Managing uncertainty in climate-driven ecological models to inform adaptation to climate change. *Ecosphere* 2(9): 102.
- McGuffie, K. & Henderson-Sellers, A. 2014. The climate modelling primer. John Wiley & Sons
- Meier, H. E. M., Kniebusch, M., Dieterich, C., Gröger, M., Zorita, E., Elmgren, R., Myrberg, K., Ahola, M., Bartosova, A., Bonsdorff, E., Börgel, F., Capell, R., Carlén, I., Carlund, T., Carstensen, J., Christensen, O. B., Dierschke, V., Frauen, C., Frederiksen, M., Gaget, E., Galatius, A., Haapala, J. J., Halkka, A., Hugelius, G., Hünicke, B., Jaagus, J., Jüssi, M., Käyhkö, J., Kirchner, N., Kjellström, E., Kulinski, K., Lehmann, A., Lindström, G., May, W., Müller, P., Mohrholz, V., Müller-Karulis, B., Pavón-Jordán, D., Quante, M., Reckermann, M., Rutgersson, A., Savchuk, O. P., Stendel, M., Tuomi, L., Viitasalo, M., Weisse, R., and Zhang, W. 2021. Climate Change in the Baltic Sea Region: A Summary, *Earth Syst. Dynam. Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/esd-2021-67>, in review.
- Meier, H. E. M., Dieterich, C., Eilola, K., Gröger, M., Höglund, A., Radtke, H., Saraiva, S. & Wählström, I. 2019. Future projections of record-breaking sea surface temperature and cyanobacteria bloom events in the Baltic Sea. *Ambio* 48, 1362-1376.
- Meier, H. E. M., Edman, M., Eilola, K., Placke, M., Neumann, T., Andersson, H., Brunnabend, S.-E., Dieterich, C., Frauen, C., Friedland, R., Gröger, M., Gustafsson, B. G., Gustafsson, E., Isaev, A., Kniebusch, M., Kuznetsov, I., Müller-Karulis, B., Naumann, M., Omstedt, A., Ryabchenko, V., Saraiva, S. & Savchuk, O. P. 2019. Assessment of uncertainties in scenario simulations of biogeochemical cycles in the Baltic Sea. *Frontiers in Marine Science*, 6: 46.
- Meier, H. E. M. 2015. Projected Change – Marine Physics. Chapter 10. In: *Second assessment of climate change for the Baltic Sea basin*. The BACC II Author Team. Springer International Publishing, 243-252.



