

TARTU ÜLIKOOL
ÖKOLOOGIA JA MAATEADUSTE INSTITUUT
ZOOLOOGIA OSAKOND
LOODUSRESSURSSIDE ÕPPETOOL
EESTI MEREINSTITUUT

Annaleena Vaher

Läänemere karbikasvanduste süsiniku sidumise võimekus

Magistritöö

Juhendajad: Jonne Kotta, Francisco R. Barboza

TARTU 2024

Mytilus edulis (Linnaeus, 1758) ja *Mytilus trossulus* (Gould, 1850) on Läänemeres kivistel põhjadel domineerivad elupaiku kujundavad karbiliigid. Nad on ka olulised liigid vesiviljeluses. Läänemeres elab valdavalt nende kahe karbiliigi hübriidvorm, söödav rannakarp *Mytilus edulis/trossulus*. Oma toitu hangib liik veesambast, filtreerides vett läbi keha. Sellest tulenevalt on söödaval rannakarbil oluline ökoloogiline roll merevee puhastamisel liigsetest toitainetest. Teisest küljest on liigil majanduslik väärtus, kuna temast saab valmistada toitu, loomasööta ja väetisi.

Kliimamuutuste leevendamise kontekstis ei ole seni uuritud Läänemerre rajatud karbifarmide süsiniku talletamise võimekust. Magistritöö käigus kaardistasime esmakordselt karbikasvanduste pikaajalist süsiniku sidumist Läänemere erinevates piirkondades ning analüüsisime, kuidas erinevad keskkonnategurid mõjutavad süsiniku salvestamist karpide kodadesse nii praeguste kui ka prognoositud tuleviku keskkonnatingimuste korral. Selleks kasutasime dünaamilise energiabilansi mudelit, mille loomisel kasutati Läänemere karbikasvanduste alusandmeid.

Tulemused näitavad, et süsiniku sidumise võimekus varieerub erinevate Läänemere piirkondade vahel kümnekordselt, olles suurim Põhjamere läheduses asuvates lahtedes tingituna kõrgeimast soolsuse tasemest. Töös uuritud tulevikustsenaariumit tuleb käsitleda kui niinimetatud „musta stsenaariumit“ Läänemere karbifarmidele, sest tuleviku soolusprognooside varieeruvus on äärmiselt suur. Analüüsitud tulevikustsenaariumi kohaselt on sajandi lõpuks oodata olulist karpide arvukuse ja süsiniku sidumise võimekuse vähenemist Läänemere ida- ja põhjapiirkondades. Seda põhjustab prognoositud Läänemere pinnavee soolsuse märkimisväärne vähenemine. Magistritöö näitas, et soolus on olulisim keskkonnategur, mis mõjutab söödava rannakarbi süsiniku sidumise potentsiaali Läänemere regioonis. Lisaks rõhutab töö vajadust asukohapõhiste strateegiate järele karbikasvanduste planeerimisel, mis arvestaksid nii kohalike kui ka piirkondlike keskkonnatingimustega.

Märksõnad: süsiniku sidumise võimekus, lubjastumine, vesiviljelus, DEB mudel, söödav rannakarp (*Mytilus edulis/trossulus*), Läänemeri

Carbon capture potential of blue mussel farms in the Baltic Sea

Blue mussels (*Mytilus edulis* and *Mytilus trossulus*) are dominant, habitat-forming mussel species on rocky bottoms in the Baltic Sea. They are also important species in aquaculture. In the Baltic Sea, a hybrid form of these two mussel species – *Mytilus edulis/trossulus*, is predominant. Blue mussel obtains its food from the water column by filtering water through its body. Consequently, mussels have a significant ecological role in reducing excess nutrients from the water. On the other hand, mussels have an economic value as it can be used to produce food, animal feed, and fertilizers.

In the context of mitigating climate change, the carbon storage capacity of mussel farms in the Baltic Sea has not been studied. In this master's thesis, we mapped for the first time the long-term carbon sequestration of mussel farms in different regions of the Baltic Sea and analyzed how various environmental factors affect carbon storage potential in mussel shells under current and plausible future environmental conditions. For this, we used a dynamic energy balance model, created using data that is collected across the Baltic Sea from mussel farms and growth experiments.

The results indicate that in current conditions, the carbon sequestration capacity varies over tenfold between different regions across the Baltic Sea, being the highest in the outer region near the North Sea due higher salinity levels. The projected future scenario analysed in this study should be considered as an hypothetical „worst case scenario“ for the Baltic Sea blue mussels due to high variability in future salinity predictions. According to the analysed future scenario, a significant decrease in mussel populations and carbon sequestration capacity is expected by the end of the century in the eastern and northern regions of the Baltic Sea. This is caused due to predicted significant decrease in the surface water salinity of the Baltic Sea. The master's thesis demonstrated that salinity is the most important environmental factor affecting the carbon sequestration potential of the mussels in the Baltic Sea. Additionally, the thesis emphasizes the need for location-based strategies in mussel farm planning process which are considering both local and regional environmental conditions.

Keywords: Carbon capture potential, biocalcification, aquaculture, DEB model, blue mussel, Baltic Sea

Sisukord

1.	Sissejuhatus	7
2.	Kirjanduse ülevaade	9
2.1	Söödava rannakarbi levik, eluviis ja ökoloogia.....	9
2.2	Karbikasvatuse trendid Euroopas, Läänemeres ja Eestis	11
2.1.1	Karbikasvanduste mõjud Läänemere keskkonnale.....	12
2.3	Süsinikuringe	14
2.2.1	Süsinikuringe meres.....	14
2.2.2	Süsinikuvoog karbis.....	16
2.4	DEB mudel	17
2.4	Keskkonnategurite prognoositud muutused Läänemeres	18
2.4.1	Soolsus	19
2.4.2	Merevee temperatuur	20
2.4.3	Toitained ja klorofüll a	21
3.	Materjal ja meetodika.....	22
3.1	Uurimisala iseloomustus.....	22
3.2	Mudelid.....	23
3.2.1	Söödava rannakarbi algandmed DEB mudeli sisendiks	23
3.2.2	Keskkonnategurite algandmed.....	24
3.2.3	Standardfarmi mõõtühik	25
3.3	Stsenaariumid	25
3.4	Andmeanalüüs	28
3.5	Töö autori roll	29
4.	Tulemused	30
4.1	Karpide süsiniku sidumise võimekuse kaardistamine Läänemeres.....	30
4.2	Süsiniku sidumise võimekuse sesoonne ja ruumiline varieeruvus.....	31
4.3	Uuritud keskkonnatingimuste mõju süsiniku sidumise võimekusele.....	32
4.3.1	Keskkonnategurite osakaalu erinevus Läänemere piirkondades	32

4.3.2 Keskkonnategurite osakaal erinevates ruumimastaapides	34
5. Arutelu	35
5.1 Muutlik Läänemeri – varieeruvus ajas ja ruumis	35
5.2 Oleviku- ja tulevikustsenaariumi võrdlus	35
5.3 Keskkonnategurite mõju	37
5.4 Karbikasvanduste efektiivsus kliimamuutuste leevendamisel	38
Summary	43
Tänuavaldused	45
Kasutatud kirjandus	46

1. Sissejuhatus

Inimtekkelise kliimamuutuste poolt mõjutatud maailmas on jätkusuutliku arengu tagamiseks oluline leida innovatiivseid lahendusi, mis ühendaksid omavahel nii looduskaitse kui ka majanduskasvu. See pealtnäha paradoksaalne sektorite vahelise koostöö saavutamine on paras väljakutse pidevalt arenevas maailmas, kus tihtipeale soositakse kõrgeimat tootlust lubavaid ettevõtmisi. Kliimamuutuste üha süvenevate negatiivsete mõjude leevendamiseks saab rohujuure ja valitsuse tasemel nii mõndagi ära teha. Üks tõhusamaid pidurdusvahendeid kliimasoojenemisele on ülemaailmne süsihappegaasi emissioonide vähendamine ja suurem süsiniku pikaajaline sidumine (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2023). Just pikaajaline süsiniku talletamine on oluline, et vähendada süsiniku koguhulka atmosfääris, mis aitab kaasa kliimamuutuste negatiivsete mõjude leevendamisele. Kõige suurem süsiniku reservuaar asub maailma ookeanides (Bollmann, 2010). Sellest tulenevalt tasub jätkusuutlike lahenduste leidmiseks pöörata pilk vahelduseks mere poole.

Eesti jagab Läänemerd üheksa arenenud tööstusriigiga. Läänemerd kajastatakse tihti kui reostunud ja eutrofeerunud, aeglase veevahetusega riimveelist veekogu (Pawlak jt., 2009). Eutrofeerumine ehk toitainete üleküllus vees on Läänemeres suur probleem (Kotta jt., 2019). Läänemerre kuhjunud toitained pärinevad maismaalt, peamiselt põllumajandus- ja metsandussektorist (Sonesten jt., 2018). Seega peaksid lahendused algama ka maismaalt. Samas tuleb keskenduda ka juba merre ladestunud toitainete vähendamisele. Meres elab arvukalt erinevaid karbiliike, kes toitumise käigus filtreerivad merest välja lämmastiku- ja fosforiühendeid ja keda saab kasutada mere eutrofeerumisilmingute leevendajatena (le Gouvello jt., 2022).

Kuid kas karbid suudaksid olla ka efektiivsed süsinikusidujad? Kõik lubjakestaga organismid talletavad teatud määral süsinikku oma organismis (Frankignoulle jt., 1994). Viimastel aastatel on merebioloogide tähelepanu kliimamuutuste valguses pööratud just lubikestaga organismide nagu austrite, korallide ja karpide võimekusele siduda süsinikku (Filgueira R jt., 2015; Gallagher, 2015; Duarte jt., 2017; Alonso jt., 2021; Bertolini jt., 2021). Läänemeres ei ole uuritud, kas ja kui palju on võimeline meie arvukaim karbiliik, söödav rannakarp süsinikku pikaajaliselt enda kodades talletada. Toitainete ja süsiniku sidumise võimendamiseks on võimalik luua karbikasvandusi ning hinnata selliste farmi toitainete ja süsiniku sidumise potentsiaali (Kotta jt., 2023). Kuigi Eestis vetes on selline

tegevus veel võrdlemisi lapsekingades, siis maailmas on vesiviljelusega juba aastatuhandeid tegeletud. Läänemere karp on väikest kasvu ning toidulauale otse ei sobi, küll osatakse neid juba väärindada inimtoiduks, söödaks, väetisteks, ehitussektoris ja mujalgi (Alonso jt., 2021). Seega on karbikasvanduste rajamine innovaatiline lahendus, mis aitab vähendada eutrofeerumist ning samaaegselt teenida tulu.

Eelpooltoodust tulenevalt on magistritöö põhieesmärgiks kaardistada Läänemere karbikasvanduste pikaajalist süsiniku sidumise võimekust, prognoosides mudelite abil süsiniku hulka, mis on talletatud söödava rannakarbi kotta. Mudeli sisendandmed pärinevad erinevatest Läänemeres asuvatest töenduslikest ja eksperimentaalsetest karbifarmidest. Lisaks uurib magistritöö soolsuse, temperatuuri ja vee taimse hõljumi osatähtsust karpide süsiniku sidumise võimele nii praegustes kui ka prognoositud tuleviku tingimustes.

Uurimisküsimused on järgnevad:

- 1) Kui tõhus keskkond on Läänemeri *M. edulis/trossulus* karbikasvanduste rajamiseks, kui farmi eesmärgiks on pikaajalise süsiniku talletamine ja seeläbi süsiniku veest eemaldamine?
- 2) Kuidas muutub süsiniku sidumise võimekus Läänemere erinevates piirkondades, ruumilistes mastaapides ja kasvutsükli jooksul praeguste ja tulevikus prognoositud keskkonnatingimuste korral?
- 3) Kuidas mõjutavad süsiniku sidumise potentsiaali erinevad keskkonnategurid (soolsus, temperatuur ja vee taimne hõljum)?
- 4) Kas tulemuste abil on võimalik välja tuua soovitusi, kuidas suurendada Läänemere karbikasvanduste efektiivsust kliimamuutuste leevendamisel?

2. Kirjanduse ülevaade

2.1 Söödava rannakarbi levik, eluviis ja ökoloogia

Söödav rannakarp, *M. edulis*, *M. trossulus* ja nende hübriidid pärinevad Atlandi ookeanist, kuid nüüd on levinud üle kogu põhjapoolkera (Knöbel jt., 2021). Läänemeres on ta oluline võtmeliik (Vuorinen jt., 2002). Söödav rannakarp elab sublitoraalses sügavusvööndis (0,5–30 m) ning eelistab elupaikadena rahnuderikkaid karisid ja paljandeid, kuhu ta massiliselt kõvale substraadile kinnitub (Sanders jt., 2018). Läänemeres leidub kahte liiki söödavat rannakarpi: *M. edulis* ja *M. trossulus* (Väinölä ja Strelkov, 2011). Mõlema liigi levik on otseses sõltuvuses soolsuse tasemega. *M. edulis* eelistab kõrgema soolsusega (12–30) Läänemere lääneosa piirkondi (Kattegat, Taani väinad, Suur- ja Väike-Belt) (Tedengren jt., 1990). *M. trossulus* seevastu talub tunduvalt madalamat soolsust (5–8) ning asustab Läänemere ava- ja põhjaosa terves ulatuses (Väinölä ja Strelkov, 2011). Liik ei esine Botnia lahes, kus soolsus langeb allapoole *M. trossulus*’e taluvuspiiri (Stuckas jt., 2009; Kijewski jt., 2019). Suur soolsuse varieerumine Läänemeres toob kaasa olukorra, kus langevad kokku kahe karbiliigi elupaigad ja sellega on kaasnenum söödava rannakarbi hübriidvormi *M. edulis/trossulus* tekke (Knöbel jt., 2021). Pelgalt morfoloogiliste tunnuste pealt on hübriide liikidest võimatu eristada, aga värskemad geeniuuringud on näidanud, et Läänemere karbipopulatsioonide levinuim *Mytiluse* vorm ongi just nende kahe liigi vaheline hübriid *M. edulis/trossulus* (Larsson jt., 2017; Kijewski jt., 2019).

Rannakarbi maksimaalne pikkus ja kaal sõltuvad mitmest keskkonnategurist – ennekõike soolsusest ning väiksemal määral ka temperatuurist ja toitainete kättesaadavusest (Kautsky, 1982; Kotta jt., 2015). Kirjanduse andmetel on söödav rannakarp levinud vees, mille temperatuur jääb -2 ja 30 C° vahele (Järvekülj ja Veldre, 1963). Madalam soolsuse tase pidurdab karbi koja kasvu ja seab piirid maksimaalsele suurusele (Sanders jt., 2018). Sellest tulenevalt on Läänemeres söödava rannakarbi pikkus madala soolsusega Narva lahes kuni kümme korda väiksem ja Läänemere keskosas kuni kolm korda väiksem Põhjameres ja Atlandi ookeanis elavate karpide pikkusest (Tedengren jt., 1990; Ojaveer, 2014). Võrreldes Põhjameres leviva *M. edulis*’ga on Läänemere karpidel õhemad ja piklikumad kojad (Schlieper, 1972). Need tunnused on tingitud kodade madalamast kaltsiumkarbonaadi (CaCO₃) sisaldusest (Knöbel jt., 2021).

Karbikesta CaCO_3 kaudu saab lisaks muule informatsioonile hinnata ka seda, kui palju suudab karp oma koja sisse süsinikku talletada (Frankignoulle jt., 1994). Antud teadmine on oluline, sest kotta salvestatud süsinikuioon on veesambast eemaldatud ning üldjuhul ei satu niipea tagasi süsinikuringesse (Emerson ja Hedges, 2008). Süsinikuühendi sidumine aitab leevendada kliimamuutuseid, täpsemalt vähendada süsihappegaasi – suurimas koguses inimtegevusest pärineva kasvuhoonegaasi, millel on pikk atmosfääri eluaeg ja mis oluliselt mõjutab Maa kiirgusbilanssi – osakaalu Maa atmosfääris (Berner, 2003). Lubikestade mereorganismide (näiteks austrite, karpide ja korallide) roll süsiniku sidumisel on globaalse süsinikuringe oluline osa (Filgueira jt., 2016). Kuigi karpide süsiniku sidumise võimekuse uurimine on rahvusvaheliselt edenenud ja päevakohane (Aubin jt., 2018; Ehrnsten jt., 2020; Martini jt., 2022; Sea jt., 2022; Hamer ja Foekama 2023), on siiski vaja koguda rohkem informatsiooni, et mõista täielikult karpide süsiniku sidumise võimekust, seda eriti muutuvates keskkonnatingimustes (Álvarez-Salgado jt., 2022). Läänemeres on uuritud süsinikuringet rannikumeres ja näiteks meriheina elupaikades (Röhr jt., 2018; Dahl jt., 2024), kuid looduslike karbipopulatsioonide ja karbikasvatuste osatähtsus pikaajalise süsiniku sidumisel on siiani suuresti teadmata.

Läänemeres toituvad rannakarpidest järgmised kalaliigid – noor tursk *Gadus morhua*, läänemere lest *Platichthys solemdali* ja ümarmudil *Neogobius melanostomus* (Nõomaa jt., 2022; Saat, 2022). Karbid on väga tähtis toiduobjekt ka rändkrabile *Rhithropanopeus harrisi* ning arvukad ümarmudila ja rändkrabi kooslused, kes on Läänemeres võõrliigid võivad toiduks tarbida enamuse piirkonna karpidest (Kotta jt., 2018). Siiski, vesiviljeluse perspektiivist lähtudes, ei kujuta ükski mainitud liik karbikasvanduse karpidele erilist ohtu. Rändkrabi eelistab mudasema põhjaga elupaiku, näiteks Pärnu ja Matsalu lahte, kus on lisaks toidule ka palju varjumisruumi (Kotta jt., 2018). Karbi- ja kalakasvatustele sobivad aga eelkõige tugevate hoovusega ja kivisema põhjaga karide piirkonnad (Mats, 2006; Kotta jt., 2020a). Krabid väldivad liikumist veesambas ning seetõttu ei ole oodata, et nad ka massiliselt jõuaksid karbikasvatustesse. Ümarmudil, noor tursk ja lest, kelle eelistatud toiduks on karbid, on põhjatoidulised kalad (Saat, 2022), kes üldjuhul ei satu toituma veesamba pinnakihti, kus asuvad tavaliselt karbiliinid. Ümarmudilal puudub ka ujupõis ning ta ei saa kasvatustes karpidest toituda. Seega mõjutavad need kiskjad ennekõike looduslikke karbipopulatsioone, kes on kinnitunud merepõhjas olevatele kõvale substraadile.

