

21/03/2022

# Töendusliku kalapüügi ja kalakasvatusega seotud toitainete voogude modelleerimine Läänemeres ning saadud mudeli valideerimine Tagalahe kalakasvatuse näitel

Jonne Kotta, Brecht Stechele, Ants Kaasik,  
Robert Aps, Helen Orav-Kotta

TARTU ÜLIKOOL

2022

# Sisukord

Sissejuhatus .....	2
Räime ja kilu varuühikud ja varude seisund.....	3
Kutselise kalapüügi Läänemerest eemaldatav toitainete kogus.....	5
Räime ja kilu traalpüügi ruumiline ja sesoonne varieeruvus.....	6
Kutselise kalapüügi osatähtsus kalasööda tootmisprotsessis .....	7
Hüpoteetiline kalakasvatuse .....	8
DEB (dünaamilise energiabilansi) mudelite loomine, et hinnata toitainete vooge kala- ja karbikasvatustes.....	10
Merepõhja setete toitainete sisalduse ja suurselgrootute koosluste kaardistamine Tagalahe kalakasvatuse piirkonnas .....	14
Toitainete liikumine kalakasvatuses .....	14
Toitainevogude ajaline muutlikkus kalakasvatuses ühe kasvatamistsükli jooksul .....	14
Toitainete bilanss kalakasvatuses .....	19
Suurselgrootute koosluste potentsiaal merepõhja settinud toitainete biomineraliseerimisel ....	22
Tagalahe kalakasvatuse keskkonnamõju merepõhja setete toitainete sisaldusele ja suurselgrootute kooslustele .....	23
Kalakasvatusest veesambasse ja meresetetes sattunud toitainete kompenseerimine karbikasvatuse abil .....	28
Soovitused ja järeldused .....	31
Viited .....	32
LISA 1. Eesti avamere ja Liivi lahe traalpüügi 2020. aasta igakuised summaarsed kalasaagid (kg) traaltunni kohta. Alusandmed pärinevad Põllumajandus- ja Toiduametist.....	35

## Sissejuhatus

Tervisliku toidu tootmine keskkonnahoidlikul viisil, on üks suurimaid globaalsetest väljakutsetest. Kalatarbimine elaniku kohta on alates 1960. aastast rohkem kui kahekordistunud ja looduslikud kalavarud ei võimalda enam seda suurenenud nõudlust rahuldada. Seetõttu on vesiviljelusel suur potentsiaal, et rahuldada kasvavat vajadust kala ja teiste meresaaduste järele. Tänapäeval ongi üle poole kogu maailmas tarbitavast kalast toodetud tehistingimustes (FAO, 2020). Ehkki vesiviljelus on kõige kiiremini kasvav toiduainesektor maailmas, on selle näol tegemist suhteliselt väikse tööstusharuga Eestis. Samas huvi Eesti kalanduse ja vesiviljeluse arendamise vastu on pidevalt suurenenemas.

Euroopa Liidu komisjon võttis 2014. aastal vastu ühise kalanduspoliitika reformi, et edendada muu hulgas ka vesiviljeluse arengut. Dokument hõlmab vesiviljeluse säästva arengu strateegilisi suuniseid koos ELi ühiste prioriteetide ja üldiste eesmärkidega. Prioriteetideks peetakse nelja valdkonda: vähendada bürokraatiat, parandada juurdepääsu maale ja veele, tugevdada konkurentsivõimet ning kasutada konkurentsieeliseid rangete kvaliteedi-, tervishoiu- ja keskkonnastandardite abil. Sellest tulenevalt tuleb keskenduda sellele, et tootmine oleks jätkusuutlik ja kvaliteetne ning tagaks tarbijatele toiduohutuse.

Käesoleval hetkel on toitainete tase Läänemeres liiga suur ning veekeskkonna kvaliteedi parandamiseks tuleks piirata lämmastiku- ja fosforühendite sattumist merre. Liigne toitainete sissevool põhjustab mikrovetikate vohamist veemassis, niitjate makrovetikate massarengut merepõhjas, vee läbipaistvuse vähenemist, rohket orgaanilise aine settimist, hapnikudefitsiiti põhjalähedastes veekihtides ja tundlikumate veeorganismide hukkumist (Kotta et al., 2017). Kuna vesiviljelus võib olla seotud selliste keskkonnaprobleemidega nagu eutrofeerumine, tuleks eutrofeerunud Läänemere tingimustes eelistada toitainete koormuse suhtes neutraalset või merekeskkonnast toitaineid väljaviivat vesiviljelust.

Läänemere kalanduses on seni peamiselt keskendutud kalavarude hindamisele ja nende jätkusuutliku kasutamise korraldamisele. Kalapüügile, kui olulisele Läänemere eutrofeerumist leevendavale ringmajanduse funktsioonile on aga seni vähem tähelepanu pööratud. Nimelt sisaldavad Läänemere räim ja kilu toorkaalu kohta vastavalt 2.4 % lämmastikku ja 0.43 % fosforit (Hjerne & Hansson, 2002). Lähtuvalt sellest peaksime Eesti kalapüügi tähtsuse iseloomustamisel edaspidi välja tooma lisaks traditsioonilistele sotsiaalmajanduslikele näitajatele ka selle merekeskkonna eutrofeerumist leevendava ringmajanduse funktsiooni, aga kindlasti vaid sellises mahus, mis ei kahjustaks kalavarude seisundit. Väljapüütud kala on võimalik püügikvootide ulatuses kasutada sumbakala söötade valmistamisel, et vähendada süsteemiväliste toitainete sattumist merekeskkonda. Läänemere regioonis sh. Eestis, Lätis, Soomes ja Taanis paikneb mitu kalakomponentide tehist, mis kasutavad Läänemerest püütud räime ja kilu kalajahu ja -õli tootmiseks.