- Meier, H. E. M., Hordoir, R., Andersson, H.C., Dieterich, C., Eilola, K., Gustafsson, B.G., Höglund, A & Schimanke, S. 2012. Modeling the combined impact of changing climate and changing nutrient loads on the Baltic Sea environment in an ensemble of transient simulations for 1961–2099. *Climate Dynamics* 39, 2421–2441.
- Meier, H. E. M., Döscher, R., Coward, A. C., Nycander, J., & Döös, K. 1999. RCO - Rossby Centre Regional Ocean Climate Model: Model Description (version 1.0) and First Results From the Hindcast Period 1992/93. Reports Oceanography No. 26, SMHI, Norrköping.
- Michaud, E., Desrosiers, G., Mermillod-Blondin, F., Sundby, B. & Stora, G. 2006. The functional group approach to bioturbation: II. The effects of the *Macoma balthica* community on fluxes of nutrients and dissolved organic carbon across the sediment–water interface. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 337(2), 178–189.
- Mossberg, B. & Stenberg, L. 2012. Suuri Pohjolan Kasvio. 3. Revised version. Translated by Vuokko, S., & Väre, H. Kustannusosakeyhtiö Tammi. Helsinki.
- Mustamäki, N., Cederberg, T. & Mattila, J. 2014. Diet, stable isotopes and morphology of Eurasian perch (*Perca fluviatilis*) in littoral and pelagic habitats in the northern Baltic Proper. *Environmental biology of fishes*, 97(6), 675–689.
- Navenhand, J.N. 2012. How will ocean acidification affect Baltic Sea ecosystems? An assessment of plausible impacts on key functional groups. *AMBIO*. 41. 637–644.
- Niemelä, M. 2012. Eläimet rantaan-kyllä vai ei? Opas kestävään rantalaiduntamiseen. Natureship -publication.
- NOAA. 2021. The NOAA annual greenhouse gas index (AGGI). Retrieved 10.6.2021 from: <https://gml.noaa.gov/aggi/aggi.html>
- Olsson, S. & Korpelainen, H. 2013. Single nucleotide polymorphisms found in the red alga *Furcellaria lumbricalis* (Gigartinales): new markers for population and conservation genetic analyses. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 23(3), 460–467.
- Paalme, T. Torn, K., Martin, G., Kotta, I. & Suursaar, Ü., 2020. Littoral benthic communities under effect of heat wave and upwelling events in NE Baltic Sea. *Journal of Coastal Research*, 95, 133–137.
- Paavilainen, P. 2005. Järviruon hyötykäyttö kosteikoissa haja-asutuksen jätevesien ja maatalouden valumavesien puhdistuksessa. Thesis, Sustainable development, Turun ammattikorkeakoulu.
- Pajusalu, L., Martin, G., Paalme, T. & Pöllumäe, A. 2016. The effect of CO<sub>2</sub> enrichment on net photosynthesis of the red alga *Furcellaria lumbricalis* in a brackish water environment. *PeerJ*, 4, e2505.
- Pellikka, H., Leijala, U., Johansson M.M., Leinonen, K. & Kahma K.K. 2018. Future probabilities of coastal floods in Finland, *Continental Shelf Research* 157, 32–42. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2018.02.006>
- Peterson G., Allen, C.R. & Holling, C.S. 1998. Ecological resilience, biodiversity, and scale. *Ecosystems*. 1(1). 6–18.
- Pihlainen, S., Zandersen, M., Hyytiäinen, K., Andersen, H. E., Bartosova, A., Gustafsson, B., Jabloun, M., McCrackin, M., Meier, H. M., & Olesen, J. E. 2020. Impacts of changing society and climate on nutrient loading to the Baltic Sea. *Science of The Total Environment* 138935.
- Porfirio, L.L., Harris, R.M.B., Lefroy, E.C., Hugh, S., Gould, S.F., Lee, G., et al. 2014. Improving the Use of Species Distribution Models in Conservation Planning and Management under Climate Change. *PLoS ONE* 9(11): e113749.

Poutanen, M. & Steffen, H. 2014. Land uplift at Kvarken Archipelago /High Coast UNESCO world heritage area. *Geophysica*. 50(2). 49-64

Pörtner, H.O., Scholes, R.J., Agard, J., Archer, E., Arneeth, A., Bai, X., Barnes, D., Burrows, M., Chan, L., Cheung, W.L., Diamond, S., Donatti, C., Duarte, C., Eisenhauer, N., Foden, W., Gasalla, M. A., Handa, C., Hickler, T., Hoegh-Guldberg, O., Ichii, K., Jacob, U., Insarov, G., Kiessling, W., Leadley, P., Leemans, R., Levin, L., Lim, M., Maharaj, S., Managi, S., Marquet, P. A., McElwee, P., Midgley, G., Oberdorff, T., Obura, D., Osman, E., Pandit, R., Pascual, U., Pires, A. P. F., Popp, A., ReyesGarcía, V., Sankaran, M., Settele, J., Shin, Y. J., Sintayehu, D. W., Smith, P., Steiner, N., Strassburg, B., Sukumar, R., Trisos, C., Val, A.L., Wu, J., Aldrian, E., Parmesan, C., Pichs-Madruga, R., Roberts, D.C., Rogers, A.D., Díaz, S., Fischer, M., Hashimoto, S., Lavorel, S., Wu, N., Ngo, H.T. 2021. IPBES-IPCC co-sponsored workshop report on biodiversity and climate change; IPBES and IPCC. DOI:10.5281/zenodo.4782538.