2.2 Karbikasvatuse trendid Euroopas, Läänemeres ja Eestis

Ülemaailmne karbikasvatuste kogutoodang 2020. aastal küündis 2,2 miljoni tonnini koguväärtusega 3.8 miljardit USD, mille toodangust 8% moodustas söödav rannakarp (FAO, 2024). Euroopa karbikasvanduste kogutoodang oli 2007–2016 aastal valdavalt stabiilne: hinnanguliselt 500 000 tonni aastas (EUMOFA, 2022). Võrreldes eelmise sajandi lõpuga ja analüüsides pikaajalist trendi, siis on Euroopa karbikasvanduse kogutoodang langenud 20% võrra (Avdelas jt., 2021). Toodangu vähenemine on tingitud mitmete keskkonnatingimuste ja inimõjude kombinatsioonist, sealhulgas karbipatogeenidest, intensiivistunud sinivetikaõitsengutest, võõrliikide arvukuse suurenemisest, odavast turuhinnast ning halvenenud keskkonnatingimustest (Des jt., 2020; Avdelas jt., 2021). Läänemeres on karbikasvatused veel üsna innovaatiline tegevusvaldkond, seda ennekõike karbikasvu piirava riimveelise elukeskkonna tõttu, mis teeb karpide kasvatamise ja väärindamise keerulisemaks kui suurema soolsusega veekogudes (Kotta jt., 2019). Läänemere rannikuvetesse on rajatud umbes kümme tükki tööstuslikku ning lisaks ka mitukümmend eksperimentaalset karbifarmi, millest enamikest pärinevad ka käesoleva töö mudelis kasutatud karpide algandmed. Viimastel aastatel on Euroopa Liit aktiivselt rahastanud karbifarme otseselt või kaudselt toetavaid projekte. Näiteks Baltic Blue Growth (BBG) projekti eesmärgiks oli leida innovatiivseid tehnoloogilisi lahendusi karbikasvanduste haldamiseks ja suurendada sinimajanduse osakaalu Läänemeres. OLAMUR projekt uurib, kuidas ühendada vesiviljelus merealplaneerimisega, näiteks avamere energiatoodanguga (tuulepargid) või kalakasvatustega.

Kuigi vesiviljelust defineeritakse kui veeorganismide kasvatamist, siis Eesti kontekstis tähendab vesiviljelus eelkõige kala- ja jõevähi kasvatust, millega 2020. aastal tegeles 48 ettevõtet (OÜ Alkranel, 2023; PTA, 2024). Lisaks tegeleb käputäis ettevõtteid ka vetikaviljelusega. Näiteks Est-Agar AS traalib Kassari lahes punavetikaliiki agarik (*Furcellaria lumbricalis*), et toota furtsellaraani. Põllumajandus- ja toiduameti koduleheküljelt võib välja lugeda, et Euroopas levinud karbikasvatusalasid pole Eestis registreeritud külma kliima ja vee temperatuuri tõttu (PRIA, 2024). Probleeme karbikasvanduse rajamiseks tekitab ka keeruline ja aeganõudev seadusandlus. Nimelt on karbiliinide loomiseks ehk kaldaga püsivalt mitteühendatud ehitise loomiseks praeguse

seadusandluse kohaselt vaja taotleda Tarbijakaitse ja Tehnilise Järelevalve Ametist hoonestusluba (Kotta jt., 2020b). Seega on näiteks nii meretuuleparkide, sadamarajatistele kui ka karbikasvanduste ehitamine sarnaselt reguleeritud bürokraatlik protsess, mis nõuab omajagu ressursi ja pealehakkamist. Eestis on palju kasutamata potentsiaali karbifarmide rajamises, sest praegu tegutseb meie vetes vaid üks karbifarm, mis asub Saaremaal Tagalahas. Osa käesoleva magistritöö algandmetest pärineb ka Tagalahe farmist. Söödav rannakarp võib elada maksimaalselt kuni 50 aastaseks (Järvekülj ja Veldre, 1963), aga Läänemere karbikasvandustes on ühe kasvatustsükli pikkuseks arvestatud keskmiselt poolteist aastat. Karbid ise saavutavad suguküpsuse 1–2 aastasel ning sigimine toimub hiliskevadadel (Järvekülj ja Veldre, 1963). Üks karp võib muneda kuni 40 miljonit marjatera, millest areneb pelaagiline vastne, kes kinnitub karbikasvandustes veesambasse riputatud kõite peale ning hakkab siis kasvama (Kotta jt., 2023).

2.1.1 Karbikasvanduste mõjud Läänemere keskkonnale

Läänemeri on ümbritsetud üheksast arenenud tööstusega ja rahvarohkest riigist, mis kõik avaldavad negatiivset mõju Läänemere ökosüsteemile (Meier jt., 2022). Looduslikult on Läänemeri väga aeglase veevahetusega riimveeline veekogu, mille liigid elavad tihti oma levila piierialal (Bonsdorff ja Pearson, 1999). Sellest tulenevalt on Läänemere looduslik tasakaal kergesti mõjutatav inimtegevuse poolt ning kliimamuutustega kaasnevad keskkonnatingimuste muutused mõjutavad oluliselt Läänemere elustikku.

Läänemere suurimaks keskkonnaprobleemiks on mere rikastumine toitainetega ehk eutrofeerumine. Liigne toitainete (lämmastiku- ja fosforühendite) hulk käivitab mikrovetikate ja niitjate makrovetikate vohamise, väheneb vee läbipaistvus, merepõhja tekib rohkelt orgaanilist ainet, mis omakorda viib hapnikudefitsiidini põhjalähedastes veekihtides ja tundlikumate veeorganismide hukkumiseni (Kotta jt., 2019). Kliimamuutustest tingitud halokliini ehk soolsuse hüppekihi teravnemine takistab Läänemere veemasside vertikaalset segunemist, mis omakorda süvendab suurenenud hapnikupuudust ehk elustikuta alade teket sügavates põhjakihtides (Randmaa jt., 2020).

Üks võimalikke leevendusi toitainete vähendamiseks Läänemeres on karbikasvanduste rajamine, sest karbid toimivad kui looduslikud filtrid (Kotta jt., 2020). Nimelt on karbid filtroidulised organismid ning toitudes fütoplanktonist, nad akumulierivad oma kudedesse ka märkimisväärse koguse biogeenne (Carstensen jt., 2014). Karpidega asustatud merepõhja

üks ruutmeeter suudab puhastada vastavalt karpide suurusele ja arvukusele 50–280m³ vett ööpäevas (Kotta jt., 2015). Lisaks on leitud, et karbifarmid suudavad eemaldada keskkonnast kuni 25 korda rohkem toitained kui samasuure pindalaga märgala (Lindahl ja Kollberg, 2009). Mudelarvutuste põhjal on hinnatud, et 1 km² suurune karbifarm on võimeline eemaldama Lääne-Eesti vetest ühe kasvutsükli jooksul ligikaudu 70 tonni lämmastikku ja 5,4 tonni fosforit (Kotta jt., 2019). Seega on mõistlik rajada karbifarme kalakasvatuste naabrusesse, et kompenseerida kalasumpadest tulevate liigtoitainetest tingitud negatiivset keskkonnamõju ümbritsevatele elupaigale ja põhjaloomastikule (Kotta jt., 2019). Näiteks on Tagalahes asuv karbikasvandus rajatud spetsiaalselt vikerforellikasvatuse lähedusse, et vähendada sumpadest pärineva kalatoidu ja väljaheidete ülejääke. Forellide elutegevuse käigus tekkinud orgaanilised ühendid on karpidele toiduks ning kui karbid kasvutsükli lõpus veest välja võetakse, eemaldatakse merest ka nende sisse kumuleerunud N ja P ühendid ning lisaks ka karpidesse talletunud süsinik. Vee puhastamine on eriti vajalik rannikumeres asuvatele kalakasvatustele, kus veevahetus on aeglane ja forelli väljaheidetest pärinevate toitainete ülekoormus võib tekitada eutrofeerumise ja anoksia põhjakihtides (Kotta jt., 2023). Selline sünergiline kasutus kahe vesiviljelusvormi vahel on heaks näiteks, kuidas ühe tööstusharuga saab toota nii majanduslikku kasu kui ka samaaegselt parandada keskkonda. Sellised majanduse ja keskkonna vahel tasakaalu loovad lahendused on hädavajalikud, et tagada inimkonna jätkusuutlik areng.

Karbikasvanduste negatiivne mõju ümbritsevatele merekeskkonnale võib tekkida juhul kui karpe kasvatatakse liiga tihedalt vähese veevahetusega madalas rannikuvees (Kotta jt., 2019). Liiga tihedalt asustatud karbid tekitavad jääkainete ülekülluse, mille lagunemine põhjasetetes võib tekitada alumises veesambas hapnikuvaeguse (Stadmark ja Conley, 2011). Seiretööde käigus ei ole Läänemeres tänini leitud karbifarme, mille põhjakihtides oleks mõõdetud kriitiliselt madalaid hapnikuväärtuseid (Kotta jt., 2019). Teine negatiivne keskkonnamõju võib pärineda karbikasvanduste infrastruktuurist, näiteks tugevate tormide või jäärohke talve tõttu lahti murdunud poidest, köitest või raamidest, mis tekitavad mereprügi. Lisaks võivad liiga kerged karbiliinide ankrud tekitada merepõhja kahjustusi, kuid sellised keskkonnamõjud on tühised võrreldes laevanduse poolt tekitatud mõjudega.

2.3 Süsinikuringe

Süsinik on laialt levinud element maismaal, vees ja atmosfääris. Atmosfääris esineb süsinik peamiselt süsinikdioksiidi (CO_2) kujul, mida toodavad looduslikud ja inimtekkelised allikad: vulkaanipursked, tulekahjud, taimede ja loomade hingamine, fossiilkütuste põletamine, metsaraied ja põllumajandus (Berner, 2003). Lisaks on süsinik ka üks olulisemaid elemente elusorganismides, sest see moodustab eluks vajalikke alusühendeid nagu valgud, rasvad ja süsivesikud (Berg jt., 2012). Süsinikuvahetus ehk süsinikuringe on pidev süsiniku liikumine erinevate elus- ja eluta looduse süsteemide vahel. Süsinikuringe aktiivsed osapooled kas vabastavad süsinikku ringesse või vastupidi seovad süsinikku endasse (Berg jt., 2012).

Süsinikuringe jaguneb pika- ja lühiajaliseks süsinikuringeks (Emerson ja Hedges, 2008). Pikaajaline ehk aeglane süsinikuringe talletab süsiniku ookeanisse ning aastatuhandete kuni miljonite aastate jooksul muutub see lubjastumise läbi seteteks ning selle protsessi käigus on suur osa süsinik ringlusest eemaldatud (Berner, 2003). 80% maailmas olevast süsinikust on just sedamoodi setetesse talletatud (Khatiwala jt., 2013). Süsinik satub vähesel määral maismaasetetest tagasi atmosfääri ilmastiku mõjul läbi murenemise või porsumise. Selle protsessi käigus reageerib sademevesi lubja- ja liivakiviga, mis omakorda lahustab näiteks CaCO_3 kaltsiumiks ja vesinikkarbonaadiks (2HCO_3) ning kannab neid jõgede kaudu merre (Emerson ja Hedges, 2008).

Lühiajaline süsinikuringe hõlmab süsiniku liikumist elusorganismide ja atmosfääri vahel. Selles tsüklis kulub süsiniku liikumiseks aega tavaliselt vaid mõned aastad või isegi nädalad (Berner, 2003). Atmosfääri ja maismaa vaheline süsinikuvahetus toimub põhiliselt läbi fotosünteesi ja respiratsiooni. Autotroofid sünteesivad atmosfäärist tuleva CO_2 ning kasutavad seda fotosünteesi käigus energia saamiseks ja biomassi tootmiseks (Emerson ja Hedges, 2008). Peamine CO_2 vabanemine elusorganismidest atmosfääri toimub aga läbi hingamise ehk gaasivahetuse.

2.2.1 Süsinikuringe meres

Veeökosüsteemidel on väga oluline roll süsinikuringes, sest kõige suurem süsiniku reservuaar asub ookeanides. Süsinikuringe ookeanis hõlmab kolme peamist protsessi: süsiniku lahustumist ookeanivees, süsiniku liikumist ookeani erinevates kihtides ja süsiniku transporti ookeanist tagasi atmosfääri (Emerson ja Hedges, 2008). Kõige rohkem seovad

vees süsinikku suurvetikad ja taimne hõljum ehk fütoplankton (autotroofid), seda läbi fotosünteesi. Sealt liigub osa süsinikku läbi toiduahela edasi loomsesse hõljumisse ehk zooplanktonisse ja kaladesse, kus üks osa süsinikust ladestub peale organismi surma setetesse (mitme miljoni aasta jooksul tekivad nendest fossiilkütused) (Emerson ja Hedges, 2008). Lühiajaline süsinikuringe toimib ka meres läbi mereorganismide hingamise. Süsiniku liikumine ookeani erinevates kihtides toimub konvektsiooni, difusiooni ja advektsiooni abil (Emerson ja Hedges, 2008). Konvektsioon toimub, kui merevee soojusvahetus toimub ookeani pinnakihi ja sügavama vee vahel. Kui pindmine vesi jahutab ja raskeneb, siis vesi liigub allapoole, samas kui sügavam soojem vesi tõuseb ülespoole. Selle protsessi tulemusena toimub süsiniku ülekande ookeani erinevatesse kihtidesse. Difusioon on protsess, kus lahustunud aine liigub kõrge kontsentratsiooniga alalt madalama kontsentratsiooniga alale. Advektsioon on protsess, kus lahustunud aine liigub koos liikuva veega, näiteks hoovustega. Ookeani pinnakihis toimuv difusioon võimaldab süsinikdioksiidil lahkuda ookeanist atmosfääri, kui süsinikdioksiidi kontsentratsioon atmosfääris on madalam kui ookeanis (Emerson ja Hedges, 2008).

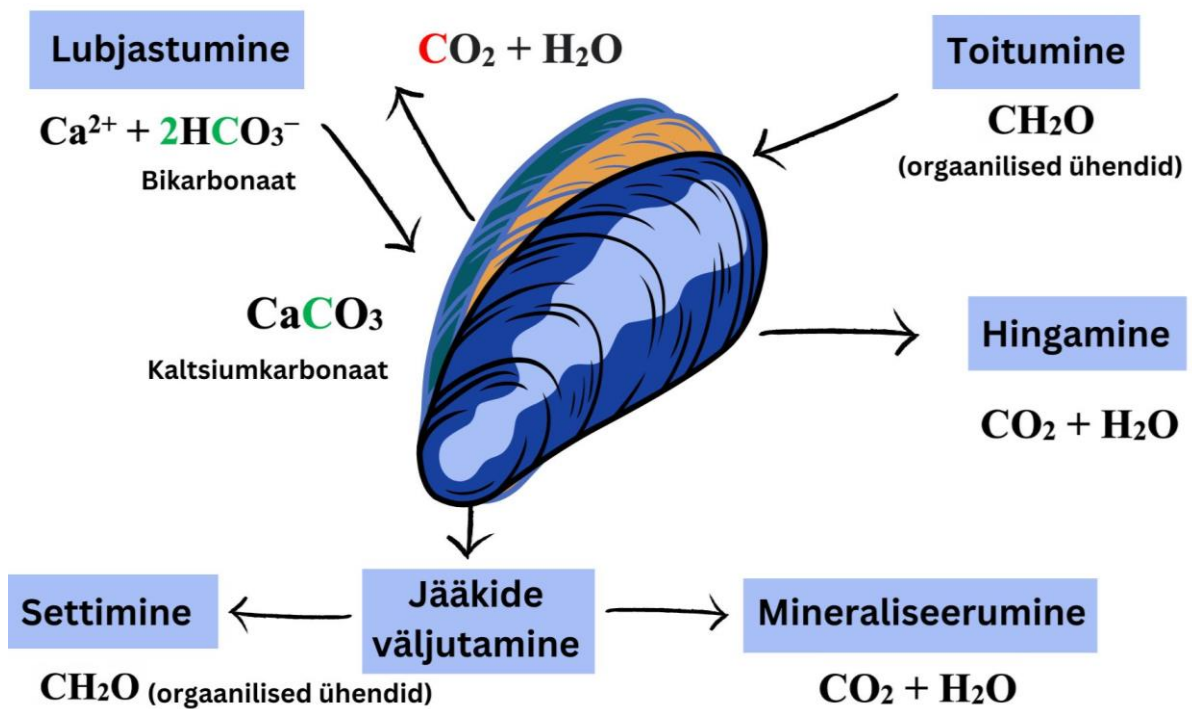
Süsiniku lahustumine ookeanivees toimub peamiselt ookeani pindmises kihis, kus on kergem süsinikdioksiidi lahustada (Archer jt., 2009). Ookeanis lahustunud süsiniku hulka mõõdetakse tavaliselt süsinikdioksiidi osarõhu ($p\text{CO}_2$) abil. See süsinik võib olla nii orgaaniline kui anorgaaniline (DIC või DOC). Anorgaanilise süsiniku vertikaalset veesamba vahelist liikumist nimetatakse ka süsiniku pumbaks, mis omakorda mängib olulist rolli temperatuuri reguleerimisel erinevate veekihtide vahel (Emerson ja Hedges, 2008).

Reageerides veega, moodustab vette sattunud süsinik süsihappe lahuse (H_2CO_3) (Emerson ja Hedges 2008). Osa sellest süsihappe lahusest reageerib vee ionidega, moodustades vesinikioonid (H^+) ja karbonaatioonid (CO_3^-). Suurem vesinikioonide kontsentratsioon langetab pH taset vees, mis soodustab omakorda merevee hapestumist. Aastatel 1751–1994 on ookeanite pinnavee pH tase vähenenud 8.25 pealt 8.14, mis tähendab peaaegu 30% H^+ ionide kontsentratsiooni kasvu maailma ookeanides (Doney jt., 2014). See mõjutab ka ookeanide suutlikkust süsinikdioksiidi omastada. Prognooside kohaselt on praeguse süsinikdioksiidi emissioonide kasvutempo juures ookeanide pH tase aastaks 2100 langenud 0,5 ühikut (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2023). Liigne CO_2 hulk ookeanis mõjutab merevee soojusvahetust ja hoovuste toimimist, mis võib omakorda mõjutada Maa kliimat. Ookeanide hapestumise tõus on samuti otseseks ohuks

mereorganismidele, eelkõige lubikesta sisaldavatele karpidele ja korallidele, sest karbonaatioone, millest lubikesta ehitada jääb madalama pH tasemega vees järjest vähemaks (Mollica jt., 2018).