Euroopa Komisjoni teatis vesiviljeluse strateegia kohta (Euroopa Komisjon, 2021) annab suuniseid, kuidas ELi vesiviljelussektori keskkonnatoimet saab veelgi parandada. Nende suuniste seas on välja toodud ka kestlike söödasüsteemide kasutamise vajadus. Kestlike söödasüsteemide all mõeldakse selliste söödakomponentide kasutamist, mis on saadud ökosüsteeme ja elurikkust kõige rohkem säästval ja toetaval viisil ning mis on samal ajal loomade tervise ja heaolu tagamiseks sobivad. Samuti rõhutatakse söödatootjate sõltuvuse vähendamist looduslikest varudest saadavast kalajahust ja kalaõlist suunates neid kasutama alternatiivseid valguallikaid nagu vetikaid, putukaid või teiste tööstusharude jäätmeid. See soovitus tuleneb asjaolust, et paljudel juhtudel toimub söödakomponentide valmistamine kalavarusid kahjustaval viisil. Läänemeres on aga räime ja kilu püük rahvusvaheliselt reguleeritud ning nende varude eksploateerimine jätkusuutlik. Tingituna looduskeskkonna muutlikkusest varieeruvad Läänemere räime ja kilu erinevate põlvkondade arvukused üsna suurtes piirides, mis väljendub ka nende

kalade kudemise biomassi (spawning stock biomass, SSB) ja lubatava kogusaagi (total allowable catch, TAC) suures aastatevahelises erinevuses.

Eestis ületab püütud kala kogus siinset kalatarbimist mitu korda. Sarnane olukord on iseloomulik ka naaberriikidele. Sellest tulenevalt on räime ja kilu kokkuostuhind suhteliselt madal. Viimaste aastate eksporditurgude ebastabiilsus on olukorda paraku veelgi keerulisemaks muutnud. Selleks, et tagada räime ja kilu püükide stabiilsus ja majanduslik mõttekus, on Eesti Kalapüügiühistu, Eesti Traalpüügi Ühistu ja Eesti Kutseliste Kalurite Ühistu loonud ühiselt Paldiski kalakomponentide tehase, kus kilust ja räimest toodetakse kalajahu ja -õli. Juba praegu töödeldakse suur osa väljapüütud räime ja kilu kvoodist ümber Paldiski kalakomponentide tehases. Tooraineks on väheväärtuslik kilu ja räim, samuti kõrvalsaadused, mis tekivad kilu ja räime töötlemisel inimtoiduks. Suures plaanis on tehase eesmärk tagada ühistute liikmetele võimalus oma väheväärtusliku saagise realiseerimiseks, andes neile võimaluse keskenduda kala töötlemisele inimtoiduks. Omanikud, ehk siis erinevate ühistute liikmed on ka peamised kalatarnijad. Suurem nõudlus on võimaldanud suurendada ka kala alghinda, pakkudes kalapüüdjatele majanduslikku stabiilsust. Tehase toodangut kasutatakse peamiselt merevesiviljeluses kalade söödaks. Kokkuvõtvalt panustab Paldiski kalakomponentide tehase Eesti räime- ja kilupüügi jätkusuutlikkusse, kuid ühtlasi tagab ka selle, et püügimaht ei oleks kvootidest oluliselt väiksem so. Eesti rannikumerest eemaldatakse kalapüügi abil sarnane kogus toitaineid kui varasematel aastatel. On oluline rõhutada, et kuna räime- ja kilupüük (merestrateegia tunnus D3) on rahvusvaheliselt reguleeritud, siis sellise loodusliku elemendi eemaldamisel ökosüsteemist ei muudeta ökosüsteemi ja toiduvõrkude tasakaalu (merestrateegia tunnused D1, D4). Nendest asjaoludest tulenevalt leiavad uuringu autorid, et kohaliku räime ja kilu kasutamist kalasööda tootmisel võib pidada keskkonda säästvaks lahenduseks ning teevad ettepaneku, et seda võiks arvestada ka toitainetebilansi arvutustes.

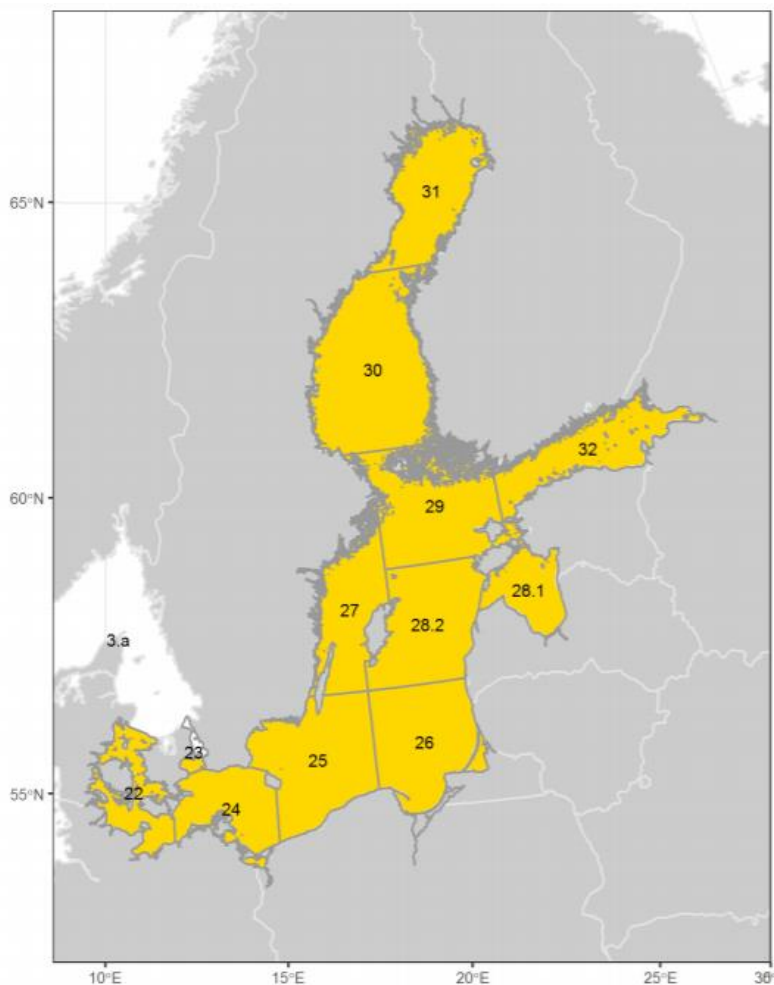
Selleks, et hinnata kuidas töenduslik kalapüük, püütud kaladest sööda valmistamine ja sellise sööda kasutamine kalakasvatustes mõjutab mere toitainete koormust, on vajalik kaardistada toitainete vood selle ahela kõikides etappides. Käesoleva uuringu eesmärgiks ongi hinnata töendusliku kalapüügi abil Läänemere keskkonnast eemaldatud toitainete hulka ning määratleda sellest kalast toodetud kalasööda kasutamise mõju piirkondlikule toitainete koormusele. Esmalt mõõdistatakse 1 km<sup>2</sup> täpsusega erinevates Eesti merepiirkondades räime ja kilu väljapüügiga eemaldatud toitainete kogused. Seejärel arvutatakse kalasööda tootmisprotsessi toitainete bilansi seisukohast, so. kui suure osa toodetud kalajahu/õli toitainete sisaldusest moodustab väljapüütud kilu ja räim. Võttes aluseks Eesti oludesse sobiva kalakasvatuse näitajad, modelleeritakse kalakasvatusest lähtuvate toitainete liikumist merekeskkonnas. Stsenariumarvutustes lähtutakse eeldusest, et kalakasvatuses kasutatav sööt on toodetud Läänemere kalast. Mudelarvutused võimaldavad näidata, kui suurel määral vabaneb toodetud kalakoguse kohta kalakasvatustest merekeskkonda toitaineid, millisel määral suudavad merekarpide kasvandused toitaineid immobiliseerida ning kui suures koguses eemaldatakse sumbakala väljavõtmisel merekeskkonnast toitaineid. Realistlike tulemuste saamiseks mõõdistatakse ühe sesooni vältel merekeskkonnas kalakasvatusega seotud erinevaid toitainetebilansi näitajaid ning kasutatakse saadud välimõõtmisi mudelite parametrizeerimiseks. Uuring peegeldab uuringu autorite seisukohti ja arvamusi.