Rajasilta, M., Eklund, J., Hänninen, J., Kurkilahti, M., Kääriä, J., Rannikko, P. & Soikkeli, M. 1993. Spawning of herring (*Clupea harengus membras* L.) in the Archipelago Sea. *ICES Journal of Marine Science*, 50(3), 233-246.

R Core Team. 2019. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

Reiss, H., Cunze, S., König, K., Neumann, H. & Kröncke, I. 2011. Species distribution modelling of marine benthos: a North Sea case study. *Marine Ecology Progress Series*. 442. 71-86

Rinkineva, L. & Bader, P. 1998. Chapter 2.3 Den marina miljön in Kvarkens natur. Kvarkenrådets publikationer 10.

Rolff, C., Elfving, T. 2015. Increasing nitrogen limitation in the Bothnian Sea, potentially caused by inflow of phosphate-rich water from the Baltic Proper. *Ambio*, 44: 601-611.

Rugiu, L. 2018. Tolerance of Baltic Sea rocky littoral communities to climate change. PhD dissertation. University of Turku.

Rugiu, L., Manninen, I., Rothäusler, E. & Jormalainen V. 2018. Tolerance to climate change of the clonally reproducing endemic Baltic seaweed *Fucus radicans*: is phenotypic plasticity enough? *Journal of Phycology*. 54(6).888-898

Ruosteenoja, K., Jylhä, K. & Kämäräinen M. 2016. Climate projections for Finland under the RCP forcing scenarios. *Geophysica*. 51(1). 17-50

Saari, P. 2021. Modelling changes in the distribution of *Fucus* spp. in different eutrophication and climate change scenarios. Master's thesis, University of Helsinki.

Saarinen, A., Salovius-Laurén, S. & Mattila, J. 2018. Epifaunal community composition in five macroalgal species – What are the consequences if some algal species are lost? *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 207, 402-413.

Sahla, M., Tolvanen, H., Ruuskanen, A. & Kurvinen, L. 2020. Assessing long term change of *Fucus* spp. communities in the northern Baltic Sea using monitoring data and spatial modeling. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 245: 107023.

Saraiva, S., Meier, H. E. M., Andersson, H., Höglund, A., Dieterich, C., Gröger, M., Hordoir, R., Eilola, K. 2019a. Uncertainties in Projections of the Baltic Sea Ecosystem Driven by an Ensemble of Global Climate Models. *Frontiers in Earth Science* 6: 244. doi: 10.3389/feart.2018.00244

Saraiva, S., Meier, H. E. M., Andersson, H., Höglund, A., Dieterich, C., Gröger, M., Hordoir, R., Eilola, K. 2019b. Baltic Sea ecosystem response to various nutrient load scenarios in present and future climates. *Climate Dynamics* 52:3369-3387.