2.2.2 Süsinikuvoog karbis

Süsinikuvoogusid saab karpides hinnata indiviidi või populatsiooni tasandil. Karbikasvatuse keskkondliku mõju määratlemisel tuleb hinnata karbikasvatuse elutsükli, mis hõlmab tootmise käigus (karbijärkude kinnitumine, karpide korjamine, pakendamine jms.) eraldunud süsinikuemissioone (Filgueira jt., 2015; Ray jt., 2018) ning karpides liikuva ja ladestuva süsiniku hulka (Joonis 1).



Joonis 1: Söödava rannakarbi elutegevuse neli peamist ainevahetuseprotsessi ja nendega seotud süsiniku liikumisvood. Rohelisega on märgitud lubjastumise käigus pikaajaliselt karbi kesta seotud süsinik ja punasega sama protsessi käigus eraldunud süsinik (kiire süsinikuring).

Jooniselt näeme, et lubikestaga organismide elutegevuse käigus vabaneb süsinik hingamise ja kaltsifitseerumise ning talletub samuti kaltsifitseerumise käigus. Bioloogiline lubjastumine ehk biokaltsifikatsioon (inglise keelne termin „*biogenic calcification*“) on protsess, mille käigus mereorganismid ehitavad lubikesta, sidudes veest kaltsiumiooni

(Ca²⁺) ja lahustunud vesinikkarbonaadi (2HCO³⁻), mis moodustab tugevaks struktuuriks vajaliku kaltsiumkarbonaadi (Emerson ja Hedges 2008).



Protsessi käigus seotakse üks osa süsinikust kaltsiumkarbonaati, kuid teine osa eraldub süsinikdioksiidi vormis tagasi merre (Heinze jt., 2015). Seega satub lubjastumise käigus süsinik nii pika- kui ka lühiajalisesse süsinikuringesse. Lühiringesse sattuva ehk merre tagasi eraldunud süsiniku saatus on täpselt teadmata. Vabanenud CO₂ võivad koheselt fotosünteesi käigus kasutusele võtta vetikad või see võib sattuda abiootilistesse protsessidesse, näiteks taaslahustuda vees või vabaneda tagasi atmosfääri (Heinze jt., 2015). Neid protsesse mõjutavad erinevad keskkonnatingimused, sealhulgas merevee aluselisisus, pH, temperatuur, soolsus või veetaimede ohtrus (Filgueira jt., 2015). Karbikotta seotud süsinikul on potentsiaal saada osaks pikaajalisest süsinikuringest kui pärast karbi surma lubjastub kest ja muutub osaks põhjasetetest. Sellisel juhul saavad kestade sees olevad süsinikuelemendid osaks eelpool kirjeldatud pikaajalisest süsinikuringest ja on setetesse lukustatud miljoniteks aastateks. Samuti ei pääse karbifarmi karbikodadesse ladestunud süsinik enam ringesse, kuna maismaal on CaCO₃ lagunemise protsess aeglane. Karpidesse seotud süsiniku taasvabanemist saab veelgi rohkem takistada, kasutades karbikodasid näiteks teedehituses ehitusmaterjalina, purustades karbikestasid ja kasutades pulbrit põllumajanduses haritava maa aluselisemaks muutmiseks, töödeldes karpides olevaid toitaineid et luua bioväetist või lastes kofjad tagasi merre piirkondades, kus on vaja vähendada merevee happelisust (Martínez García jt., 2016; Alonso jt., 2021). Antud protsessi käigus aitab atmosfäärist eemaldatud süsinik leevendada kliimamuutuste mõju ning just sellepärast keskendubki magistritöö ainult karbi kotta salvestatud süsiniku hulga.

2.4 DEB mudel

Teadlased on loonud mitmeid kasulikke bioenergeetilisi mudeleid, et uurida süsiniku sidumise võimekust lubikestega organismides (Brigolin jt., 2009; Morris ja Humphreys, 2019; Ehrnsten jt., 2020; Dong jt., 2022). Siiski puuduvad usaldusväärsed mudelid, mis suudaks prognoosida ja selle abil kaardistada pikaajaliselt seotud süsiniku koguhulka karbikasvandustes. Dünaamilise energiabilansi (inglise keeles „*Dynamic Energy Budget*“) mudeli rakendamine on tõhus meetod selle väljakutse lahendamiseks. DEB-teooria lähtub

termodünaamilisest energia- ja massibilansi põhimõttest ning loob ühtse kvantitatiivse raamistiku kõikide elusorganismide ainevahetuse aspektide (energia liikumise) dünaamiliseks kirjeldamiseks organismi individuaalsel või ökosüsteemi tasandil (Kooijman, 2010). Kuigi hetkel on teaduskirjanduses piiratud arv DEB mudelite näiteid, siis saab selliseid mudeleid kasutada lämmastiku- ja fosforivoogude täpseks hindamiseks elusorganismides (Lavaud jt., 2020, 2021). Läänemere kontekstis on DEB mudeleid kasutatud hindamaks karbifarmide võimekust vähendada toitaineid Läänemeres, täpsemalt kalakasvatuste läheduses (Kotta jt., 2023). Lisaks on DEB mudelid võimalised arvutama süsinikuvoogusid, andes meile võimaluse prognoosida kliimamuutuste leevendamise meetmete efektiivsust dünaamilistes keskkondades. Siiski, pikaajalise süsiniku sidumise võimekuse hindamine karbikasvandustes nõuab arendatud DEB mudelite kasutamist, mis võtab arvesse ka lubjastumise.

Praegused karpide ainevahetuse uurimiseks loodud DEB mudelid on võimalised hindama ainult pehme koe energiavooge, sest kestade parameetrid on seotud pehme koe kasvuga. Sellegipoolest on teaduskatsetes selgunud, et lubikesta kasvu saab eraldada somaatilisest kasvust (Campana, 2011; Lewis ja Cerrato, 1997), mille tulemusel saab täpsemalt modelleerida lubikestaga organismide pikaagset süsiniku sidumise võimekust. Magistritöös kasutatud täiustatud DEB mudel võimaldab eraldi modelleerida aine- ja energiavoogusid karbikestas ja pehmetes kudedes (Stechele ja Lavaud, avaldamata) ning on sellest tulenevalt perspektiivsed mitte ainult karbifarmide süsinikuvoogude arvutamisel, vaid ka mitmesugustes teistes valdkondades, näiteks korallrahude ja vetikametsade uurimises (Muller ja Nisbet, 2014).

2.4 Keskkonnategurite prognoositud muutused Läänemeres

Kliimamudelid on keerulised arvutiprogrammi põhised andmebaasid, mis prognoosivad andmemustrite põhjal pikaagseid atmosfääri, ookeanide, maapinna ja jää vastasmõjusid (Meier jt., 2012). Kliimamudeleid kasutatakse tuleviku kliimaprognooside tegemiseks kui ka ilmadünaamika uurimiseks ja ilma ennustamiseks. Vahe on selles, et kliimaprognoosid on pikaajalised ja ilmaprognoosid on tavaliselt alla kümne päeva. Mudelite aluseks on Maa peale joonistatud kujuteldav ruudustik, kus iga ristuva joone vahe on tänapäeval umbes üks kraad (IPCC, 2013)

Läänemere kliimaproгноosid lähtuvad põhiliselt globaalse (GCM) ja regionaalse (RCM) kliimamudeli stsenaariumitest, mille tulemused on kokkuvõtvalt välja toodud teaduskirjanduses (Meier jt., 2012). Kõige kaasaegsemad ülevaated Läänemere mineviku, oleviku ja tuleviku mudelproгноosidest pärinevad kahest peamisest hinnangust, mis tehti 2013–2020 aastatel: *Baltic Earth Assessment Reports* BEAR ja *Climate change in the Baltic Sea region: BACC ja BACC II II* (BACC Author Team, 2008; BACC II Author Team, 2015). Need suuremahulised ja rahvusvahelise koostöö raames valminud hinnangud koosnevad väga detailsetest teadustöödest, mis prognoosivad GCM ja RCM mudelstsenaariumite põhjal Läänemere eluta kui ka elusa keskkonna tulevikku. Läänemerele on iseloomulik keskkonnategurite suur ruumiline ja ajaline varieeruvus, mis on enamasti suuremad kui globaalsel skaalal ennustatud kliimamuutustest tulenevad kõikumised. Näiteks varieerub Läänemere keskmine pinnavee temperatuur erinevate aastate vahel üle 2°C. Hooajaline pinnaveetemperatuuri varieeruvus on veel suurem: keskmiselt 3°C kevadel ja 18°C hilissuvel (Meier jt., 2022).

Tartu Ülikooli Eesti Mereinstituudi uuringus „Merekeskkonna seisundi parandamine vesiviljeluse abil“ on välja toodud, et kolm kõige olulisemat keskkonnategurit, mis karbikasvatust mõjutavad on soolsus, temperatuur ja taimne hõljum ehk toit (Lauringson ja Veber, 2017). Sellest tulenevalt keskendub ka antud lõputöö just nende kolme keskkonnateguri mõju karpide süsiniku sidumise võimekusele.

2.4.1 Soolsus

Kõige enam mõjutab Läänemere elukeskkonda soolsus (Sanders jt., 2021). Läänemere pinnavee soolsuse gradient varieerub 2 ühikust Botnia lahes kuni 35 Taani väinades (Joonis 3a). Läänemere keskmine soolsus jääb 6-8 vahele. Läänemere ja Põhjamere vahel toimub regulaarne veevahetus. Soolsuse taset Läänemeres reguleerib eelkõige Põhjamere vee sissevool Läänemerre (inglise keeles *Major Baltic Inflow*) (Randmaa jt., 2020). Sissevool toimub Taani väinade kaudu, mille madalaim künnis on 40 m. Kitsad ja kohati madalad Taani väinad takistavad ja aeglustavad Lääne- ja Põhjamere vahelist veevahetust. Läänemerre valgunud Põhjamere vesi on väga hapnikurikas, külm ja suure soolsusega: 22–25 (Randmaa jt., 2020). Soolase vee sissevoolu hulk sõltub Läänemere väinade kohal olevast ilmastikust. Peamiseks sissevoolu mõjutavaks teguriks on pikaajalised idakaarte tuuled. Teiselt poolt mõjutab tugevalt Läänemere vee soolsust jõgedest sissevoolava magevee hulk (Meier jt., 2022). Magedat vett toovad Läänemerre suubuvad suured jõed,

millest enamused asuvad Läänemere lõuna-, ida- ja põhjaosas. Seega sõltub Läänemere soolsus mitmete tegurite koosmõjust ning täpset, ilma suure varieeruvuseta tulevikuprognosi soolustaseme kohta on keeruline modelleerida. Seega tasub ka meie tulevikuprognosi suhtuda kui hüpoteetilisse näitese, mis iseloomustab olukorda kui Läänemeri muutub sajandi lõpuks magedamaks, mitte kindlasti aga kui lõplikusse tõesse.

Hüdrodünaamilise mudeli prognoos, mida käesolev magistritöö kasutab, näitab, et keskmine soolsus Läänemeres langeb selle sajandi lõpuks Läänemere ava- ja põhjaosas kuni 2.5 ühikut, kuid jääb stabiilseks lääneosas, kus veevahetus Põhjamerega tagab stabiilse soolustaseme. Kõikide keskkonnaparameetrite täpsemad väärtused on leitavad stsenaariume võrdleval kaardil, mis asub materjali ja meetodika peatükis (Joonis 3). Suurevooluliste jõgede eeldatav magevee juurdevoolu suurenemine vähendab Läänemere soolust (Joonis 3b). Soolsus suureneb veidi vaid suuremate jõgede sissevoolude vahetus läheduses, näiteks Neeva jõe suudmes. Tugevad ja pikaajalised idakaaretuuled suurendavad märgatavalt Põhjamere soolase ja toitainete rikka vee sissevoolu võimalust. Pärast pikaajalisi idatuule perioode toimub läänekaarte tuule mõjul suur Põhjamere vee sissevool Läänemerre. Seega sooluse varieeruvus sõltub sellest, kas Kattegatist sissevoolava soolase merevee hulk on suurem kui jõgedest sissevoolava magevee hulk. Seetõttu esineb kliimamudeli prognoosis suur varieeruvus, näiteks võib mageveehulk suurenedagi 1–21% võrra (Meier jt., 2012). Aga kui merevee tase tõuseks sajandi lõpuks poole meetri võrra, siis suureneks hinnanguliselt Gotlandi pinnasoolsus 0,7 võrra ja põhjasoolsus 0,9 võrra (Meier jt., 2012).

2.4.2 Merevee temperatuur

Globaalne õhutemperatuur on viimase sajandi jooksul oluliselt tõusnud, mis omakorda on mõjutanud ka merevee temperatuuri (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2023). Läänemeri on üks kiiremini soojenevaid riimveelisi veekogusid maailmas (Dutheil jt., 2023). Põhja- ja Läänemere pinnaveetemperatuur on viimase veerandsajandiga soojenenud ligikaudu 1–1.5°C (Meier jt., 2012). Kiire pinnavee temperatuuri tõus mõjutab omakorda oluliselt ka Läänemere elustikku, kus paljud liigid elavad niigi oma füsioloogilise taluvuspiiri lähedal. Läänemere põhjaosa keskmine pinnatemperatuur jääb 4–5 °C vahemikku ning lõunaosa 8–9°C vahemikku ning tuleviku prognoosi kohaselt on oodata paarikraadist soojenemist (Joonis 3 c,d).

Läänemere pinnaveetemperatuur muutub prognooside kohaselt soojemaks. Kõige suuremat temperatuuri suurenemist saajandi lõpuks on oodata Botnia ja Soome lahes (Gröger jt., 2019; Joonis 3 c,d). Peamiseks põhjuseks on merejää kiirem sulamine, mis põhjustab madalamat albeedo efekti. Merejää kadumine vähendab ka lõuna- ja põhjaosade temperatuuride erinevust (Dutheil jt., 2023). Lisaks sõltuvad temperatuuri prognoositud trendid tuulesuunast, mis muudavad soojusvoolude tasakaalu õhu ja mere vahel. Pikaajalistel trendidel pilvkatte ja sellega seotud lühilainelise UV kiirguse muutustel on teisejärguline mõju (Dutheil jt., 2023). Mudelprognooside järgi võib 2100 aastaks keskmine temperatuur Läänemeres suurenda 2–3,5°C võrra pindmises vees (Joonis 3 c.d; Meier jt 2012). Kõikides Läänemere eriosades soojeneb merepinnavesi rohkem kui põhjakihtides olev vesi (Meier jt., 2011). Et saada Taani väinade kohta täpsemaid tulemusi, tuleks vaadata ka Põhjameri temperatuuri mudeleid (Meier jt., 2022). Talvine rannikumerejää võib kahjustada karbikasvanduste struktuure ning seetõttu peavad Läänemere põhjaosas asuvad karbifarmid kasutama raskeid ankruid ja teisi lahendusi, et karbiline triivjää eest kaitsta. Alternatiivis võib karbifarme talvetormide ja jää eest kaitsta, kui uputada karbiliinid 5–10 m sügavusele.

2.4.3 Toitained ja klorofüll-a

Läänemere üks suuremaid keskkonnaprobleeme on eutrofeerumine ehk toitainete üleküllus. Sellega kaasnevad Läänemeres suured vetikaõitsengud (Ojaveer, 2014). Sajandi lõpuks näitavad mudelprognoosid lämmastikühendite suurenemist Läänemeres, eriti Soome lahes ja Läänemere idakaldal (Meier jt. 2022). Lämmastiku kasv on eelkõige tingitud suurenenud jõgede sissevoolu hulgast, mis toovad Läänemerre põllumajanduses laialt kasutatud lämmastikühendeid. Samas, kui talitada Helsinki konventsiooni (HELCOM) Läänemere tegevuskava järgi, siis on lämmastikuemissioone võimalik vähendada kuni 25%, aga ainult juhul, kui Läänemere äärsed riigid nõustuvad põllumajanduses vähem väetiseid kasutama (HELCOM, 2021; Meier jt. 2022). Fosfori osas on prognoosid positiivsemad, kuid ebakindlust tekitab põhjasettesse ladestunud fosfori suur hulk, mis hapnikuvaeses keskkonnas vabaneb setetest veesambasse (Meier jt. 2022; Joonis 3 e,f).