## Räime ja kilu varuühikud ja varude seisund

Käesolevas töös keskendume kilule ja räimele, kuna tegemist on Eesti olulisemate püügikaladega. Räim (*Clupea harengus membras*) on Atlandi heeringa alamliik, mis asustab kogu Läänemerd, moodustades siin mitmeid kohalikke populatsioone. Kudemisaja järgi jaguneb räim märtsist juunini kudevaks kevadräimeks ning augustist septembrini kudevaks sügisräimeks, viimase osatähtsus on alates 1970. aastast olnud alla 5 % räime kogusaagist. Viimastel aastatel on siiski täheldatud sügiskuduräime arvukuse mõningast tõusu, eriti Liivi lahes. Läänemere kilu ehk kilu (*Sprattus sprattus balticus*) on euroopa kilu (*Sprattus sprattus*) alamliik, mis asustab suuremat osa

Läänemerest. Kilu koeb juunis-juulis avamere ülemistes veekihtides ning kuna marjaterad jäävad vette hõljuma, on kudemiseks vajalik vee soolsus vähemalt 6 promilli.

Rahvusvaheline Mereuurimise Nõukogu (International Council for the Exploration of the Sea, ICES) jaotab Läänemere ökoloogilise regiooni statistilisteks alampiirkondadeks (Joonis 1), mida kasutatakse ka rahvusvaheliselt reguleeritud kalavarude, nagu Läänemere kilu ja räim, kalapüügi korraldamisel, püügistatistika koondamisel ja esitamisel nii rahvuslikul, kui ka rahvusvahelisel tasandil.



Joonis 1. Läänemere ökoloogiline regioon (kollane) ja ICES statistilised alampiirkonnad (ICES, 2020).

Rahvusvaheliselt reguleeritava kalapüügi puhul töõnduskalade varusid soovitakse ekspluateerida kudukarja biomass piirini, mis tagaks ka järgnevateks aastateks kalavaru jätkuva täienemise. Paljude liikide puhul võib see piir olla ka ületatud ning varude taastamiseks tuleks püüki hoopis piirata.

Rahvusvaheliselt reguleeritavate kalaliikide, räime ja kilu kui varu seisundi hindamine toimub Rahvusvahelise Mereuurimise Nõukogu (ICES) Läänemere Kalandustöõrühma poolt kooskõlastatud meetodika alusel. Meetodika tugineb peamiselt regulaarselt töõnduslikest püükidest kogutud bioloogilistele analüüsidele ja noorkalade kui varu täiendi arvukuse hinnangutele. Kilu käsitletakse kogu Läänemere ulatuses ühe nn. ühikvaruna ehk populatsioonina. Räime varude seisundit aga hinnatakse ja antakse püügisoovitused kolme nn. ühikvaru kohta eraldi: Läänemere keskosa räim alampiirkondades 25-29 ja 32, Liivi lahe räim alampiirkonnas 28.1, Botnia mere ja lahe räim alampiirkonnas 30 ja 31. Neist Liivi lahe, Botnia mere ning tõenäoliselt ka Botnia lahe räime puhul on tegemist kohalike looduslike populatsioonidega.

ICES soovib ava-Läänemere räimepüüki 2021. aastal vähendada umbes 36 % (võrreldes 2020. aasta soovitatuga) ehk 108177 tonnini, kuid selle vähenemise taga on peamiselt varu seisundi hindamise printsiipide muutused, mille tulemusel on räime kudukarja tegelik biomass (SSB) osutunud varasemast madalamaks ja kalastussuremus (F) on osutunud varasemast kõrgemaks. Liivi lahes lubatakse 2021. aastal räime enam püüda kuni 39446 tonni (2020. aasta püügisoovitus oli vastavalt 30382 tonni). Kilu iseloomustab arvukuse ja biomassi suur muutlikkus, mis peegeldub ka tema üldsaagi dünaamikas: viimaste aastakümnete vältel on see varieerunud 37 000 tonnist 1983. aastal kuni 529 000 tonnini 1997. aastal. ICES soovib kilupüüki mõneti vähendada, so. saak ei tohiks ületada 247952 tonni (2020. aasta maksimaalne saagisoovitus oli 255786 tonni). Püügisoovituse vähenemise põhjustas 2014. aasta väga tugeva põlvkonna osatähtsuse vähenemine varus ja uute suurte arvukusega põlvkondade lisandumise puudumine (Tartu Ülikool, 2021a).