- Schagerström, E. 2015. On the endemic *Fucus radicans* in the Baltic Sea. Doctoral dissertation, Department of Ecology, Environment and Plant Sciences, Stockholm University.
- Schubert, H. & Blindow, I. 2003. Charophytes of the Baltic Sea. The Baltic Marine Biologists publication No. 19, 325.
- SeaGIS 2.0. Map portal. SeaGIS 2.0 -project, Interreg Botnia-Atlantica. Retrieved year 2021 from <https://seagis.org/internt/>.
- Seuront, L., Nicastro, K. R., Zardi, G. I. & Goberville, E. 2019. Decreased thermal tolerance under recurrent heat stress conditions explains summer mass mortality of the blue mussel *Mytilus edulis*. *Scientific Reports* 9, 17498.
- Simon-Nutbrown, C., Hollingsworth, P. M., Fernandes, T. F., Kamphausen, L., Baxter, J. M. & Burdett, H. L. 2020. Species Distribution Modeling Predicts Significant Declines in Coralline Algae Populations Under Projected Climate Change With Implications for Conservation Policy. *Frontiers in Marine Science* 7:575825.
- Smartsea project. Strategic Research Council at the Academy of Finland, project SmartSea, grant number 292 985. <https://smartsea.fmi.fi/>.
- SMHI. 2021. Klimatscenarier. Retrieved 24.1.2021 from: <https://www.smhi.se/klimat/framtidens-klimat/fordjupade-klimatscenarier/met/sverige/medeltemperatur/rcp85/2071-2100/year/anom>
- Snickars, M., Sundblad, G., Sandström, A., Ljunggren, L., Bergström, U., Johansson, G. & Mattila, J. 2010. Habitat selectivity of substrate-spawning fish: modelling requirements for the Eurasian perch *Perca fluviatilis*. *Marine Ecology Progress Series*, 398, 235-243.
- Slavich, E., Warton, D.I., Ashcroft, M.B., Gollan, J.R. & Ramp, D. 2014. Topoclimate versus macroclimate: how does climate mapping methodology affect species distribution models and climate change projections?. *Diversity and Distributions*. 20. 952-963
- Smale, D. A. et al. Marine heatwaves threaten global biodiversity and the provision of ecosystem services. *Nature Climate Change* 9, 306-312.
- Struyf, E., Van Damme, S., Gribsholt, B., Bal, K., Beauchard, O., Middelburg, J. J. & Meire, P. 2007. *Phragmites australis* and silica cycling in tidal wetlands. *Aquatic botany*, 87(2), 134-140.
- Takolander, A., Cabeza, M., Leskinen, E. 2017a. Climate change can cause complex responses in Baltic Sea macroalgae: a systematic review. *Journal of Sea Research* 123: 16-29.
- Takolander, A., Leskinen, E & Cabeza, M. 2017b. Synergistic effects of extreme temperature and low salinity on foundational macroalga *Fucus vesiculosus* in the northern Baltic Sea. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 495, 110-118.
- The Convention on Biological Diversity. 2021. Ecologically or Biologically Significant Marine Areas (EBSA). Retrieved 15.10.2021 from <https://www.cbd.int/ebsa/>.
- Torn, K., Peterson, A., & Herkül, K. 2020. Predicting the impact of climate change on the distribution of the key habitat-forming species in the NE Baltic Sea. *Journal of Coastal Research* 95, 177-181.
- Torn, K., Peterson, A., Herkül K. & Suursaar Ü. 2019. Effect of climate change on the occurrence of charophytes and angiosperms in brackish environment. *Webbia*, 74:1, 167-177
- UNESCO. 2021. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. World Heritage Convention. High Coast / Kvarken Archipelago. Retrieved 31.5.2021 from: <https://whc.unesco.org/en/list/898/>