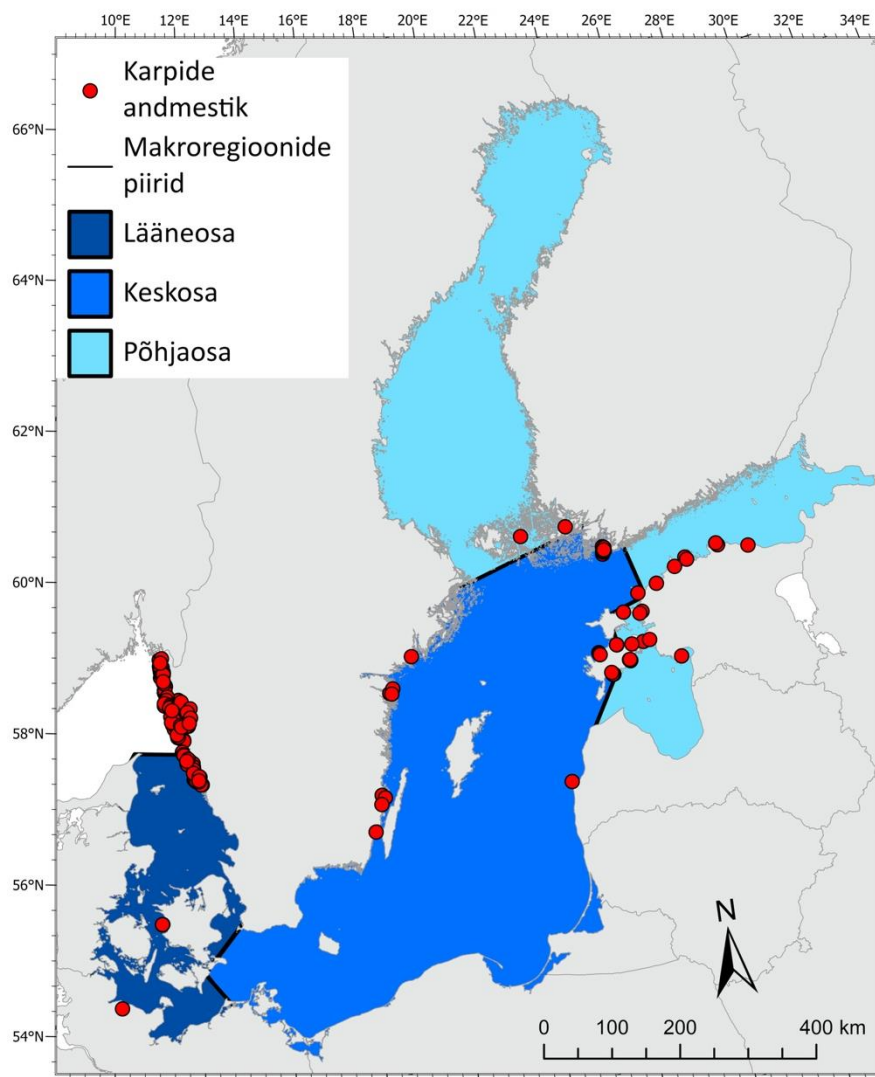
3. Materjal ja metoodika

3.1 Uurimisala iseloomustus

Läänemeri on noor, riimveeline ja võrdlemisi madal sisemeri (keskmise sügavus 52,3 m), mida iseloomustab suur keskkonnategurite (soolsuse, temperatuuri, lainetuse, toitainete hulga) ruumiline ja ajaline varieeruvus (Carstensen jt., 2014; Zettler jt., 2014). Läänemeri on piklik meri ning laiub põhjast lõunasse kogupikkusega üle 1500 kilomeetri (Ojaveer, 2014). Läänemere riimveelisuse põhjuseks on kitsad Taani väinad, mis tagavad väga aeglase veevahetuse Läänemere ja soolasema Põhjamere vahel. Taani väinade madalaim künnis on ligikaudu 40 meetrit (Randmaa jt., 2020). Mage vesi satub Läänemerre eelkõige veerohkete jõgede juurdevoolust ning ka sademetest. Läänemere võib kliimatingimuste, eestkätt soolsuse ja hüdrograafiliste parameetrite alusel jagada kolmeks makroregiooniks: põhjaosa, keskosa ja lääneosa (Tabel 1, Ojaveer, 2014). Sellist jaotust järgib ka antud magistritöö (Joonis 2).

Tabel 1: Läänemere makroregioonide jaotus; pindala, ruumala, magevee juurdevoolu protsendiline osatähtsus ning soolsusevahemik. Andmed pärinevad E. Ojaveer'i (2014) raamatust.

	Põhjaosa	Keskosa	Lääneosa
Piirkonnad	Liivi, Soome ja Botnia laht, Botnia meri	Läänemere avaosa	Üleminekupiirkond Läänemere ja Põhjamere vahel: Kattegati meri, Suur ja Väike Belti meri, Taani väinad
Pindala (%)	39	46	15
Ruumala (%)	37	58	5
Magevee juurdevool (%)	69	23	8
Pinnavee soolsus	2,5 – 6,5	5,5 – 8,5	7,5 – 34,5
Domineeriv bioloogiline süsteem	Riimveeline/mageveeline	Riimveeline	Riimveeline/mereline



Joonis 2: Uurimisala kaart, kus on kujutatud Läänemere kolme makroregiooni: lääneosa (tumesinine), keskosa (sinine) ja põhjaosa (helesinine ala). Punaste täppidega on tähistatud 220 andmekogumisjaama, kust pärinevad DEB mudeli loomiseks ja selle parameetrite valideerimiseks kasutatud karbikasvu ja muude näitajate (filtreerimiskiirus, toitainete sisaldus jms) algandmed.

3.2 Mudelid

3.2.1 Söödava rannakarbi algandmed DEB mudeli sisendiks

Magistritöö lähtus juba publitseeritud DEB mudelist, mis prognoosib süsiniku ja toitainete voogusid karbifarmis (Kotta jt., 2023). Aga kuna see teadustöö ei võimalda eraldi modelleerida aine- ja energiavoogusid karbikesas ja pehmetes kudedes, tegime magistritöö käigus koostööd Belgia teadlase Brecht Stechelega, kelle teaduskarjäär

keskendub suures osas just filtreerijate karpide DEB mudelite arendamisele. Sellisel koostööl sündis uus täendatud DEB mudel, mis suudab täpselt prognoosida karpide süsiniku sidumist lubikesta.

DEB mudelite loomisel ning parameetrite valideerimisel, kasutas Brecht Stechele algandmetena TÜ Eesti Mereinstituudi töötajate kaasabil kogutud rannakarpide kasvuandmeid Läänemerest (Joonis 2). Karbikasvuandmestikus on kokku üle 14 000 proovi 220 andmejaamast, mida on kogutud alates 2006. aastast. Suur osa proove koguti projekti Baltic Blue Growth raames ajavahemikul 2016–2022. Proovid pärinevad Läänemere kõikidest makroregioonidest, hõlmatest karbikasvandusi, eksperimentaalfarme ja ajutisi noodavõrkusid järgnevatest riikidest: Saksamaa, Taani, Rootsi, Norra, Soome, Eesti ja Läti. DEB mudeli jaoks kasutati kasvuandmeid ka Rootsi-Norra piiriäärsetelt aladelt Kattegati väina põhjaosast, sest mudeli ennustuste täpsus paraneb kui algandmed katavad võimalikult laia keskkonnaruumi nišši.

Karpe kasvatati kahel erineval substraadil: köiel ja/või noodalinal. Proovid koguti mõlema substraadi puhul erinevatelt sügavustelt (0,5-5 meetrit). Proovikohtades oli teada, millal täpselt karbid substraadile kinnitusid, et seeläbi hinnata karpide produktsiooni. Köieproovide kogumiseks lõigati farmist välja umbes 2 meetri pikkune karpidega kaetud köiejupp. Laboris lõigati köis omakorda 30 cm pikkusteks juppideks. Igalt sügavuselt koguti kolm kuni viis köie kordusproovi. Kui karpe kasvatati noodalinal, koguti karbiproovid taimeraami (400 cm² pindalalt) abil.

Laboris mõõdeti proovides iga individuaalse karbi kogupikkus millimeetrites ja leiti kõikide karpide koja ja sisu märg- ja kuivkaal. Koja ja pehmete kudede kaalude liitmisel saadi iga karbi kogukaal. Algandmestik koosneb tuhandetest rannakarpide pikkuse ja kaalu andmeridadest ning kuna farmidest koguti kasvutsükli jooksul mitmeid proove, sai nende andmete põhjal leida ka kasvukiirused ning seostada need kiirused erinevate keskkonnatingimuste väärtustega (vt. järgmist peatükki). Need andmed moodustasid olulise sisendi DEB mudeli loomisel ja parameetrite valideerimisel.

3.2.2 Keskkonnategurite algandmed

Koos karpide kasvuandmetega mõõdeti kõikides karbifarmides erinevaid keskkonnatunnuste väärtusi, sealhulgas sooluse, hoovuste, temperatuuri ja taimse hõljumi (klorofüll-a) andmeid. Keskkonnatunnuste väärtusi mõõdeti okeanograafiliste

instrumentidega. Sellised instrumendid mõõtsid uuritud tunnuseid vähemalt 10 minutise ajasammuga kogu kasvuperioodi vältel. Need alusandmed seoti karpide kasvukiirustega, mida hiljem kasutati DEB mudelite parametrizeerimisel.

Selleks, et prognoosida karpide süsiniku sidumise potentsiaali, kasutati kõige uuemaid Läänemere piirkonda katvat hüdrodünaamilise mudelprognoosi andmeid (Meier jt., 2012). Selles uuringus seoti kompleksne hüdrodünaamiline RCO-SCOBİ mudel (Swedish Coastal and Ocean Biogeochemical model) ECHAM5 ülemaailmse kliimamudeliga. Käesolevas töös kasutati A1B emissioonide stsenaariumit. A1 stsenaariumigrupp lähtub kiirest majanduskasvu jätkust, rahvaarvu suurenemisest 21.sajandi esimese poole keskosa ning hilisemast rahvaarvu vähenemisest. A1B stsenaarium eeldab, et tulevikus on saavutatud tasakaal fossiilkütuste ja taastuvenergia kasutamise vahel (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2023). Mudel võimaldab ennustada kogu Läänemere regioonis soolsuse, hoovuste, temperatuuri ja taimse hõljumi päevapõhist sesoonset dünaamikat tänapäeva ja tuleviku kliima stsenaariumite jaoks (kliimamuutused + HELCOM'i Läänemere tegevuskava toimetite vähendamiseks) (HELCOM, 2021). Neid keskkonnaandmeid kasutati loodud DEB mudelite sisendandmetena.

3.2.3 Standardfarmi mõõtühik

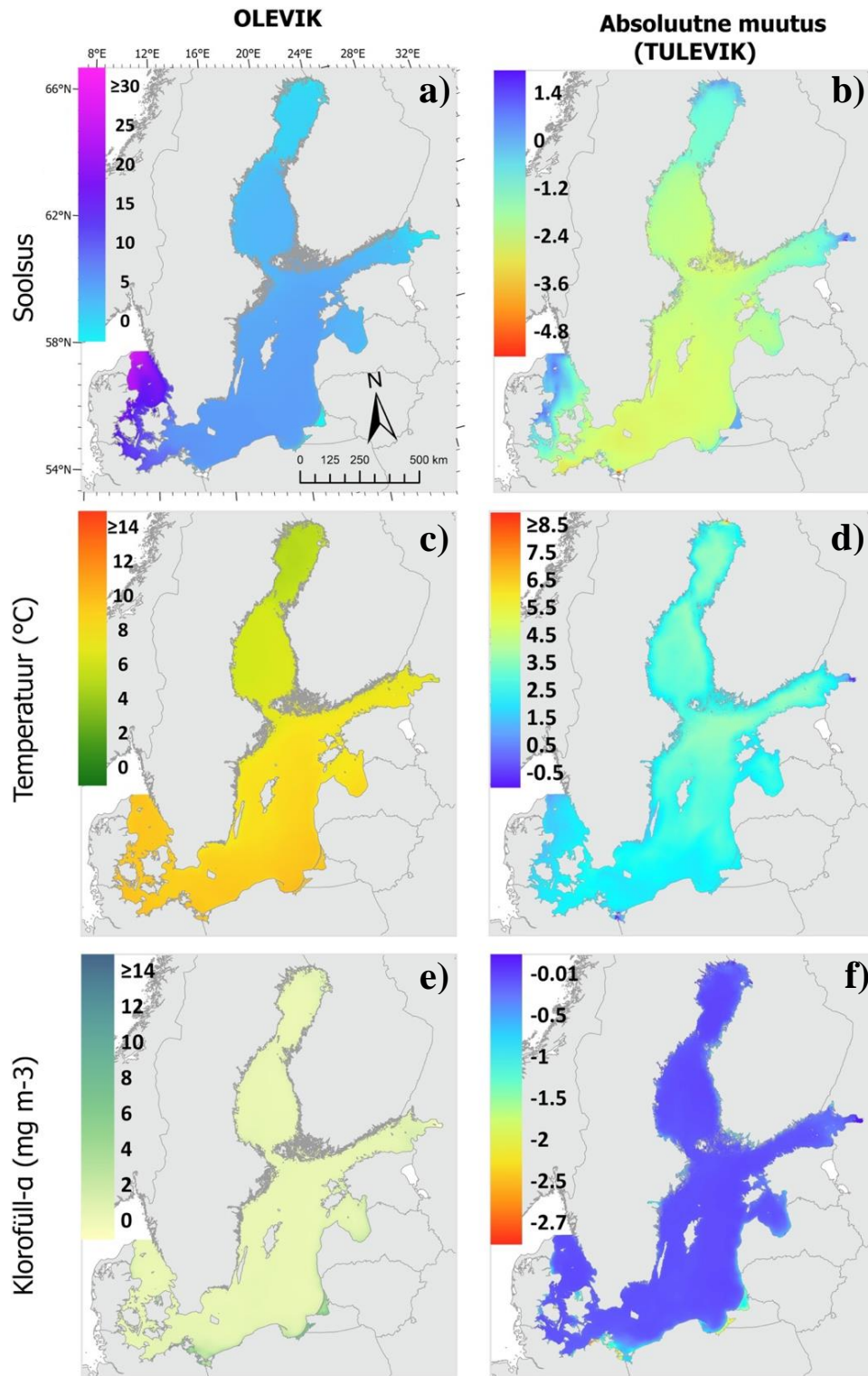
Kuna maailmas on väga palju eritüübilisi karbikasvandusi, siis magistritöös kasutasime ühte võimalikku karbikasvatuse lahendust (Tagalahe karbikasvandus, 58.46°N, 22.05°E), millised on Läänemeres oma suuruse ja muude tehniliste omaduste poolest kõige levinumad. Sellist karbikasvandust kutsume käesolevas töös standardfarmiks. Farm kuulub eraettevõttele Redstorm OÜ. Standardfarmi pindala on 0,25 ha, aga mudeli poolt toodetud ühe ruudu resolutsiooniks on 1 km² ehk käesolevas töös on kasutatud standardühikuna süsiniku sidumise hulga kirjeldamiseks tonni/km². Tagalahe kasvandus koosneb kuuest 100-meetrisest veepealsest horisontaalsest ujuvpontoonist, mille külge on kinnitatud 5 m laiune traalvõrk. Karbikasvanduse hinnanguline karpide arv on 40 miljonit isendit (Kotta jt., 2020).

3.3 Stsenaariumid

Vastavalt sisendandmete resolutsioonile oli DEB mudeli väljundi piksli suurus 1km². Peenema ruumilise lahutusega hüdrodünaamiliste mudelite olemasolul on võimalik ka DEB mudeli ruumilist lahutust parandada. DEB mudelite jooksumisel eeldasime, et

kõrval olevatel pikslitel ei paikne karbikasvandusi ehk korruga asetsetes regioonis vaid üks karbifarm. See on lähima aastakümne jaoks ka realistlik stsenaarium, kuna karbikasvatuste arengu võimendamiseks on vajalik eemaldada paljud majanduslikud, sotsiaalsed ja juhtimiselased takistused.

DEB mudeliga testisime karpide süsiniku sidumise võimekust kahe erineva stsenaariumi korral: olevikustsenaariumi ehk „*business as usual*“ ning võimaliku tulevikustsenaariumi korral. Olevikustsenaarium peegeldab Läänemeres hetkel valitsevaid keskkonnatingimusi. Tulevikustsenaarium põhineb Meier jt., 2012 mudelprognosil, mis ennustab selle sajandi lõpuks Läänemeres valitsevaid keskkonnatingimusi ning lisaks lähtub eeldustest, et HELCOM'i tegevuskava toitaite eemaldamisel realiseerub. Detailed keskkonnatingimuste väärtused ja nende ruumiline varieeruvus iga uuritud keskkonnaparametri kohta mõlema stsenaariumi puhul on välja toodud alloleval joonisel (Joonis 3).



Joonis 3: Oleviku- ja tulevikustsenaariumi vaheline erinevus kolme uuritud keskkonnateguri korral: soolsus (a,b); pinnaveetemperatuur (c,d); klorofüll- α (e,f). Tulevikustsenaarium kirjeldab kõikide uuritud keskkonnatingimuste absoluutväärtuste muutust (Δ = tulevikutingimused – olevikutingimused). (Andmed on koondatud nii karbikasvanduste sondidelt kui ka Läänemere hüdrodünaamilisest mudelprognosis).

3.4 Andmeanalüüs

Süsiniku sidumise võimekuse ja keskkonnatingimuste kaardianalüüside läbiviimiseks kasutati ArcGIS Pro tarkvara 3.2 versiooni. DEB mudelist saadud ruumilist varieeruvust puudutav informatsioon oli salvestatud rasterkihtidena geotiff formaadis. Kahe uuritud stsenaariumi keskkonnatingimuste (Joonis 3) täpsemaks võrdlemiseks arvutati absoluutväärtuste muutus oleviku ja tuleviku stsenaariumi vahel ($\Delta = \text{tulevikustsenaarium} - \text{olevikustsenaarium}$).

Oleviku- ja tulevikustsenaariumi süsiniku sidumise võimekuse erinevus (Joonis 4b) arvutati *raster calculator* abil. Väärtused on esitatud tonnides ühe standardfarmi ühiku kohta (0.25 ha). Kahe stsenaariumi vaheline suhteline muutus protsentides leiti järgnevalt: $(\text{tulevikustsenaarium} - \text{olevikustsenaarium}) / \text{olevikustsenaarium} * 100$ (Joonis 4a).

Andmeanalüüsiks kasutati statistikatarkvara R versiooni 4.3.0 ja RStudio versiooni 2023.3.0.386 (R Core Team, 2023). Suure andmemahu tõttu kasutati süsiniku võimekuse ja märgkaalu hooajalise varieeruvuse analüüsimiseks *bootstrap*-meetodit. R skriptide loomisel oli abiks Eesti Mereinstituudi töötaja Ants Kaasik. Läänemere erinevate piirkondade uurimiseks valis programm üldkogumiks mõlema stsenaariumi puhul kolmest makroregioonist eraldi 100 juhuslikku 1 km² suurust ruutu, milles paiknes üks 0,25 ha suurune standardfarm. Seejärel leiti igas ruudus standardfarmi süsiniku talletamise ja märgkaalu väärtused. Nende saja ruudu andmete põhjal leiti süsiniku talletamise ja märgkaalu väärtuste 5% ja 95% usalduspiirid ja keskmised väärtused.

Keskkonnategurite osatähtsuse hindamisel kasutati samuti *bootstrap*-meetodit. Sellel juhul konverteeriti keskkonnatingimuste väärtused ühisele numbrilisele skaalale ja valiti kõigist kolmest piirkonnast juhuslikult 100 ruutu. Koostati lineaarne mudel, mille sõltumatuks muutujaks oli keskkonnategur ja sõltuv muutuja süsiniku sidumise võimekus tonnides. Iga keskkonnateguri osakaal arvutati protsentväärtusena järgnevalt: keskkonnateguri absoluutväärtus regressioonikoefitsendilt/absoluutväärtuste summa * 100.

Selleks, et leida, kui olulised on erinevad keskkonnategurid süsiniku sidumisel erinevates ruumimastaapides, valiti kolmes ruumimastaabis (10, 100 ja 1000 km) juhuslikult 100 1 km² suurust ruutu. Lineaarne mudel sobitati valimile ja iga keskkonnamuutuja suhtelist

tähtsust arvutati R paketi *relaimpo* abil kasutades *lmg* meetodit (Groemping, 2006). Tunnuste osatähtsuse arvutamisel kasutati piirangut, et need tunnused peavad kokku andma ühe (kuna eeldame, et DEB mudelisse on kaasatud kõik olulisemad keskkonnaandmed). Seda protsessi korrati 100 korda, et hinnata prognooside varieeruvust. Graafikute tegemiseks kasutati *ggplo2* paketti (Wickham, 2016).