*Käesoleva uurimuse kontekstis on oluline rõhutada, et nii räime kui ka kilu liikuvus meres on väga suur ja pole õigustatud toitainete bilansi arvutamise seisukohast kasutada väiksemaid ruumiühikuid kui ICES'i poolt defineeritud varuühikud. Seega kui räum on püütud Läänemere keskosa alampiirkondadest 25-29 ja 32 ning seda kala kasutatakse söödana samades alampiirkondades paiknevates kalakasvatustes (Eesti perspektiivsemad kalakasvatuspäirkonnad asuvad ava-Läänemeres), on tegemist kohalikul toorainel põhineva söödaga. Läänemerest püütud kilu on sõltumata püügipiirkonnast käsitletav kui kohalikul toorainel põhinev sööt, kuna tegemist on ühe populatsiooniga.*

*Teisalt on oluline rõhutada, et vastavalt EL veepoliitika raamdirektiivile peetakse pinnavee seisundi üle arvestust pinnaveekogumite kaupa, kõik rannikuveekogumid on halvas seisundis ning eesmärk on saavutada veekogumite hea seisund 2027. aastaks. Vastavalt veepoliitika raamdirektiivile ei tohi kalakasvandus halvendada rannikuveekogumite seisundit ega ka takistada rannikuveekogumite hea seisundi saavutamist. Seega võib püügiruumide käsitletus kompenseerivate meetmete osas olla osade (piiratud veevahetusega) veekogumite puhul liiga üldine, sest kalakasvatus ei pruugi püügiruumi seisundit mõjutada, küll aga võib avaldada mõju väiksematele üksustele ehk rannikuveekogumitele. Siit tuleneb, et kui kalakasvatus ja selle mõju kompenseerimine leiab aset rannikuveekogumis, siis peab olema tagatud, et selle veekogumi seisund ei halvene ning inimtegevus ei sea ohtu hea seisundi saavutamist. Üldjuhul on Eesti rannikumere veekogumid omavahel ja ka ava-Läänemerega siiski väga tugevalt seotud so. ava-Läänemere seisund määrab suures osas ära meie rannikumere seisundi ning enne, kui ei ole tagatud ava-Läänemere hea keskkonnaseisund, ei ole oodata ka meie mereala veekogumite seisundi olulist paranemist.*

## Kutselise kalapüügiga Läänemerest eemaldatav toitainete kogus

Kutselised kalurid püüavad traallaevadega kalalaeva kalapüügiloa alusel Läänemere kilu ja suurema osa neile eraldatud Läänemere räime kvoodist. Olulise osa Eesti kalurite räämesaagist moodustab samuti räime kutseline rannapüük Läänemerest kaluri kalapüügiloa alusel, kusjuures suurema osa sellest saagist annab Liivi lahe räime kutseline rannapüük.

Viidates Põllumajandus- ja Toiduameti kalapüügi andmetele (PTA, 2021) moodustasid 2020. aastal Läänemere kilu ja räum suurema osa Eesti kalurite traalpüügi saagist Läänemerel (Tabel 1). Eesti kalurite 2020. aasta traalpüügi saak Läänemerel ICES alampiirkondades 27-32 moodustas kokku kilu osas 24309,385 tonni ja räime osas 20873,006 tonni (Tabel 1).

Tabel 1. Kutselise kalapüügi saak kalalaeva kalapüügiloa alusel (traallaevad) Läänemerel ICES alampiirkondades 27-32 seisuga 31.12.2020 (PTA, 2021).

Kalaliik	Kala kood	27	28.1	28.2	29	32	kokku
Emakala	ELP		34,708				34,708

Kilu	SPR	38,996	581,208	3169,285	6604,705	13915,191	24309,385
Lõhi	SAL			0,012			0,012
Meritint	SME		39,562			9,028	48,59
Räim	HER	49,909	5799,712	2118,455	2360,351	10544,579	20873,006
Tursk (Atlandi tursk)	COD			0,048			0,048
Tuulehaug	GAR		5,147				5,147
<b>kokku</b>		<b>88,905</b>	<b>6460,337</b>	<b>5287,8</b>	<b>8965,056</b>	<b>24468,798</b>	<b>45270,896</b>

Lähtudes Hjerne & Hansson (2002) poolt välja arvatud kalade toitainete sisaldusest, eemaldas kutselise kilupüügi saak kalalaeva kalapüügiloa alusel Läänemerest 583,425 tonni lämmastikku ja 104,530 tonni fosforit. Samas kutselise räimepüügi saak kalalaeva kalapüügiloa alusel tõi Läänemerest välja 500,952 tonni lämmastikku ja 89,753 tonni fosforit.

Põllumajandus- ja Toiduameti andmete kohaselt (PTA, 2021) moodustas Eesti kutseline räime rannapüük ilma Liivi laheta (ICES alampiirkonnad 28.2-32) 2020. aastal 1304,113 tonni. Selle kaudu eemaldati Läänemerest 31,298 tonni lämmastikku ja 5,606 tonni fosforit (Tabel 2). Liivi lahe räime (ICES alampiirkond 28.1) kutselise rannapüügi saak oli 2020. aastal 6430,853 tonni ja see eemaldas Liivi lahest 154,340 tonni lämmastikku ja 27,651 tonni fosforit (Tabel 3).

Kokku oli Eesti kutselise rannapüügi räime saak 2020. aastal 7734,966 tonni. Kui liita kokku Eesti kalurite 2020. aasta räime traalpüügi saak Läänemerel ICES alampiirkondades 27-32 (20873,006 tonni) ja räime kutselise rannapüügi saak (7734,966 tonni), moodustas Eesti kalurite räimepüügi kogusaak 2020. aastal 28607,972 tonni ning sellega eemaldati Läänemerest kokku 686,590 tonni lämmastikku ja 123,010 tonni fosforit.