- Urban, M. C. 2015. Accelerating extinction risk from climate change. *Science* 348, 571-573.
- Uzars, D., Ustups, D., Müller-Karulis, B. & Urtans, E. 2003. Size structure and feeding ecology of fish communities in the surf zone of the Eastern Baltic. *ICES Annual Science Conference*: 06, 11.
- Vanni, M. J. 2002. Nutrient cycling by animals in freshwater ecosystems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 33(1), 341-370.
- VELMU. 2020. The Finnish Inventory Programme for the Underwater Marine Environment (VELMU). VELMU-data, Finnish Environment Institute SYKE, Marine center.
- Viitasalo, M. & Bonsdorff, E. 2021. Global climate change and the Baltic Sea ecosystem: direct and indirect effects on species, communities and ecosystem functioning. *Earth System Dynamics Discussions*, 1-38.
- Viitasalo, M., Kostamo, K., Hallanaro, E. L., Viljanmaa, W., Kiviluoto, S., Ekeboom, J. & Blankett, P. 2017. Meren aarteet: löytöretki Suomen vedenalaiseen meriluontoon. *Gaudeamus*, 518.
- Viitasalo, M., Blenckner, T., Gårdmark, A., Kaartokallio, H., Kautsky, L., Kuosa, H., Lindegren, M., Norkko, A., Olli, K. & Wikner, J. 2015. Environmental Impacts - Marine Ecosystems. In: The BACC II Author Team (eds) *Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin*. Regional Climate Studies. Springer, Cham.
- von Storch, H., Omstedt, A., Pawlak, J. & Reckermann, M. 2015. Introduction and Summary. Chapter 1. In: *Second assessment of climate change for the Baltic Sea basin*. The BACC II Author Team. Springer International Publishing, 1-22.
- Vuorinen, I., Hänninen, J., Rajasilta, M., Laine, P., Eklund, J., Montesino-Pouzols, F., et al. (2015). Scenario simulations of future salinity and ecological consequences in the Baltic Sea and adjacent North Sea areas - implications for environmental monitoring. *Ecol. Indic.* 50, 196-205. doi: 10.1016/j.ecolind.2014.10.019
- Waldeck, P. & Larsson, K. 2013. Effects of winter water temperature on mass loss in Baltic blue mussels: Implications for foraging sea ducks. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 444: 24-30.
- Wallentinus, I. 1979. Environmental influences on benthic macrovegetation in the Trosa-Asko area, northern Baltic Proper. II. The ecology of macroalgae and submersed phanerogams. *Asko Laboratory* 25:1-210.
- Westerbom, M. & Jattu, S. 2006. Effects of wave exposure on the sublittoral distribution of blue mussels *Mytilus edulis* in a heterogeneous archipelago. *Marine Ecology Progress Series*, 306, 191-200.
- Westerbom, M., Kilpi, M., & Mustonen, O. 2002. Blue mussels, *Mytilus edulis*, at the edge of the range: population structure, growth and biomass along a salinity gradient in the north-eastern Baltic Sea. *Marine Biology* 140: 991-999.
- Wibig J., Maraun D., Benestad R., Kjellström E., Lorenz P., Christensen O.B. 2015. Projected Change—Models and Methodology. In: The BACC II Author Team (eds) *Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin*. Regional Climate Studies. Springer, Cham.
- Wikström, S. A. & Kautsky, L. 2007. Structure and diversity of invertebrate communities in the presence and absence of canopy-forming *Fucus vesiculosus* in the Baltic Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 72(1-2), 168-176.
- Wilcke, R.A.I., Barring, L. 2016. Selecting regional climate scenarios for impact modelling studies. *Environmental modelling & software* 76, 191-201.

Zander, C. D., Rupp, K., Böhme, K., Brix, S., Detloff, K. C., Melander, J, Nordhaus, I. & Schiro, C. 2015. The phytal fauna of the SW Baltic Sea and its importance as reservoir for fish prey - Die Phytalfauna der SW-Ostsee und ihre Bedeutung als Reservoir von Fischnahrung. Bulletin of Fish Biology, 15(1/2), 33-51.

Zettler, M. L., Daunys, D., Kotta, J. & Bick, A. 2002. History and success of an invasion into the Baltic Sea: the polychaete *Marenzelleria* cf. *viridis*, development and strategies. Invasive aquatic species of Europe. Distribution, impacts and management, 66-75.

Zhang, Y., Lai, X., Zhang, L., Song, K., Yao, X., Gu, L. & Pang, C. 2020. The influence of aquatic vegetation on flow structure and sediment deposition: A field study in Dongting Lake, China. Journal of Hydrology, 584, 124644.







EUROOPAN UNIONI

**Interreg**  
**Botnia-Atlantica**  
Euroopan aluekehitysrahasto