3.5 Töö autori roll

Magistritöö idee ja teema valik kujunes ühisarutelude käigus magistrandi ja juhendajate Jonne Kotta ja Francisco R. Barboza'ga. Töö autor on Eesti Mereinstituudi meresüsteemide töörühma liige. Töörühm kogus ja analüüsis koostöös teiste riikidega rannakarpide kasvu- ja keskkonnaandmeid. Autor osales 2022. aastal Tagalahes asuva karbikasvanduse karbiproovide kogumise välitöödel ning võttis osa Eesti Mereinstituudi laboris karbikasvatustest kogutud köie- ja raamiproovide analüüsimisest. Autor viis läbi DEB mudeli väljundandmetest saadud kaardianalüüsid ja andmeanalüüsi. Statistiliste meetodite väljatöötamise protsessis oli juhendajate ja Ants Kaasiku nõustamisel oluline roll. Käesoleva magistritöö (k.a. kõik joonised) kirjutas ja vormistas töö autor iseseisvalt, lähtudes juhendajate nõuannetest.

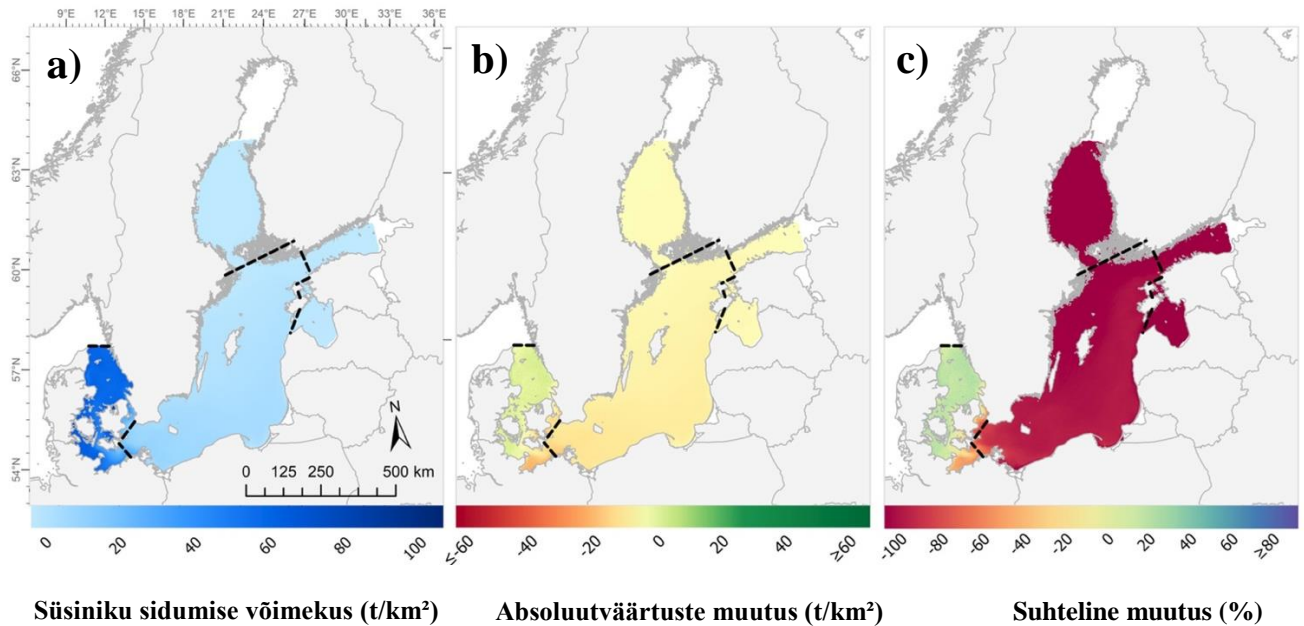
4. Tulemused

4.1 Karpide süsiniku sidumise võimekuse kaardistamine Läänemeres

Süsiniku sidumise võimekuse varieeruvus järgib Läänemere soolsusgradienti ehk mida soolasem on vesi, seda kiiremini ja suuremaks karp kasvab ning seda rohkem leidub karbi kodades süsinikku (Joonis 4). Maksimaalselt suudab üks karbikasvandus kasvuperioodi lõpuks (1,5 aastat) siduda kuni 90 tonni süsinikku 1 km² suuruselt alalt, kuigi enamikel Läänemere aladel jääb sidumise võimekus alla 40 tonni.

Olevikustsenaariumi puhul talletuvad suurimad süsiniku kogused karbi kodadesse Kattegatis, kus üks karbikasvandus seob ligikaudu 30–90 tonni süsinikku. Taani väinadest Läänemere keskosani langeb soolsusega ka karpide süsiniku sidumise võimekus, jäädes vahemikku 10–30 tonni süsinikku farmiühiku kohta (Joonis 4a). Kõige madalama sidumisvõimekusega alad ($\leq 1-10$ t) asuvad Läänemere põhjaosas (Soome laht ja Botnia laht), kus karbid elavad oma füsioloogilise taluvuse piiril tingituna vee madalast soolsusest.

Tulevikustsenaariumi puhul suureneb süsiniku sidumise võimekus Kattegatis sõltuvalt piirkonnast $\leq 1-20$ tonni võrra, mis on võrreldes praeguse võimekusega kuni 30% kõrgem. Kattegat on ka ainus piirkond Läänemeres, kus tuleviku keskkonnatingimuste puhul on oodata seotud süsiniku hulga suurenemist (Joonis 4b, c). See on põhjustatud Põhjamere soolase vee suurematest sissevooludest ning kliimamuutustest tulenevast merevee temperatuuri tõusust. Antud keskkonnatingimused loovad karpidele sobilikuma elukeskkonna ning võimaldavad suuremat süsiniku sidumise potentsiaali. Kattegati ja Läänemere keskosa vahel on oodata tulevikus prognoositud süsiniku sidumise võimekuse järsk vähenemine (-10 – -30 t) (Joonis 4b). Kuigi praeguse ja tuleviku stsenaariumi absoluutväärtuste muutused Läänemere kesk- ning põhjaosas ei ole nii drastilised kui Kattegatis (≤ -10 t), näitavad protsentuaalsed muutused äärmuslikel juhtudel peaaegu täielikku (üle 90%) süsiniku sidumise võimekuse vähenemist (Joonis 4c). See tuleneb prognoosist, mille alusel saajandi lõpuks muutub Läänemere kesk- ning põhjaosa tunduvalt magedamaks ning piirkondades, kus merevee soolsus langeb alla 5 ühiku on eeldada söödava rannakarbi populatsiooni täielikku hävimist.



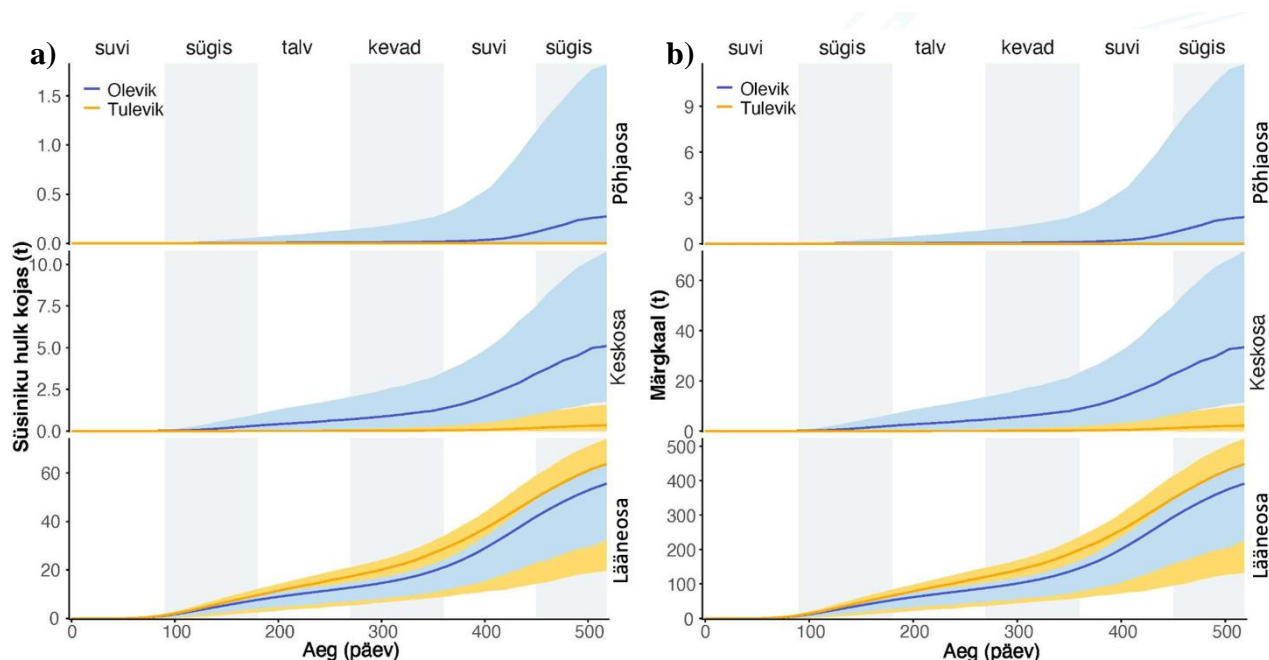
Joonis 4: Karbi kotta salvestatud süsiniku sidumise võimekus praegustes keskkonnaoludes tonnides ühe farmi kohta (a), oleviku- ja tulevikustsenaariumi vaheline muutus süsiniku sidumise võimekuses, arvestatud absoluutväärtuste muutusena (b) ja kahe stsenaariumi vaheline suhteline muutus protsentides (c). Must katkendlik joon eraldab kolme Läänemere piirkonda. Ühikuteks on $tonn/km^2$ kohta.

4.2 Süsiniku sidumise võimekuse sesoonne ja ruumiline varieeruvus

Mõlema stsenaariumi korral kasvab esimese aasta jooksul kõikides Läänemere piirkondades süsiniku hulk karbi kojast vähehaaval kuid stabiilselt (Joonis 5a). Silmnähtav sidumisvõimekuse kiirenemine toimub teisel suvel ehk umbes aasta pärast noorkarpide kinnitumist. Sidumise võimekus aeglustub teise aasta sügisel, vahetult enne karpide koristust kasvandusest. Oleviku stsenaariumi puhul on Läänemere erinevate piirkondade vahel ligi kümnekordne süsiniku sidumisvõimekuse erinevus. Kattegatis seob karbikasvandus keskmiselt 55 tonni süsinikku, Läänemere keskosas 5 tonni ja põhjaosas alla 0.5 tonni (Joonis 5a). Tulevikustsenaariumi korral on keskmine süsiniku sidumise võimekus kasvuperioodi lõpus Kattegatis ligikaudu 65 tonni, aga nagu juba eelpool mainitud, siis järsu soolsuse languse tõttu tuleviku keskkonnatingimustes ei seo karbid praktiliselt süsinikku Läänemere kesk- ja põhjaosas.

Süsiniku sidumise võimekus ja märgkaal on omavahel ajaliselt ja ruumiliselt tugevas seoses. Karpide kõige kiirem kasvuperiood jääb teise aasta suvekuudesse.

Olevikustsenaariumis erineb Läänemere piirkondade vahel karpide keskmine märgkaal kasvuperioodi lõpus kümnekordselt: Kattegatis kaaluvad farmi karbid kasvuperioodi lõpul kokku keskmiselt 400 tonni, Läänemere keskosas 40 tonni ning põhjaosas alla 3 tonni (Joonis 5b). Tulevikustsenaariumi puhul on farmis elavate karpide märgkaal Kattegatis veelgi kõrgem kui praeguste tingimuste puhul (450 tonni), aga teistes Läänemere piirkondades on karpide märgkaal väga madal. Seda põhjustab tulevikus Läänemere kesk- ja põhjaosa madal vee soolsus (Joonis 5b).



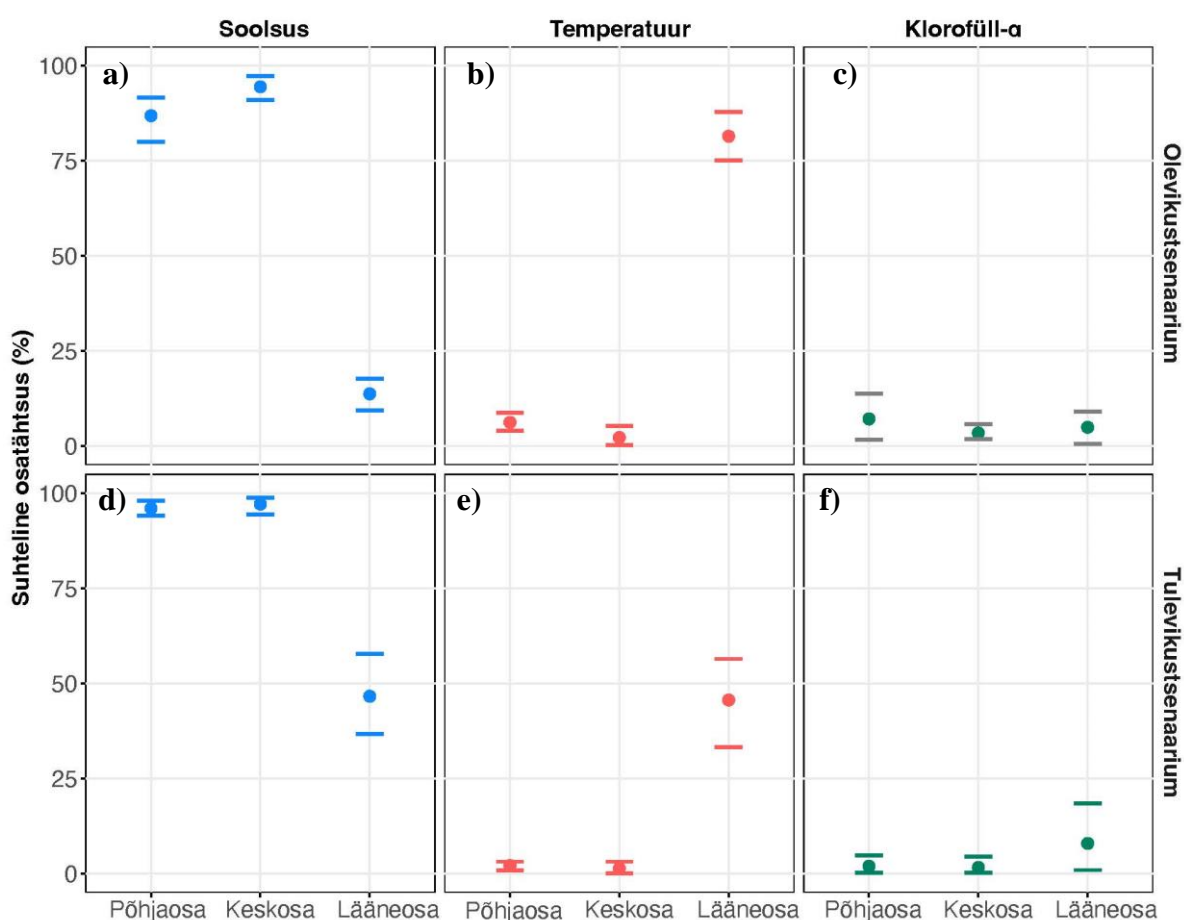
Joonis 5: Kumulatiivne seotud süsiniku hulk kasvanduse karbi kojas (a) ja karbi märgkaal (b) ühe kasvutsükli jooksul (1,5 aastat). Sinine värv tähistab oleviku- ning oranž tulevikustsenaariumi prognoose. Keskmised väärtused on kujutatud joontega ja 95% usalduspiirid varjutatud aladega. Iga taustavärvi vahetumine tähistab 90 päevast ajavahemikku ehk ühte aastaaga, alates suvest, mil karbid kinnituvad farmisubstraadile. Mõlemad joonised on jagatud kolme Läänemere uuritava piirkonna vahel. Kasutatud on *bootstrap*-meetodit.