Tabel 2. Eesti kutseline räime rannapüük ilma Liivi laheta (ICES alampiirkonnad 28.2-32) 2020. aastal ja selle kaudu Läänemerest eemaldatud lämmastiku ja fosfori kogused (PTA, 2021).

Maakond	saak (tonni)	lämmastik (tonni)	fosfor (tonni)
Harju	21,832	0,524	0,094
Hiiu	7,726	0,185	0,033
Ida-Viru	1197,549	28,741	5,149
Lääne	69,248	1,662	0,297
Lääne-Viru	2,58	0,062	0,011
Saare	5,178	0,124	0,022
<b>kokku</b>	<b>1304,113</b>	<b>31,298</b>	<b>5,606</b>

Tabel 3. Eesti kutseline räime rannapüük Liivi lahes (ICES alampiirkond 28.1) 2020 aastal ja selle kaudu Läänemerest eemaldatud lämmastiku ja fosfori kogused (PTA, 2021).

Maakond	saak (tonni)	lämmastik (tonni)	fosfor (tonni)
Pärnu MK kokku	6358,295	152,599	27,341
Saare	72,558	1,741	0,312
<b>kokku</b>	<b>6430,853</b>	<b>154,34</b>	<b>27,653</b>

## Räime ja kilu traalpüügi ruumiline ja sesoonne varieeruvus

Räime ja kilu varu suurus ja paiknemine võivad teatud piirides muutuda, aga piirkondade kalarikkus sõltub enamasti nendes valitsevatest looduslikest tingimustest, mistõttu väljapüügi osakaal erinevate merealade lõikes väga palju ei muutu.

Töös on lähtunud eeldusest, et Eesti avamere traalpüük toimub piisava tihedusega kalakoondistel, mis leitakse kalalaevadel asuvate vastavate kajaloodide ja sonarite abil. Traaltunni kohta tulev kala kogusaak kalaliikide kaupa iseloomustab veesambas oleva kalakoondise summaarset tihedust ning peegeldab selgelt meie avamere traalpüügi produktiivsemaid merealasid. Need alad paiknevad rannikunõlva ja süvavete tõusude piirkonnas, kus leidub ohtralt avamere pelaagiliste kalade toiduobjekti, zooplanktonit.

Eesti avamere traalpüügi igakuine summaarne kalasaak (kg) traaltunni kohta peegeldab selgelt ka meie traalpüügi aastaajalist dünaamikat. Traalpüügi 2020. aasta ajalis-ruumiline varieeruvus Eesti merealal on toodud lisas 1. 2020. aastal toimus traalpüük peamiselt kahel perioodil, jaanuarist maini ja septembrist detsembrini. Samas Liivi lahes toimus traalpüük peamiselt jaanuaris-aprillis ja septembris-detsembris. Suvised soojemad õhu- ja merevee temperatuurid ning Läänemere kilu ja räime kõrge toitumisaktiivsus mõjutavad negatiivselt suvise kalasaagi kvaliteedi näitajaid. Sellega on seletatav traalpüügi suhteliselt madal aktiivsus juunis ja augustis. Juulis 2020. aastal Eesti merealal traalpüüki ei toimunud.

## Kutselise kalapüügi osatähtsus kalasööda tootmisprotsessis

Paldiski kalakomponentide tehase põhitoodang on kalajahu ja kalaõli. Tehas kuulub Eesti Kalatootjate Keskühistule (EKK, 2021), mille omanikeks on omakorda 3 kalurite ühistut. Tooraineks on väheväärtuslik kilu ja räim, samuti kilu ja räime töötlemisel inimtoiduks tekkivad kõrvalsaadused.

*Tehases kasutatakse toorainena hinnanguliselt 50 % Eesti räime ja kilu püügi mahust. Tehase aastatoodang on keskmiselt 6000 tonni jahu ja 2500 tonni õli, milleks kulub 28146 tonni räime ja kilu toorkaalus (so. toote kaal moodustab umbes 30,2 % tooraine kaalust). Tootmisprotsessi käigus käideldakse 675,5 tonni lämmastikku ja 128,8 tonni fosforit (Tabel 4). Tehas kasutab ära kogu tooraines sisalduva materjali, ehk siis kõrvalsaaduseid ei teki. Paldiski kalakomponentide tehase keskmised tooraine ja toodete lämmastiku ja fosfori sisaldused on toodud Tabelis 5. Tabelites 4 ja 5 toodud andmeid kasutatakse järgmise peatükis, et hinnata millisel määral on võimalik kalakasvatuse emissiooni vähendada, kui kasutame söödas kohalikku kala.*

Tabel 4. Paldiski kalakomponentide tehases aastas käideldud kala hulk, toodetud kalajahu ja -õli mahud ning nendes sisalduvad lämmastiku ja fosfori kogused tonnides.

Tooraine/toode	kogus (tonni)	N sisaldus (tonni)	P sisaldus (tonni)
kala	28146	675,5	128,8
kalajahu	6000	675,5	128,8
kalaõli	2500	0,00	0,02

Tabel 5. Lämmastiku ja fosfori keskmine protsentuaalne sisaldus Paldiski kalakomponentide tehase tooraines (räim, kilu) ja toodetes 2020–2021. aastal.

Tooraine/toode	N (%)	P (%)
kala	2,4	0,458
kalajahu	11,3	2,146
kalaõli	0,0	0,001

Tootmisprotsessi käigus kala keedetakse ning sellest keedusest pressitakse välja vedelik, mis edasi liigub aurutustornidesse. Aurutustornides kuivaine sh. rasv kontsentreeritakse ning segatakse kalajahusse. 2021. aasta prognoositav tooraine hulk on veidi väiksem, hinnanguliselt 24000 tonni kilu ja räime toorkaalus. Tehas suudab käidelda umbes 10 tonni kala tunnis ning maksimumvõimsuse juures 15 tonni kala tunnis.