4.3 Uuritud keskkonnatingimuste mõju süsiniku sidumise võimekusele

4.3.1 Keskkonnategurite osakaalu erinevus Läänemere piirkondades

Mõlema uuritud stsenaariumi puhul domineerib soolsuse roll karpide süsiniku sidumise potentsiaali avaldamisel, seda nii Läänemere põhja- kui ka keskosas. Olevikustsenaariumis on soolsuse panus süsiniku sidumise võimekusele vastavalt 87% ja

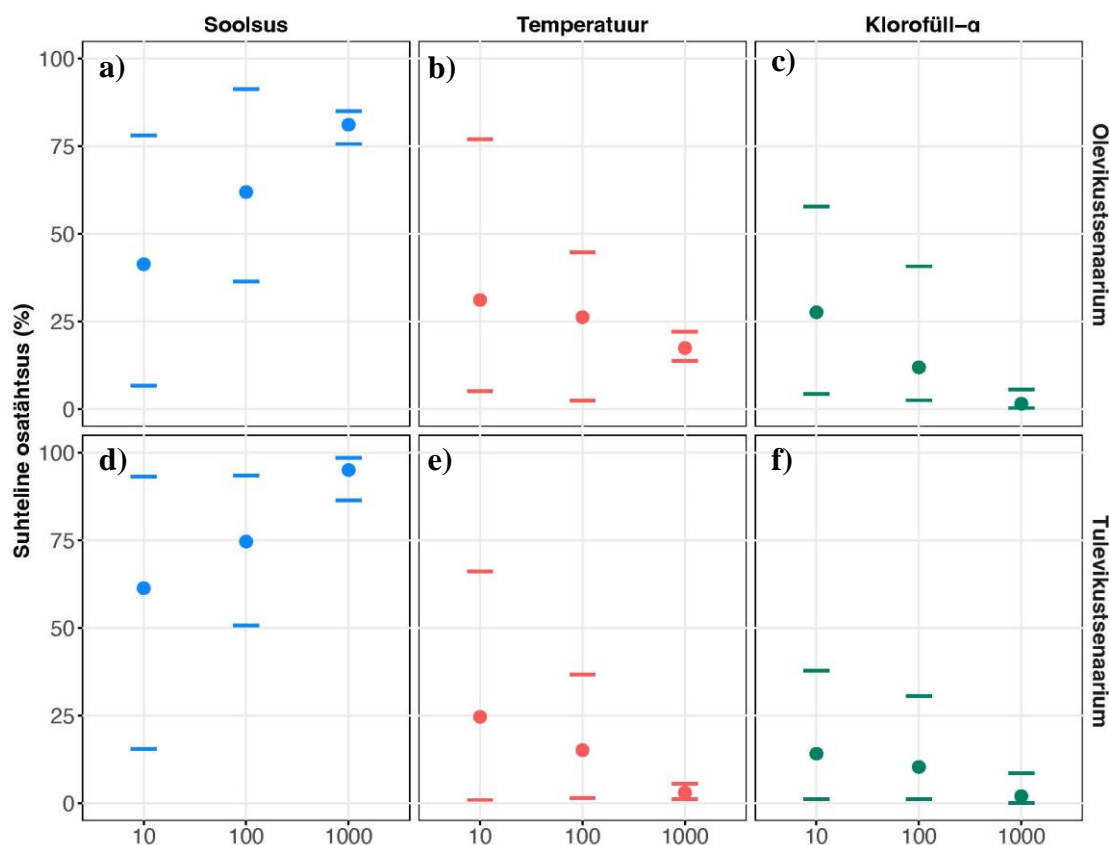
94% ning tulevikustsenaariumi korral on osatähtsus veelgi suurem – 96% ja 97% (Joonis 6 a,d). Nii temperatuuri kui ka klorofüll a mõju süsiniku sidumise varieeruvusele nendes piirkondades on väike (vähem kui 10%) (Joonis 6 b,c,e,f). Temperatuuri roll süsiniku sidumise võimekusele suureneb Kattegati väinade piirkonnas, muutudes soolsusest olulisemaks keskkonnateguriks. Olevikustsenaariumi korral langeb soolsuse osatähtsus alla 20% ning temperatuuri mõju küündib pea 80%. Tulevikustsenaariumi korral on Kattegati aladel soolsus ja temperatuur enam vähem sama tähtsusega (Joonis 6 a,b,d,e). Klorofüll-a osakaal süsiniku varieeruvusmustrite seletamisel jääb mõlema uuritud stsenaariumi puhul kõikides piirkondades alla 20% (Joonis 6 c,f).



Joonis 6: Soolsuse (a,d), temperatuuri (b,e) ja klorofüll-a (d,f) osakaal süsiniku sidumise võimekuses erinevate Läänemere piirkondade vahel. Joonise ülemine rida (a-c) näitab keskkonnategurite suhtelist olulisust olevikustsenaariumi korral ning alumine rida tähistab tulevikustsenaariumit (d-f). Keskmised väärtused on märgitud punktidega ning 95% usalduspiirid horisontaalsete joontega.

4.3.2 Keskkonnategurite osakaal erinevates ruumimastaapides

Võrreldes keskkonnategurite osatähtsust kolmel erineval ruumimastaabis (10, 100, 1000 km²), selgub, et mõlema stsenaariumi korral kasvab soolsuse panus süsiniku sidumisele modelleeritud ala mastaabi suurenemisel (Joonis 7 a,d). Oleviku tingimustes tõuseb soolsuse keskmine osakaal mastaabi suurenemisel 41%’lt 81%’le ning tulevikustsenaariumi korral 58%’lt 96%’le. Vastupidine seos valitseb temperatuuri ja klorofüll a puhul, kus mastaabi suurenedes mõlema teguri osakaal väheneb (Joonis 7 b,c,e,f). Sellest võib järeldada, et soolsuse roll karpide süsiniku sidumisel on olulisem suurtes ruumimastaapides ning temperatuuri ja klorofüll-i roll on oluline lokaalselt. Lisaks seostub osakaalu varieeruvus ruumilise mastaabiga, olles suurim 10 km² mastaabis ning kordades väiksem 1000 km² mastaabis (Joonis 7).



Joonis 7: Soolsuse (a,d), temperatuuri (b,e) ja klorofüll-a (d,f) osakaal süsiniku sidumise võimekuses erinevate ruumimastaapide puhul (10, 100, 1000 km²). Joonise ülemine rida (a-c) näitab keskkonnategurite osatähtsust olevikustsenaariumi korral ning alumine rida tähistab tulevikustsenaariumit (d-f). Keskmised väärtused on märgitud punktidega ning 95% usalduspiirid horisontaalsete joontega.

5. Arutelu

5.1 Muutlik Läänemeri – varieeruvus ajas ja ruumis

Süsiniku sidumine karbi kotta sõltub merevee soolsusest ehk mida kõrgem soolsus, seda intensiivsem on lubjastumise protsess, mille käigus salvestub rohkem süsinikku karbi kodadesse. Ka magistritöö tulemused näitavad, et Läänemeres järgib karpide süsiniku sidumise võimekus soolsusgradienti, suurendes koos soolsusega. Seega on pikaajalise süsiniku sidumise võimekuse perspektiivist karbikasvanduste rajamiseks parimad piirkonnad Läänemere lääneosas asuvad lahed (Taani väinad, Belti ja Kattegati piirkond). Tänu tihedale veevahetusele Põhjamerega on sealsetes vetes Läänemere kõrgeim soolsus (kuni 30), mis soodustab karpide kiiremat kasvu ja suuremate mõõtmete saavutamist. Mudelarvutuste põhjal suudab praeguste keskkonnatingimuste juures üks 0,25 ha suurune 40 miljoni karbiga farm kasvutsükli lõpuks (1,5 aastaga) siduda kumulatiivselt 30 kuni 90 tonni (keskmiselt 55 tonni) süsinikku. Süsiniku sidumise võimekus langeb järsult soolsuse vähenemisega, sest mida väiksem on karbikest, seda vähem on sinna võimalik lubjastumise käigus süsinikku salvestada. Seega on magedamad piirkonnad (Läänemere kesk- ja põhjaosa) süsiniku sidumise perspektiivist karbikasvanduste rajamiseks vähem atraktiivsed piirkonnad. Suuremas osas Läänemeres jääb kotta seotud süsiniku hulk kasvuperioodi lõpuks alla 10 tonni, mis on kliimamuutuste leevendamise mõistes võrdlemisi väikse osatähtsusega.

5.2 Oleviku- ja tulevikustsenaariumi võrdlus

Läänemere lääneosa on ainus piirkond, kus tuleviku keskkonnatingimuste juures suureneb karpide keskmine süsiniku sidumise potentsiaal, täpsemalt 10 tonni võrra. Suurem süsiniku salvestamise võime tuleneb prognoositava soolsuse ja temperatuuri tõusuga üleminekupiirkonnas, tänu millele on karpidel kasvuks praegusest veelgi soodsamad tingimused. Samas on tulevikuprognosis ülejäänud Läänemere karpidele äärmiselt murettekitavad, eriti piirkondades, kus soolsus langeb alla 5. Üldreegli kohaselt langeb koos soolsuse vähenemisega ka kaltsiumkarbonaadi sisaldus vees. Eriti madalale langeb kaltsiumisisalduse kontsentratsioon, kui soolsus langeb alla 6 (Sanders jt., 2018). Madal soolsus mõjutab tugevalt karpide lubjastumisprotsessi, piirates nii rannakarpide kasvu kui ka lubjastumise kiirust. See piirab omakorda nende süsiniku sidumise võimekust. Nii Läänemere kesk- kui ka põhjaosas on süsiniku sidumise võimekus meie uuritud tuleviku

keskkonnatingimuste puhul nullilähedane. Teadaolevalt ei talu söödav rannakarp madalamat soolsust kui 5, seega kui soolsusetase Läänemeres langeb alla selle piirväärtuse, väheneb liigi arvukus Läänemere kesk- ja põhjaosas katastroofiliselt kuni 90%, sest karbid ei suuda nii magedas vees enam toimida ja surevad. Sellisel juhul on võimalik, et Läänemere invasiivsed karbiliigid nagu rändkarp, *Dreissena polymorpha* või hiljuti Eesti vees laiemalt levima hakanud karp, *Mytilopsis leucophaeata* hakkavad söödava rannakarbi elupaikades domineerima. Siiski on Läänemere karbikasvanduste vaatepunktist mõlemad liigid vähem soositud ning vajavad täpsemaid uuringuid, kuna nii *D. polymorpha* kui *M. leucophaeata* süsiniku sidumise potentsiaal ning reaktsioon muutuvatele keskkonnatingimustele on veel suures osas teadmata.

Siinkohal tasub veel kord rõhutada, et tuleviku keskkonnatingimuste väärtused on arvutatud praeguste mudelprognooside põhjal ja just Läänemere tuleviku soolsusetase on suure määramatusega, mida peegeldab ka suur varieeruvus meie tulemustes (Lehmann jt., 2022; Meier jt., 2022, Joonis 5). Magistritöös käsitleti tulevikustsenaariumina niinimetatud „musta stsenaariumit“ ehk kõige madalama soolsusetasemega prognoosi. Seega tuleb meie tulevikustsenaariumi prognoosidesse suhtuda ennekõike kui uusi uurimisteemasid ja hüpoteese püstitavas abivahendisse. Tulevikustsenaariumi uurimise väärtus käesolevas töös seisneb selle võimes ilmestada olukorda, mis karpidega juhtub kui Läänemeri tõepoolest muutub magedamaks ehk halvima olukorra tagajärgede kirjeldamiseks. Tegelikult me ei tea, kuidas keskkonnategurid Läänemeres sajandi lõpuks muutuvad. Nagu eelnevalt mainitud, sõltub pinnavee soolsus mitmest tegurist, aga ennekõike Põhjamerest sissevoolava soolase vee ja jõgede juurdevoolu hulga koosmõjust (Meier jt., 2022). Loodetavasti ei lange soolsus sajandi lõpuks nii madalale, aga oluline on siiski teada, kuidas karbid reageerivad sellistele ekstreemsetele tingimustele. Tuginedes mitmete teaduslike vaatlustele ja uurimistöödele, on näha, et hetkeseisuga on tekkinud teaduslik konsensus, mille alusel Läänemeri muutub hoopiski soolasemaks ning viimase paarikümne aastaga on magevee hulk Läänemeres vähenenud ligikaudu 24 kuupkilomeetri võrra (Raudsepp jt., 2023). Nende andmete põhjal ei ole veel uut Läänemere kliimamudelit arendatud. Kui Läänemere soolsusetase tõuseb ka kesk- ja põhjaosas, siis paranevad oluliselt ka söödava rannakarbi looduslikud ja tehislikud kasvutingimused ning sellest tulenevalt suureneb karbi süsiniku salvestamise võimekus. Kui uuemad ja täpsemad prognoosid Läänemere tuleviku keskkonnatingimuste kohta lähiaastatel avaldatakse, on

plaanis kindlasti jooksutada sellise tulevikustsenaariumi andmetega DEB mudelit, et võrrelda praeguseid ja uuemaid prognoose.

5.3 Keskkonnategurite mõju

Võrreldes Läänemere erinevaid piirkondi ja kahte stsenaariumianalüüsi, siis kõige enam mõjutab vee soolsus süsiniku sidumise võimekust Läänemere kesk- ja põhjaosas. Temperatuuri mõju söödava rannakarbi kasvule nendes Läänemere piirkondades praktiliselt puudub. Läänemere lääneosas on vee soolsus söödavale rannakarbile kõige optimaalsem ning suures plaanis ei limiteeri karbi kasvu. Sellest tulenevalt on mere lääneosas vee soolsuse kõrval oluline roll ka vee temperatuuril. Läänemere väinade piirkonnas on temperatuur keskmiselt kõrgem kui mujal Läänemeres, jäädes 10–12 °C vahele (Joonis 3). Selline temperatuurirežiim soodustab söödava rannakarbi kasvu, millega kaasneb suurem süsiniku sidumise võimekus.

Soolsuse osakaal süsiniku sidumisel on mõlema stsenaariumi puhul suurim kõikide uuritud ruumimastaapide (10, 100, 1000 km²) puhul. Temperatuuri roll on aga oluline lokaalsel tasemel. Lokaalsete keskkonnatingimuste arvestamine võimaldab karbifarme paigutada regiooni kõige soodsamatesse kasvupiirkondadesse ning selle kaudu on võimalik osaliselt kompenseerida soolsuse limiteerivat mõju ja võimendada karbikasvatustest tulenevaid ökosüsteemi hüvesid (süsiniku ja toitainete sidumine).

DEB mudeli sisendandmeid iseloomustas päevane resolutsioon, mis ei võimalda arvestada väga erandlike ilmastikusündmuste, näiteks kuumalainete ja tormide mõju. Seega ei suuda mudel tulevikustsenaariumi korral prognoosida ekstreemsete ilmastikunähtuste mõju süsiniku sidumise potentsiaalile. Samas kliimamuutuste tagajärjel on tulevikus oodata üha sagedasemaid, pikaaegsemaid ja intensiivsemaid torme ning kuumalaineid (Pansch jt., 2018). DEB mudel prognoosib tulevikustsenaariumi puhul Läänemere lääneosas süsiniku sidumise võimekuse suurenemist, sest lisaks stabiilsele soolsusele on eeldada ka pinnavee keskmise temperatuuri tõusu. Läänemere lääneosa pinnavee temperatuurid jäävad praegu söödava rannakarbi optimaalse temperatuuri (18–20 °C) vahemikku (Järvekülj ja Veldre, 1963). Ka taimset hõljumit ja loomset pudet on soojemas vees rohkem, mis soodustab söödava rannakarbi kasvu. Kuumalainete korral võivad temperatuuritingimused muutuda karpidele ebasobivaks, mille tagajärjel karpide konditsioon järsult halveneb. Kui temperatuurid küündivad 25 °C, võivad karpid farmi substraadi küljest lahti pudeneda ning

hävida. Sellist massilist suremust on juba täheldatud näiteks inglise kanalis ning ka Läänemere madalas rannikuvees (Seuront jt., 2019). Kuigi söödav rannakarp on äärmiselt hea stressitaluvusvõimega ja elab suure tõenäosusega üksikud kuumalained üle, siis sagedased pikaajased kuumalained mõjuvad liigile palju rängemalt (Pansch jt., 2018, Seuront jt., 2019). Intensiivistuvate kuumalainete tingimustes, mil suvised pinnaveetemperatuurid rannikuvees regulaarselt ületavad 25 °C, võivad osad rannikumere piirkonnas muutuda karbikasvanduste jaoks ebasobivaks. Seega on soovitatav, et erinevad huvirühmad (nt. mereruumi planeerijad, erasektor) arvestaksid tulevikuprognoside puhul ka kuumalainete negatiivse mõjuga karbikasvandustele – seda nii saagikuse, toitainete kui ka süsiniku sidumise võimekuse kontekstis. Praegune DEB mudel võimaldab selliseid prognoose teha, kui paranevad mudeli jooksutamiseks vajaminevad sisendandmete ajaline resolutsioon.

Meie uuring keskendus kolmele põhilisele karpi mõjutavale keskkonnategurile – soolsusele, temperatuurile ja klorofüllil osatähtsusele süsiniku sidumise dünaamikas ja näitab kui oluline on kliimamuutuste tagajärgede mõistmiseks mudelisse kaasata kõik olulisemad keskkonnamuutujad. Sellele vaatamata on võimalik olemasolevat DEB mudelit täiendada, kaasates mudelisse näiteks merevee hapestumisega seotud parameetrid, kuna kliimamuutuste suurenenud mõju tõttu on oodata merevee hapestumist (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2023). Kuigi tegelikult on hapestumine ja merevee soolsus omavahel tugevalt korreleerunud ning praegust mudelit saaks kasutada soolsuse baasil, et kirjeldada ka hapestumise mõju. Kuigi selliseid keskkonnatingimusi saab seostada ainevahetuse efektiivsusega, kaasa arvatud lubjastumisega, siis oleks vaja rohkem uuringuid, mis näitaksid milliseid füsioloogilisi muutusi just süsiniku sidumise võimekust arvesse võttes erinevad keskkonnategurid mõjutavad (Tan ja Zheng, 2020; Gold ja Vermeij, 2023).

5.4 Karbikasvanduste efektiivsus kliimamuutuste leevendamisel

Üks võimalikke lahendusi pikaajaseks seotud süsiniku hulga suurendamiseks on karpide kasvutsükli pikendamine vähesoolasemas vees. Pikem kasvuperiood võimaldab karpidel suuremaks kasvada ning selleläbi ka seotud süsiniku hulka suurendada. Üleüldiselt koristatakse rannakarbid farmidest enne kahe aastaseks saamist, sest siis on jõutud optimaalse saagikuseeni, mis toob ka maksimaalse majandusliku kasu (Aubin jt., 2018).

Magistritöö näitas, et karbi märgkaal suureneb eriti kiiresti teise aasta suvel, mil vee temperatuur on kõrgeim ja pidurdub sügise lõpuks, enne karpide korjamist (Joonis 5b). Sügisene kasvu aeglustumine on seotud temperatuuri langusega ja toiduhulga vähenemisega, mis ei tähenda, et karp oleks jõudnud oma maksimaalse suurusele, seega ka maksimaalse süsiniku sidumise võimekuseni. Läänemere madalama soolsuse ja varieeruvate keskkonnatingimuste tõttu on karbikasv suuresti nii kesk-kui ka põhjaosas pidurdunud ning selletõttu võiks siinsed karbikasvandused parema saagikuse eesmärgil kasvutsüklit pikendada, vähemalt aasta võrra, kui eesmärgiks on toitainete ja süsiniku sidumine. Magistritöö toetab ka N. Kautsky uuringuid Rootsi rannikumeres, mille soolsus sarnaneb Eesti rannikumere tingimustega. Selles uuringus oli karpide kasvukiirus looduslikes populatsioonides eriti kiire 2–10 eluaasta vahel, pärast kümnendat eluaastat kasv aga stabiliseerus (Kautsky, 1982). Suuremad karbid seovad rohkem süsinikku kodadesse, on ka efektiivsemad veepuhastajad ning sisaldavad rohkem proteiini. Töö edasiarendamise mõttes oleks huvitav karpe pikemalt kasvuliinidel hoida ning saadud andmete põhjal modelleerida erinevate Läänemere piirkondade optimaalne karbikasvatuse kestus, et maksimeerida süsiniku sidumise potentsiaali.

Teine võimalus süsiniku sidumise võimekuse suurendamiseks on rajada riimveelistesse lahtedesse suuremaid karbikasvandusi, kus suurem karbifarmi pindala suurendaks ka kasvanduse kogusaagikust. Taani ettevõtjad on leidnud, et majanduslikult tulutoov karbifarmi suurus võiks olla vähemalt 5 ha (Baltic Muppets projekti avaldamata tulemus), kuna suuremõotmelisema karbikasvanduse puhul on investeeringukulu ühe farmiühiku kohta tunduvalt väiksem. Mõlemad lahendused nõuavad siiski täiendavat hinnangut, et eelkõige välja selgitada, kas saagikoristuse edasilükkamisest ja suurema kasvanduse rajamisest tulenevad keskkonnahüved tasuksid end ka ettevõtjale majanduslikult ära. Teiselt poolt tegelevad karbikasvatavad ökosüsteemi hüvede pakkumisega, mis aga ei ole kuidagi kompenseeritud. Samal ajal on süsteemselt riikide poolt rahastatud märgalade ja muid sarnaseid toetusi, mille eesmärgiks on sarnaselt karbikasvatustele toitainete eemaldamine looduskeskkonnast.

Karbikasvandused tuleks rajada lahtedesse, kus toimub pidev veevahetus lahe ja avamere vahel. Sellises keskkonnas on karpide toitumistingimused paremad, kuna liikuv vesi toob rohkem toitu kohale. Liikuv vesi tagab parema hapnikuga varustatuse ning aitab vältida hapnikupuuduse tekkeks karbikasvanduse all paiknevates setetes. Hoovused aitavad

leevendada avamere ja lahe vahel pikaajaliste kuumalainete negatiivset mõju, jahutades rannikuvett.

Pikaajalise süsiniku sidumise vaatepunktist ei ole Läänemere karbikasvandused väga efektiivsed süsiniku sidujad. Vähene vee soolasus piirab lubjastumise protsessi ja süsiniku sidumise võimekust karbis. Mida soolasem on vesi, seda parem on süsiniku sidumise võimekus. Seetõttu on kõige efektiivsemad süsiniku sidumiskohad (kuni 90 tonni süsinikku pooleteist aasta jooksul) Läänemere lääneosa lahed (Kattegat, Belti meri, Taani väinad). Ülejäänud Läänemere piirkondades jääb süsiniku sidumise võimekus alla 10 tonni, mis on kliimamuutuste leevendamise mõistes kahjuks üsna tühine. Lisaks ei ole siia veel sisse arvestatud kogu karbifarmi haldamise elutsükli käigus vabanenud süsiniku hulka. Seega tuleks süsiniku sidumise võimekust pidada eelkõige karbifarmidega kaasnevaks boonuseks, aga mitte farmi põhieesmärgiks, sest karpide kasvatamine ainult süsiniku sidumise eesmärgil on selgelt karbikasvanduste potentsiaali alakasutamine.

Karbikasvanduste väärtuslikum keskkonnamõju Läänemeres avaldub siiski ennekõike nende võimes filtreerida veesambast loomset ja taimset hõljumit, millega eemaldatakse ökosüsteemist sinna minevikus ladestunud lämmastiku ja fosforit. Seega aitavad karbid vähendada Läänemere eutrofeerumist ja seeläbi parandada ümbritseva merekeskkonna seisundit (Kotta jt., 2020). Loomulikult ei ole võimalik karbifarmide abil Läänemere eutrofeerumisilminguid peatada, vaid tegemist on ühega mitmest meetmest, mida peaks Läänemere hüvanguks rakendama. Karbikasvandused on eriti efektiivsed kalakasvatuste naabruses, võimaldades teoreetiliselt toitainete emissioonivaba kalatootmist. Selline positiivne keskkonnamõju avaldub ka kasvatuse lähedal paiknevatele elupaikadele. Nii on Tagalahe karbikasvanduse all ja kõrval paiknevad meriheina (*Zostera marina*) aasad tunduvalt paremas seisus kui farmist kaugemale jäävad meriheina väljad (Kotta jt., 2022).

Eesti seadusandlust peaks innustama karbikasvanduste loomist ja lihtsustama karbikasvanduste pidamist. Näiteks võiks riik kehtestada toetused, mida makstakse farmi omanikule lämmastiku ja fosfori eemaldamise ning süsiniku sidumise eest. Juhul, kui karbifarmid saaks toitainete eemaldamisel samasuguse investeeringu nagu veepuhastusjaamad, kataks saadud summa karbifarmide rajamis- ja hoolduskulud ning kogu tegevus oleks majanduslikult tulus.

Kokkuvõte

Tänapäevases maailmas, kus inimtekkelise kliimamuutuste negatiivsed mõjud üha süvenevad, on oluline leida innovatiivseid lahendusi ühendamaks looduskaitse ja majanduskasv. Pikaajaline süsiniku talletamine on oluline, et vähendada süsiniku koguhulka atmosfääris, mis aitab kaasa kliimamuutuste negatiivsete mõjude leevendamisele.

Magistritöö eesmärk oli uurida:

- 1) Kui sobiv on Läänemeri söödava rannakarbi karbikasvanduste rajamiseks, mille eesmärk on pikaajalise süsiniku talletamine?;
- 2) Kuidas muutub süsiniku sidumise võimekus Läänemere erinevates piirkondades, ruumilistes mastaapides ja kasvutsükli jooksul praeguste ja tulevikus prognoositud keskkonnatingimuste korral?;
- 3) Milline roll on erinevatel keskkonnatingimustel (soolsus, temperatuur ja vee taimne hõljum) karpide pikaajalise süsiniku sidumise võimekuse määramisel?;
- 4) Mida tuleks teha, et suurendada karbikasvanduste efektiivsust kliimamuutuste leevendamisel?

Tulemused baseeruvad selle töö jaoks kohandatud DEB mudelil, mis hõlmab lisaks muudele karbi ainevahetusprotsessidele ka täpsemat kestade lubjastumise dünaamika arvutust. Erinevalt varasematest mudelitest võimaldab magistritöös kasutatud DEB mudel eraldi modelleerida aine- ja energiavoogusid karbikesas ja pehmetes kudedes. DEB mudeli loomisel ja selle parametrizeerimisel kasutati eksperimentaalselt mõõdetud rannakarpide kasvu andmestikku ja nendes farmides mõõdetud karbikasvu jaoks olulisemate keskkonnamuutujate väärtusi. Mõõtmisi teostati kogu Läänemere regioonis. Stsenaariumitena kasutati tänapäevaseid ja tuleviku keskkonnatingimusi (kliimamuutused + HELCOM'i Läänemere tegevuskava toitainete vähendamise plaan).

Karbikasvatuse süsiniku sidumise võimekusele avaldavad suurimat mõju vee soolsus ja temperatuur. Soolsuse roll on oluline suurtes ruumimastaapides ning eriti suur just Läänemere kesk- ja põhjaosas, kus soolsus limiteerib karbi kasvu. Vee temperatuuril on aga suurem mõju Läänemere lääneosas, just tingitud soolsuse optimaalsetest väärtustest.

Lokaalselt võib temperatuuril ja soolsusel olla peaaegu sama suur mõju karpide süsiniku sidumisel. Kõrge soolsusega piirkondadele, nagu Kattegati piirkond, on iseloomulik Läänemere suurimad süsiniku salvestamise võimekus. Sealsetes vetes seovad 0,25 ha pindalaga (uuritud ala pindala on 1 km²) karbikasvandused oma kodadesse pooleteist aasta jooksul kuni 90 tonni süsinikku. Seevastu Läänemere madalama soolsusega aladel, näiteks Soome ja Botnia lahes, on süsiniku sidumise võimekus märkimisväärselt madalam (alla ühe tonni). Analüüsitud tulevikustsenaariumi järgi prognoositakse Kattegatis süsiniku sidumise võimekuse suurenemist keskmiselt kuni 20 tonni võrra, mis on kuni 30% rohkem praegusest võimekusest. Süsiniku sidumise võimekus suureneb tänu stabiilselt kõrgetele soolsuse väärtusele ning mõnetisele temperatuuri tõusule. Prognooside kohaselt võivad aga Läänemere kesk- ja põhjaosas süsiniku sidumise tingimused drastiliselt halveneda seoses prognoositud soolsuse langusega. Alla 5 soolsus on rannakarbi jaoks liiga madal ning võib kaasa tuua rannakarbi arvukuse vähenemise või populatsiooni hävimise. Siit võib järeldada, et üldjoontest on karbifarmide süsiniku sidumise potentsiaal Läänemeres pigem väikese efektiivsusega kliimamuutuseid leevendav mehhanism. Karbifarmide suurim positiivne keskkonnamõju on vee puhastamine üleliigsetest lämmastiku- ja fosforiühenditest.

Käesolev töö soovib karbifarme rajada eelkõike Läänemere üleminekualadele ehk võimalikult lähedale Põhjamerele, kus aktiivne veevahetus, kõrgem soolsus ja soojem pinnaveetemperatuur tagab rannakarpidele paremad kasvutingimused. Kuna soolsus on suures plaanis kolmest uuritud keskkonnategurist süsiniku sidumise võimekust enim mõjutav keskkonnategur, siis tasuks magedamates Läänemere piirkondades efektiivsemaks süsiniku sidumiseks pikendada karpide kasvutsüklit, suurendada karbikasvanduste pindala ning rajada farmid hea veeliikuvusega so. parema toidubaasiga rannikuvee piirkondadesse, kus paremad keskkonnatingimused osaliselt kompenseerivad soolsuse limitatsioonist tingitud puudusi.

Summary

In today's world, it is essential to find innovative solutions that combine conservation and economic growth as the negative impacts of anthropogenic climate change intensify. Long-term carbon sequestration is critical to reducing the total amount of carbon in the atmosphere, thereby helping to mitigate the negative effects of climate change.

This master thesis focused on the following research questions:

- 1) How suitable is the Baltic Sea for establishing blue mussel farms for long-term carbon sequestration?
- 2) How does the carbon sequestration capacity change in different regions over the spatial scale and throughout the growth cycle under current and plausible future environmental conditions?
- 3) What is the relative contribution of different environmental conditions (surface salinity, surface temperature, and chlorophyll- α) in determining the long-term carbon sequestration capacity of bivalves?
- 4) What should be done to increase the effectiveness of mussel farms in mitigating climate change?

The results are based on a DEB model adapted for this study that includes the biocalcification process. Our model adds the calculation of shell calcification dynamics in addition to other metabolic processes of the mussels. In contrast to previous models, the DEB model used for this thesis allows the separate modeling of energy flows in mussel shells and soft tissues.

The raw data used to adapt and parameterize the DEB model were mussel growth data and values of key environmental variables collected throughout the Baltic Sea. Two scenarios were investigated using current and future environmental conditions (climate change + HELCOM Baltic Sea Action Plan nutrient reduction plan).

Our results indicate that salinity and temperature have the greatest impact on the carbon sequestration capacity of cultivated mussels. The role of salinity is important on large spatial scales and is particularly important in the central and northern parts of the Baltic

Sea, where lower salinities limit mussel growth. Sea surface temperature has a stronger effect in the western part of the Baltic Sea. Locally, temperature and salinity have almost equal effects on mussel carbon sequestration. Areas with high salinity, such as the Kattegat region, are characterized by the highest carbon storage capacity in the Baltic Sea. In this area, mussel farms of 0.25 ha can capture up to 90 tons of carbon in their shells over a period of 1.5 years. However, in the Gulf of Finland and the Bothnian Bay, where salinity levels are lower, the carbon sequestration capacity is lower (less than one ton). According to the analyzed plausible future scenario, the carbon sequestration capacity in the Kattegat is projected to increase by up to 20 tons on average, which is up to 30% more than the current capacity. The increase in carbon sequestration is due to stable salinity levels and a slight increase in surface temperature. However, in the central and northern parts of the Baltic Sea, the carbon sequestration potential is expected to decrease sharply due to the projected decrease in salinity. A salinity of less than 5 is too low for blue mussels and may lead to a decline or mortality of these mussel populations.

Overall, the carbon sequestration potential of mussel beds in the Baltic Sea is a relatively low efficiency climate change mitigation mechanism. The main environmental benefit of mussel farms is the removal of excess nitrogen and phosphorus compounds. In order to increase the effectiveness of mussel farms, we recommend that they be established primarily in the western sub-basins of the Baltic Sea. Near the North Sea, optimal environmental conditions for mussels exist, such as active water exchange, higher salinity and warmer surface water temperatures, which provide better growth conditions. Since salinity is the most influential environmental factor for carbon sequestration capacity out of the three studied factors, on a large scale, we recommend that in the less saline regions of the Baltic Sea: extend the growth cycle of mussels, increase the area of mussel farms, and locate farms in coastal areas with good water exchange. These could be bays with higher food availability, where better environmental conditions compensate for the limitations and stress caused by lower salinity.

Tänuavaldused

Ma soovin südamest tänada oma kahte suurepärast ja pühendunud juhendajat Jonnet ja Franciscot! Aitäh, Jonne, et oled alati valmis probleeme lahendama ja küsimustele vastama, jäädes kõikide tegemiste juures positiivseks ja innustavaks! Thank you, Francisco, for sharing your passion towards marine biology and for your time to teach and support me throughout this thesis and beyond! Suured tänud, Ilmar, et oled lahkelt jaganud oma Läänemere alaseid teadmisi ja kogemusi ning abistasid selle lõputöö keeleteoimetusega! Soovin tänada ka tervet Eesti Mereinstituudi meresüsteemide osakonda andmete kogumise ja hea nõu eest! Kõige suuremad tänuavaldused kuuluvad aga minu kallile perekonnale ja headele sõpradele igapäevase rõõmu ja vankumatu toetuse eest!

Kasutatud kirjandus

- Alonso, A.A., Álvarez-Salgado, X.A., Antelo, L.T., 2021. Assessing the impact of bivalve aquaculture on the carbon circular economy. *J. Clean. Prod.* 279, 123873. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123873>
- Álvarez-Salgado, X.A., Fernández-Reiriz, M.J., Fuentes-Santos, I., Antelo, L.T., Alonso, A.A., Labarta, U., 2022. CO₂ budget of cultured mussels metabolism in the highly productive Northwest Iberian upwelling system. *Sci. Total Environ.* 849. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157867>
- Archer, D., Eby, M., Brovkin, V., Ridgwell, A., Cao, L., Mikolajewicz, U., Caldeira, K., Matsumoto, K., Munhoven, G., Montenegro, A., Tokos, K., 2009. Atmospheric Lifetime of Fossil Fuel Carbon Dioxide. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 37, 117–134. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.031208.100206>
- Aubin, J., Fontaine, C., Callier, M., d'orbcastel, E.R., 2018. Blue mussel (*Mytilus edulis*) bouchot culture in Mont-St Michel Bay: potential mitigation effects on climate change and eutrophication. *Int. J. LIFE CYCLE Assess.* <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1403-y>
- Avdelas, L., Avdic-Mravljje, E., Borges Marques, A.C., Cano, S., Capelle, J.J., Carvalho, N., Cozzolino, M., Dennis, J., Ellis, T., Fernández Polanco, J.M., Guillen, J., Lasner, T., Le Bihan, V., Llorente, I., Mol, A., Nicheva, S., Nielsen, R., van Oostenbrugge, H., Villasante, S., Visnic, S., Zhelev, K., Asche, F., 2021. The decline of mussel aquaculture in the European Union: causes, economic impacts and opportunities. *Rev. Aquac.* 13, 91–118. <https://doi.org/10.1111/raq.12465>
- Berg, J.M., Tymoczko, J.L., Stryer, L., 2012. *Biochemistry*, 7th ed., international ed. ed. W.H. Freeman and Company, New York, N.Y.
- Berner, R.A., 2003. The long-term carbon cycle, fossil fuels and atmospheric composition. *Nature* 426, 323–326. <https://doi.org/10.1038/nature02131>
- Bertolini, C., Bernardini, I., Brigolin, D., Matozzo, V., Milan, M., Pastre, R., 2021. A bioenergetic model to address carbon sequestration potential of shellfish farming: Example from *Ruditapes philippinarum* in the Venice lagoon. *ICES J. Mar. Sci.* 78, 2082–2091. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsab099>
- Bollmann, M., 2010. *World Ocean Review 1, Living with the oceans. – A report on the state of the world's oceans.*

- Bonsdorff, E., Pearson, T., 1999. Variation in the sublittoral macrozoobenthos of the Baltic Sea along environmental gradients: A functional-group approach. *Aust. J. Ecol.* 24, 312–326. <https://doi.org/10.1046/j.1442-9993.1999.00986.x>
- Brigolin, D., Dal Maschio, G., Rampazzo, F., Giani, M., Pastres, R., 2009. An individual-based population dynamic model for estimating biomass yield and nutrient fluxes through an off-shore mussel (*Mytilus galloprovincialis*) farm. *Estuar. Coast. SHELF Sci.* 82, 365–376. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2009.01.029>
- Campana, S., 2011. How Reliable are Growth Back-Calculations Based on Otoliths? *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 47, 2219–2227. <https://doi.org/10.1139/f90-246>
- Carstensen, J., Conley, D.J., Bonsdorff, E., Gustafsson, B.G., Hietanen, S., Janas, U., Jilbert, T., Maximov, A., Norkko, A., Norkko, J., Reed, D.C., Slomp, C.P., Timmermann, K., Voss, M., 2014. Hypoxia in the Baltic Sea: Biogeochemical Cycles, Benthic Fauna, and Management. *AMBIO* 43, 26–36. <https://doi.org/10.1007/s13280-013-0474-7>
- Dahl, M., Gullström, M., Bernabeu, I., Serrano, O., Leiva-Dueñas, C., Linderholm, H., Asplund, M., Björk, M., Ou, T., Svensson, J., Andrén, E., Andrén, T., Bergman, S., Braun, S., Eklöf, A., Ežerinskis, Ž., Garbaras, A., Hällberg, P., Löfgren, E., Mateo, M., 2024. A 2,000- Year Record of Eelgrass (*Zostera marina* L.) Colonization Shows Substantial Gains in Blue Carbon Storage and Nutrient Retention. *Glob. Biogeochem. Cycles* 38. <https://doi.org/10.1029/2023GB008039>
- Des, M., Gómez-Gesteira, M., deCastro, M., Gómez-Gesteira, L., Sousa, M.C., 2020. How can ocean warming at the NW Iberian Peninsula affect mussel aquaculture? *Sci. Total Environ.* 709, 136117. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136117>
- Doney, S., Bopp, L., Long, M., 2014. Historical and Future Trends in Ocean Climate and Biogeochemistry. *Oceanography* 27, 108–119. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2014.14>
- Dong, S., Wang, F., Zhang, D., Yu, L., Pu, W., Shang, Y., 2022. Growth performance and ecological services evaluation of razor clams based on dynamic energy budget model. *J. Environ. Manage.* 306. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114392>
- Duarte, C., Wu, J., Xiao, X., Bruhn, A., Krause-Jensen, D., 2017. Can Seaweed Farming Play a Role in Climate Change Mitigation and Adaptation? *Front. Mar. Sci.* 4. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00100>