Suures plaanis on tehase eesmärk tagada ühistu liikmetele võimalus oma väheväärtusliku kalasaagi realiseerimiseks, andes neile võimaluse endil keskenduda inimtoiduks sobiva kala töötlemisele. Tehas tasakaalustab sisuliselt turgu – kui toidukala turg on hea, siis jõuab tehasesse vähem toorainet. Kalurite ühistute põhitegevus algab kalapüügist. Omanikud ehk siis erinevate ühistute liikmed on ka Paldiski Kalajahutehasele peamised kalatarnijad.

Paldiski Kalajahutehase põhitoodanguks on kõrge kvaliteediga kalajahu (proteiinisisaldus ca 69–72 %) ja õli. 99 % tehase toodangust turustatakse väljaspoole Eestit. Toodangu turustamisel on peamised sihtriigid Hispaania, Itaalia, Prantsusmaa, Kreeka, Taani, Ukraina. Väiksemaid koguseid on tarnitud veel mitmesse riiki. Paldiski Kalajahutehas on sisenemas oma toodanguga ka USA turule. Strateegiliseks eesmärgiks on usaldusväärse kõrge toodangukvaliteediga tehase maine kaudu jõuda järjest lähemale oma toodete lõpptarbijale.

## Hüpoteetiline kalakasvatus

Optimaalne kasvatustehnika peab vastama kalade bioloogilistele vajadustele ning tagama tasakaalustatud toitumise, hea tervise ja elupaiga, kuna kõik need aspektid on omavahel tihedalt seotud ning mõjutavad kalade saagikust kasvatustes. Sõltumata sellest, kas kalu kasvatatakse akvaariumides, tiikides, järvedes või meres, peavad söötmine, majandamine ja kasvatuseadmed koostoimel tagama kalade hea seisundi.

Intensiivses vesiviljeluses kasutatavat sööta toodetakse paljudest erinevatest koostisainetest, millel on erinevad toiteväärtuslikud ja füüsikalised omadused. Traditsiooniliselt on kalasööt põhinenud loodusest püütud kaladest saadud kalajahul ja kalaõlil. Viimasel ajal on pööratud suurt tähelepanu alternatiivsetest toorainetest valmistatud söötade loomisele, mis on keskkonnasõbralikumad ja eetiliselt jätkusuutlikumad. Tootmist saab muuta säästvamaks, kui suurendada söödas primaarproduktentide (maismaataimed ja vetikad) osakaalu. Sööda arendamisel püütakse saavutada ka taaskasutatud toorainel põhinevate söödakomponentide ulatuslikumat kasutamist, et anda lisaväärtust jääkproduktidele, mis praegu suures osas lähevad raisku. Kasutada saab nii kalanduse ja töötleva tööstuse kui ka muude tööstusharude kõrvalsaadusi. Oluline osa on siin ka kohalikul toorainel so. väljapüütud kaladel, merekarpidel ja suurvetikatel põhineva kalasööda kasutamisel. Selliste mereorganismide väljapüügil eemaldame merekeskkonnast toitaineid ning saame kasutada neid samu toitaineid merekeskkonnas kala tootmiseks. Sööda koostisosad võivad mõjutada sööda kvaliteeti mitmel viisil, muutes sööda toiteväärtust (nt aminohappelist koostist, rasvhapete sisaldust, sööda kasutegurit jne) ja selle füüsikalisi omadusi (nt stabiilsust vees, uppumisvõimet jne). Mõlemad tegurid mõjutavad söödast tulenevat mõju keskkonnale (Eriksson et al., 2017).

Vee temperatuur on üks olulisemaid kalade isu mõjutavaid tegureid. Samas mõjutavad isu ka muud tegurid, nagu hapnikusisaldus, soolsus, tuul, hoovused ja päikesekiirgus. Üldjuhul kasvavad kalad oma elu alguses kiiremini ning vanuse suurenedes kasvutempo väheneb. Kasvukiiruses võib esineda suuri isenditevahelisi erinevusi, mis on peamiselt tingitud geneetilistest erinevustest. Teine oluline tegur on loomade tervis, haiged või stressis olevad kalad kaotavad oma isu. Andmemudelite ja/või kasvutabelite täpsus ei ole kõikide kalaliikide puhul võrdselt head. On olemas efektiivsed toitmissüsteemid lõhe ja vikerforelli jaoks, samas kui söötmistabelid teiste liikide kohta on vähem standardiseeritud. Söötmisega peab alati kaasnema kalade käitumise jälgimine, et kontrollida nende heaolu ja söögiisu. Söödatarbimist registreeritakse, et oleks võimalik jälgida kasvu tõhusust, mida nimetatakse söödakoeffitsiendiks või sööda muundamise suhtarvuks (FCR). Selle parameetri põhjal on võimalik arvutada ka toitainete assimileerimist ning vabanemist merekeskkonda.

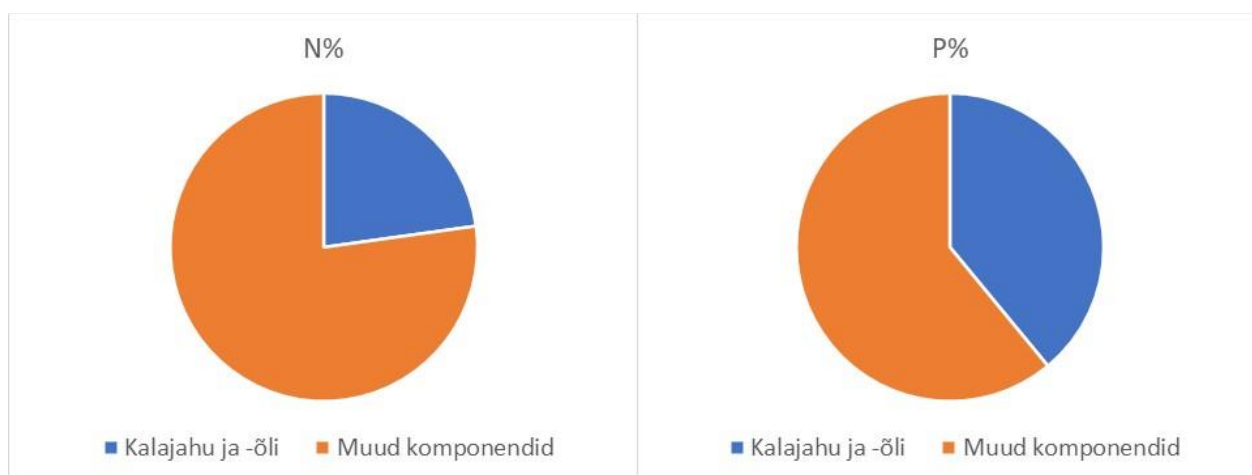
Veeorganismide kasvatamine võib avaldada nii otsest kui ka kaudset mõju keskkonnale. Toitainete, kemikaalide ja organismide lekkimise näol on tegemist kalakasvatuse otsese mõjuga, sumbakasvatuse kaudne mõju tuleneb transpordist, energiatarbimisest ja loodusvarade (tooraine)