- Dutheil, C., Meier, H.E.M., Gröger, M., Börgel, F., 2023. Warming of Baltic Sea water masses since 1850. *Clim. Dyn.* 61, 1311–1331. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06628-z>
- Ehrnsten, E., Sun, X., Humborg, C., Norkko, A., Savchuk, O.P., Slomp, C.P., Timmermann, K., Gustafsson, B.G., 2020. Understanding Environmental Changes in Temperate Coastal Seas: Linking Models of Benthic Fauna to Carbon and Nutrient Fluxes. *Front. Mar. Sci.* 7. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00450>
- Emerson, S., Hedges, J., 2008. *Chemical Oceanography and the Marine Carbon Cycle*. Chem. Oceanogr. Mar. Carbon Cycle Emerson J Hedges Camb. Camb. Univ. Press 2008. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511793202>
- EUMOFA, 2022. European market observatory for fisheries and aquaculture products – Mussel in the EU. Publications Office of the European Union, Luxembourg:
- FAO, 2024. *Fishery and Aquaculture Statistics – Yearbook 2021*. FAO, Rome, Italy.
- Filgueira R, Byron CJ, Comeau LA, Costa-Pierce B, Cranford PJ, Ferreira JG, Grant J, Guyondet T, Jansen HM, Landry T, McKindsey CW, Petersen JK, Reid GK, Robinson SMC, Smaal A, Sonier R, Strand Ø, Strohmeier T, 2015. An integrated ecosystem approach for assessing the potential role of cultivated bivalve shells as part of the carbon trading system. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 518, 281–287.
- Filgueira, R., Guyondet, T., Comeau, L.A., Tremblay, R., 2016. Bivalve aquaculture-environment interactions in the context of climate change. *Glob. Change Biol.* 22, 3901–3913. <https://doi.org/10.1111/gcb.13346>
- Frankignoulle, M., Canon, C., Gattuso, J.-P., 1994. Marine calcification as a source of carbon dioxide: Positive feedback of increasing atmospheric CO₂. *Limnol. Oceanogr.* 39, 458–462. <https://doi.org/10.4319/lo.1994.39.2.0458>
- Gallagher, J.B., 2015. Implications of global climate change and aquaculture on blue carbon sequestration and storage: Submerged aquatic ecosystems, *Aquaculture Ecosystems: Adaptability and Sustainability*. <https://doi.org/10.1002/9781118778531.ch8>
- Gold, D.A., Vermeij, G.J., 2023. Deep resilience: An evolutionary perspective on calcification in an age of ocean acidification. *Front. Physiol.* 14. <https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1092321>

- Gröger, M., Arneborg, L., Dieterich, C., Höglund, A., Meier, H.E.M., 2019. Summer hydrographic changes in the Baltic Sea, Kattegat and Skagerrak projected in an ensemble of climate scenarios downscaled with a coupled regional ocean–sea ice–atmosphere model. *Clim. Dyn.* 53, 5945–5966. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04908-9>
- Heinze, C., Meyer, S., Goris, N., Anderson, L., Steinfeldt, R., Chang, N., Le Quéré, C., Bakker, D.C.E., 2015. The ocean carbon sink – impacts, vulnerabilities and challenges. *Earth Syst. Dyn.* 6, 327–358. <https://doi.org/10.5194/esd-6-327-2015>
- HELCOM, 2021. Baltic Sea Action Plan– 2021 update. HELCOM. <https://helcom.fi/wpcontent/uploads/2021/10/Baltic-Sea-Action-Plan-2021-update.pdf>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Ed.), 2023. Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge. <https://doi.org/10.1017/9781009157926>
- IPCC, 2013. Summary for Policymakers, in: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3–29.
- Järvekülg, A., Veldre, I., 1963. *Elu Läänemeres*. Eesti Riiklik Kirjastus, Tallinn.
- Kautsky, N., 1982. Growth and size structure in a baltic *Mytilus edulis* population. *Mar. Biol.* 68, 117–133. <https://doi.org/10.1007/BF00397599>
- Khaliwala, S., Tanhua, T., Mikaloff Fletcher, S., Gerber, M., Doney, S.C., Graven, H.D., Gruber, N., McKinley, G.A., Murata, A., Ríos, A.F., Sabine, C.L., 2013. Global ocean storage of anthropogenic carbon. *Biogeosciences* 10, 2169–2191. <https://doi.org/10.5194/bg-10-2169-2013>
- Kijewski, T., Zbawicka, M., Strand, J., Kautsky, H., Kotta, J., Rätsep, M., Wenne, R., 2019. Random forest assessment of correlation between environmental factors and genetic differentiation of populations: Case of marine mussels *Mytilus*. *Oceanologia* 61, 131–142. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2018.08.002>

- Knöbel, L., Nascimento-Schulze, J.C., Sanders, T., Zeus, D., Hiebenthal, C., Barboza, F.R., Stuckas, H., Melzner, F., 2021. Salinity Driven Selection and Local Adaptation in Baltic Sea Mytilid Mussels. *Front. Mar. Sci.* 8. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.692078>
- Kooijman, S.A.L.M., 2010. Dynamic energy budget theory for metabolic organisation, third edition. *Dyn. Energy Budg. Theory Metab. Organ. Third Ed.* 1–514. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511805400>
- Kotta, J., Futter, M., Kaasik, A., Liversage, K., Rätsep, M., Barboza, F., Bergström, L., Bergström, P., Bobsien, I., Diaz, E., Herkül, K., Jonsson, P., Korpinen, S., Kraufvelin, P., Krost, P., Lindahl, O., Lindegarth, M., Lyngsgaard, M., Muehl, M., Virtanen, E., 2020a. Response to a letter to editor regarding Kotta et al. 2020: Cleaning up seas using blue growth initiatives: Mussel farming for eutrophication control in the Baltic Sea. *Sci. Total Environ.* 739, 138712. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138712>
- Kotta, J., Futter, M., Kaasik, A., Liversage, K., Rätsep, M., Barboza, F., Bergström, L., Bergström, P., Bobsien, I., Diaz, E., Herkül, K., Jonsson, P., Korpinen, S., Kraufvelin, P., Krost, P., Lindahl, O., Lindegarth, M., Lyngsgaard, M., Muehl, M., Virtanen, E., 2019. Cleaning up seas using blue growth initiatives: Mussel farming for eutrophication control in the Baltic Sea. *Sci. Total Environ.* 709, 136144. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136144>
- Kotta, J., Martin, G., Eschbaum, R., Aps, R., Lees, L., Kalda, R., 2020b. Vesiviljelus Eesti merealal - alusandmed ja uuringud.
- Kotta, J., Oganjan, K., Lauringson, V., Pärnoja, M., Kaasik, A., Rohtla, L., Kotta, I., Orav-Kotta, H., 2015. Establishing Functional Relationships between Abiotic Environment, Macrophyte Coverage, Resource Gradients and the Distribution of *Mytilus trossulus* in a Brackish Non-Tidal Environment. *PLOS ONE* 10, 1–19. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0136949>
- Kotta, J., Stechele, B., Barboza, F., Kaasik, A., Lavaud, R., 2023. Towards environmentally friendly finfish farming: A potential for mussel farms to compensate fish farm effluents. *J. Appl. Ecol.* 60. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14422>
- Kotta, J., Wernberg, T., Jänes, H., Kotta, I., Nurkse, K., Pärnoja, M., Orav-Kotta, H., 2018. Novel crab predator causes marine ecosystem regime shift. *Sci. Rep.* 8, 4956. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-23282-w>

- Larsson, J., Lind, E.E., Corell, H., Grahn, M., Smolarz, K., Lönn, M., 2017. Regional genetic differentiation in the blue mussel from the Baltic Sea area. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 195, 98–109. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2016.06.016>
- Lauringson, V., Veber, T., 2017. Merekeskkonna seisundi parandamine vesiviljeluse abil.
- Lavaud, R., Filgueira, R., Augustine, S., 2021. The role of Dynamic Energy Budgets in conservation physiology. *Conserv. Physiol.* 9, coab083. <https://doi.org/10.1093/conphys/coab083>
- Lavaud, R., Filgueira, R., Nadeau, A., Steeves, L., Guyondet, T., 2020. A Dynamic Energy Budget model for the macroalga *Ulva lactuca*. *Ecol. Model.* 418, 108922. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2019.108922>
- le Gouvello, R., Brugère, C., Simard, F., 2022. Aquaculture and Nature-based Solutions: identifying synergies between sustainable development of coastal communities, aquaculture, and marine and coastal conservation. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2022.02.en>
- Lehmann, A., Myrberg, K., Post, P., Chubarenko, I., Dailidiene, I., Hinrichsen, H.-H., Hüsey, K., Liblik, T., Meier, H.E.M., Lips, U., Bukanova, T., 2022. Salinity dynamics of the Baltic Sea. *Earth Syst. Dyn.* 13, 373–392. <https://doi.org/10.5194/esd-13-373-2022>
- Lewis, D., Cerrato, R., 1997. Growth uncoupling and the relationship between shell growth and metabolism in the soft shell clam *Mya arenaria*. *Mar. Ecol.-Prog. Ser.* - MAR ECOL-PROGR SER 158, 177–189. <https://doi.org/10.3354/meps158177>
- Lindahl, O., Kollberg, S., 2009. Can the EU Agri-Environmental Aid Program be Extended into the Coastal Zone to Combat Eutrophication? *Hydrobiologia* 629, 59–64. <https://doi.org/10.1007/s10750-009-9771-3>
- Martínez García, C., González-Fonteboa, B., Abella, F., Diego, C., 2016. Performance of mussel shell as aggregate in plain concrete. *Constr. Build. Mater.* 139. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.091>
- Martini, A., Cali, M., Capoccioni, F., Martinoli, M., Pulcini, D., Buttazzoni, L., Moranduzzo, T., Pirlo, G., 2022. Environmental performance and shell formation-related carbon flows for mussel farming systems. *Sci. TOTAL Environ.* <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154891>
- Mats, W., 2006. Population dynamics of blue mussels in a variable environment at the edge of their range.

- Meier, M., Höglund, A., Döscher, R., Andersson, H., Löptien, U., Kjellström, E., 2011. Quality assessment of atmospheric surface fields over the Baltic Sea of an ensemble of regional climate model simulations with respect to ocean dynamics. *Oceanologica* 53, 193–227. <https://doi.org/10.5697/oc.53-1-TI.193>
- Meier, M., Hordoir, R., Andersson, H., Dieterich, C., Eilola, K., Gustafsson, B., 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. *Clim. Dyn.* 39. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1339-7>
- Meier, 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., Dierschke, V., Frauen, C., Frederiksen, M., Zhang, W., 2022. Climate change in the Baltic Sea region: A summary. *Earth Syst. Dyn.* 13, 457–593. <https://doi.org/10.5194/esd-13-457-2022>
- Mollica, N.R., Guo, W., Cohen, A.L., Huang, K.-F., Foster, G.L., Donald, H.K., Solow, A.R., 2018. Ocean acidification affects coral growth by reducing skeletal density. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 115, 1754–1759. <https://doi.org/10.1073/pnas.1712806115>
- Morris, J.P., Humphreys, M.P., 2019. Modelling seawater carbonate chemistry in shellfish aquaculture regions: Insights into CO₂ release associated with shell formation and growth. *Aquaculture* 501, 338–344. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.11.028>
- Muller, E., Nisbet, R., 2014. Dynamic Energy Budget Modeling Reveals The Potential Of Future Growth And Calcification For The Coccolithophore *Emiliania Huxleyi* In An Acidified Ocean. *Glob. Change Biol.* 20. <https://doi.org/10.1111/gcb.12547>
- Nõomaa, K., Kotta, J., Szava-Kovats, R., Herkül, K., Eschbaum, R., Vetemaa, M., 2022. Novel Fish Predator Causes Sustained Changes in Its Prey Populations. *Front. Mar. Sci.* 9. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.849878>
- Ojaveer, E., 2014. Läänemeri. Ökosüsteemid ja elusvarud, nende hindamine ning haldamine. Teaduste Akadeemia Kirjastus, Tallinn.
- OÜ Alkranel, 2023. Eesti merestrateegia meetmekava 2022-2027 keskkonnamõju strateegiline hindamine (KSH).

- Pansch, C., Scotti, M., Barboza, F., Al-Janabi, B., Brakel, J., Briski, E., Bucholz, B., Franz, M., Ito, M., Paiva, F., Saha, M., Sawall, Y., Weinberger, F., Wahl, M., 2018. Heat waves and their significance for a temperate benthic community: A near-natural experimental approach. *Glob. Change Biol.* 24. <https://doi.org/10.1111/gcb.14282>
- Pawlak, J., Laamanen, M., Andersen, J., 2009. Eutrophication in the Baltic Sea: An Integrated Thematic Assessment of the Effects of Nutrient Enrichment in the Baltic Sea Region: Executive Summary. HELCOM. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2758.0564>
- Randmaa, L., Suuroja, K.-M., Salm, K., Põllumäe, A., Anjutin, K., Karpin, V., 2020. Veealuse maailma õhtuõpik. Eesti Meremuuseum, Tallinn.
- Raudsepp, U., Maljutenko, I., Barzandeh, A., Uiboupin, R., Lagemaa, P., 2023. Baltic Sea freshwater content. 7th Ed. Copernic. Ocean State Rep. OSR7 1-osr7, 7. <https://doi.org/10.5194/sp-1-osr7-7-2023>
- Ray, N.E., O'Meara, T., Williamson, T., Izursa, J.-L., Kangas, P.C., 2018. Consideration of carbon dioxide release during shell production in LCA of bivalves. *Int. J. LIFE CYCLE Assess.* <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1394-8>
- Röhr, M.E., Holmer, M., Baum, J.K., Björk, M., Boyer, K., Chin, D., Chalifour, L., Cimon, S., Cusson, M., Dahl, M., Deyanova, D., Duffy, J.E., Eklöf, J.S., Geyer, J.K., Griffin, J.N., Gullström, M., Hereu, C.M., Hori, M., Hovel, K.A., Hughes, A.R., Jorgensen, P., Kiriakopoulos, S., Moksnes, P.-O., Nakaoka, M., O'Connor, M.I., Peterson, B., Reiss, K., Reynolds, P.L., Rossi, F., Ruesink, J., Santos, R., Stachowicz, J.J., Tomas, F., Lee, K.-S., Unsworth, R.K.F., Boström, C., 2018. Blue Carbon Storage Capacity of Temperate Eelgrass (*Zostera marina*) Meadows. *Glob. Biogeochem. Cycles* 32, 1457–1475. <https://doi.org/10.1029/2018GB005941>
- Saat, T., 2022. Eesti kalad. Kalanduse teabekeskus.
- Sanders, T., Schmittmann, L., Nascimento-Schulze, J.C., Melzner, F., 2018. High Calcification Costs Limit Mussel Growth at Low Salinity. *Front. Mar. Sci.* 5. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00352>
- Sanders, T., Thomsen, J., Müller, J.D., Rehder, G., Melzner, F., 2021. Decoupling salinity and carbonate chemistry: low calcium ion concentration rather than salinity limits calcification in Baltic Sea mussels. *Biogeosciences* 18, 2573–2590. <https://doi.org/10.5194/bg-18-2573-2021>
- Schlieper, A.R.C., 1972. Biology of brackish water. Schweizerbart Science Publishers, Stuttgart, Germany.

- Sea et al., M., 2022. The Influence of Mussel Restoration on Coastal Carbon Cycling.
- Seuront, L., Nicastró, K., Zardi, G., Goberville, E., 2019. Decreased thermal tolerance under recurrent heat stress conditions explains summer mass mortality of the blue mussel *Mytilus edulis*. *Sci. Rep.* 9. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53580-w>
- Sonesten, L., Svendsen, L., Tornbjerg, H., Gustafsson, B., Frank-Kamenetsky, D., Haapaniemi, J., 2018. Sources and pathways of nutrients to the Baltic Sea - HELCOM PLC-6.
- Stadmark, J., Conley, D.J., 2011. Mussel farming as a nutrient reduction measure in the Baltic Sea: Consideration of nutrient biogeochemical cycles. *Mar. Pollut. Bull.* 62, 1385–1388. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.05.001>
- Stuckas, H., Stoof, K., Quesada, H., Tiedemann, R., 2009. Evolutionary implications of discordant clines across the Baltic *Mytilus* hybrid zone (*Mytilus edulis* and *Mytilus trossulus*). *Heredity* 103, 146–156. <https://doi.org/10.1038/hdy.2009.37>
- Tan, K., Zheng, H., 2020. Ocean acidification and adaptive bivalve farming. *Sci. Total Environ.* 701, 134794. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134794>
- Tedengren, M., André, C., Johannesson, K., Kautsky, N., 1990. Genotypic and phenotypic differences between Baltic and North Sea populations of *Mytilus edulis* evaluated through reciprocal transplantations. III. Physiology. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 59. <https://doi.org/10.3354/meps059221>
- The BACC Author Team. Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. 2008. DOI: 10.1007/978-3-540-72786-6
- The BACC Author Team. Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. 2008. DOI: 10.1007/978-3-540-72786-6
- Väinölä, R., Strelkov, P., 2011. *Mytilus trossulus* in Northern Europe. *Mar. Biol.* 158, 817–833. <https://doi.org/10.1007/s00227-010-1609-z>
- Vuorinen, I., Antsulevich, A., Maximovich, N., 2002. Spatial distribution and growth of the common mussel *Mytilus edulis* L. in the archipelago of SW-Finland, northern Baltic Sea. *Boreal Environ. Res.* 7.
- Wickham H (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York. ISBN 978-3-319-24277-4, <https://ggplot2.tidyverse.org>.

Zettler, M.L., Karlsson, A., Kontula, T., Gruszka, P., Laine, A.O., Herkül, K., Schiele, K.S., Maximov, A., Haldin, J., 2014. Biodiversity gradient in the Baltic Sea: a comprehensive inventory of macrozoobenthos data. *Helgol. Mar. Res.* 68, 49–57. <https://doi.org/10.1007/s10152-013-0368-x>

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Annaleena Vaher,

1. Annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose „Läänemere karbikasvanduste süsiniku sidumise võimekus“, mille juhendajateks on Jonne Kotta ja Francisco R. Barboza, reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Annaleena Vaher

22.05.2024