kasutamisest. Avatud vesiviljelussüsteemides paiknevad kalad sumpades. Sumbad võimaldavad vee vaba liikumist, kuid vee liikumise tõttu pääsevad sumpadest ümbritsevasse keskkonda ka toitained, söödajäägid ja väljaheidet (Holmer et al., 2010). Traditsiooniline avatud sumbakasvatus on kulutõhus ja testitud meetod ning sellise lahenduse puhul ei ole vaja kasutada nii palju seadmeid kui teiste kasvatusmeetodite puhul. Avatud sumbad on aga otseses kokkupuutes ümbritseva ökosüsteemiga, mistõttu on keskkonnakahjustuse oht suurem kui kinniste tootmissüsteemide puhul. Kasvandusest vabanevad toitained pärinevad kalade väljaheidetest ja söödajääkidest, mis võivad esineda lahustunud kujul või siis settida merepõhja. Samuti eritavad kalad merekeskkonda lämmastikku ja fosforit lõpuste ja uriini kaudu. Toitainete heitkoguseid võib arvutada erinevatel viisidel, kuid täpsema tulemuse saame vaid juhul, kui kasutame mudeleid, mis prognoosivad keskkonnatingimuste ja toitmise varieeruvusest tingitud kalade ainevahetuse intensiivsust ning ainevahetuse kaudu ka toitainete emissiooni merekeskkonda.

Traditsiooniliselt on kalajahu ja kalaõli olnud kalasööda kõige tähtsam koostisosa, kuid juba mitu aastat on edukalt katsetatud ka muu toorainega, mis on nii loomset kui ka taimset päritolu. Sõltuvalt sööda eesmärgist koosneb selline kalasööt 10–20 % kalaõlist ja 12–20 % kalajahust. Käesoleva töö analüüsis lähtusime eeldusest, et avamere kalakasvatajad kasutavad keskkonnasõbralikku sööta, mille puhul kalakasvatusest lähtuv toitainete emissioon on viidud miinimumini.

*Oma arvutustes kasutasime söötadena BioMar tooteid Blue Impact 9024 6mm ja Blue Impact 9024 8mm. Sellises söödas oleva lämmastiku ja fosfori keskmine sisaldus (kuivainest) on vastavalt meie stsenaariumile 5.87 % ja 0.69 %. Kogu kasutatud söödast moodustab 6 mm sööt 30% ning 8 mm sööt 70%. Väiksematele kaladele antakse 6 mm pelletteid ning suurematele kaladele 8 mm pelletteid. Kuna 8 mm söödas sisaldub vähem fosforit ja lämmastikku, siis kala pikkuse suurenemisel toitainete emissioonid ka vähenevad.*

*Blue Impact 9024 söötades sisaldub keskmiselt 12 % kalajahu ja 18 % kalaõli. Lähtudes Tabelis 5 toodud kalajahu ja -õli lämmastiku ja fosfori sisaldusest, moodustab kalajahu ja -õli kalasööda lämmastiku üldsisaldusest 22,9 % ja fosfori üldsisaldusest 39 %. Juhul, kui kasutame kalasöödas kohaliku kala, võime bilansiarvutuslikult seda fraktsiooni (22,9 % N ja 39 % P) emissioonide määratlemisel mitte arvestada (Joonis 2).*



Joonis 2. Kalajahu ja -õli protsentuaalne osakaal BioMar söötade lämmastiku ja fosfori sisaldusest. Kui kasutatud kalajahu ja -õli pärineb kohalikest kalast, ei ole bilansiarvutuslikult selle fraktsiooni näol tegemist lämmastiku ja fosfori emissiooniga looduskeskkonda.

Sööta kulub sellises kasvatuses ca 1,1 tonni iga toodetud kalatonna kohta (FCR = 1,1). Võrdluseks kasutatakse loomakasvatuses iga kilo lõpptoodangu kohta 6–8 kilogrammi sööta.

Stsenaariumi kirjeldamisel võtsime aluseks Tagalahes paikneva sumpkalakasvatuse, kuna reaalse farmi olemasolu võimaldab toitainevogude modelleerimistulemusi ning keskkonnamõjude ulatust ka väliandmete kogumise kaudu valideerida. Oma analüüsidest lähtusime eeldusest, et arendatavas kalakasvatuses kasvatatakse ühel sesoonil kokku 70000 kala, mis lisatakse sumpadesse maikuu ning kelle algpikkus on 40 cm ja algkaal on 1 kg. Kasvuperiood on 180 päeva ning kasvuperioodi lõpus on kalad 61 cm pikkused ja nende kaal on 3,78 kg. Seega toodetakse sumpades ühe kasvuperioodi jooksul 265 tonni kala (kalade juurdekasv 195 tonni). Keskkonnanähtude osas lähtusime Tagalaha merevee temperatuuri, soolsuse, hoovuste ja taimse hõljumi tüüpilisest sesoonselt käigust. Tegemist on saarte lääneosale iseloomuliku rannikumere ökosüsteemiga.

## DEB (dünaamilise energiabilansi) mudelite loomine, et hinnata toitainete vooge kala- ja karbikasvatustes

Kehtivate meetodikate kohaselt hinnatakse inimtekkelisi reostuskoormusi meres haju- või punktallikatest vette juhivate koormustena. Tegemist on teoreetiliste arvutuskäikudega, kuna sellise meetodika alusel pole võimalik hinnata, kui suur osa inimtekkelisest toitainete koormusest jääb merekeskkonda (ei eemaldu näiteks denitrifikatsiooni teel) ja leiab kasutuse veesamba ainerings (ei akumulereeru merepõhja elustikus ja setetes). Nii ei ole võimalik ka kehtivate meetodikate alusel näidata toitainete tegelikku liikumist kalakasvatustes so. milline osa söödast tarbitakse kalade poolt, kui suur osa söödas sisalduvast lämmastikust ja fosforist assimileeritakse kalade kasvuprotsessis, milline hulk toitainetest eraldub veesambasse lahustunud kujul, milline osa settib merepõhja ja on organismidele kättesaadav ning milline osa settinud ainest ei ole bioloogiliselt omastatav so. väljub aineringest. Isegi kui osades aspektides on selliseid hinnanguid meie kalakasvatuste kohta antud, pärinevad need arvutused teistest piirkondadest ning on teoreetilised so. lähtuvad verifitseerimata andmetest.

Kalakasvatuste tegelikku keskkonnamõju määratlemisel, on vaja eristada toitainete liikumist veesambas ja setetes. Veesambasse vabanenud toitained võivad põhjustada eutrofeerumisilminguid (vee õitsenguid). Madalmeres setetes ja põhjaelustikku akumulereunud toitainete keskkondlik mõju ei ole aga märkimisväärne, juhul kui sedimentatsiooniprotsessid ei ületa looduslikku kandevõimet. Suurselgrootute heale olukorrale Eesti rannikumeres viitavad 2020. aasta seire tulemused, mille kohaselt on põhjaloomastiku liikide arv ja biomass viimase paari aasta jooksul suurenenud enamikes püsi- ja ülevaateseire veekogumites (Tartu Ülikool, 2021b). Piirkondlikku keskkonna kandevõimet on võimalik seiretööde käigus realselt kaardistada, hinnates toitainete sisaldust ja suurselgrootute koosluste iseloomu kalafarmi all ning foonialal. Looduskeskkonda mitte kahjustava kalakasvatuse lahenduse korral farmipiirkonna ja fooniala suurselgrootute kooslused ei ole statistiliselt erinevad.

Selleks, et modelleerida toitainete liikumist kalakasvatustes, tuleb kirjeldada põhjuslikke seoseid keskkonnanähtude verieeruvuse, sööda iseloomu ja kalade ainevahetuse vahel. Selliseid põhjustajajärg seoseid on käesoleval ajal võimalik detailselt modelleerida vaid dünaamilise energiabilansi (DEB) teooria abil. DEB teooria näol on tegemist universaalse lähenemisega, mis võimaldab meetodiliselt kaardistada ja jälgida toitainete liikumist ökosüsteemis. Teooria lähtub termodünaamilistest energia- ja massibilansi põhimõtetest, mida on kinnitanud kõik viimaste aastakümnete jooksul läbi viidud teadusuuringud. Paljud teadusrühmad on juba edukalt kasutanud DEB meetodikat, et prognoosida erinevate vesiviljelusliikide (sh. suurvetikate, -selgrootute ja kalade) kasvu ning hinnata selliste farmide mõju ümbritseva keskkonna toitainete dünaamikale (Filgueira et al., 2014, van der Meer et al., 2014, Monaco & McQuaid, 2018, Stavrakidis-Zachou et al., 2018). Kuna meetod kirjeldab keskkonna varieeruvuse ja liikide ainevahetuse vahelisi põhjuslikke seoseid ning kaardistab täpselt toitainete tarbimist, assimileerimist ja vabanemist keskkonda, siis saadud modelleerimistulemused, juhul kui need on valideeritud kohalike andmetega, ei erine reaalselt reostuskoormustest. Kehtivate meetodikate alusel hinnatakse

reostuskoormusi pelgalt sööda hulga ja selles sisalduva toitainete alusel ning sellisena on need pigem käsitletavad teoreetiliste arvutustena, kuna selliselt tehtud arvutused ei võimalda kirjeldada toitainete tegelikku liikumist farmis ja merekeskkonnas.

Dünaamilise energiabilansi (DEB) teooria on formaalne ainevahetuse teooria, mis pakub ühtset kvantitatiivset raamistikku kõikide elusorganismide ainevahetuse aspektide (energia- ja massibilansi) dünaamiliseks kirjeldamiseks indiviidi tasandil, tuginedes üldiselt aktsepteeritud ainete energiatarbimise, ladustamise ja kasutamise eeldustele (Kooijman, 2000). DEB-teooria järgib rangeid termodünaamilisi põhimõtteid, lähtub universaalselt täheldatud muustritest, ei ole liigispetsiifiline ja seob bioloogilise organisatsiooni eri tasandeid (rakud, organismid ja populatsioonid). DEB-teorial põhinevaid mudeleid on edukalt rakendatud enam kui 1000 liigi puhul ning need rakendused hõlmavad looduskaitse, vesiviljeluse, üldise ökoloogia ja ökotoksikoloogia erinevaid aspekte (van der Meer et al., 2014).

Teooria eelduste selgus võimaldab modelleerimisel saada täpseid ja usaldusväärseid ennustusi ning teooriat on võimalik kergelt kontrollida ja/või mudeli parameetreid valideerida välimõõtmiste ja eksperimentaalsete uuringute abil. Teooria seletab paljusid üldisi üldbioloogilisi tähelepanekuid ning mitmed populaarsed empiirilised mudelid on DEB-mudeli erijuhtumid või väga lähedased numbrilised lähendused sellistele mudelitele (Kooijman, 1986, 1988).

Kõik DEB-mudelid jälgivad üksiku organismi energiabilansi kogu elutsükli jooksul. DEB-teorial põhineva mudeli peamine eelis enamike teiste mudelite ees on energia assimilatsiooni ja kasutamise (reservide dünaamika) kirjeldamine, võttes arvesse organismi arenguseärasusi. DEB-teooria määratleb reservid struktuurist eraldi: need on kaks seisundimuutajat, mis määravad indiviidi suuruse ja paljunemispotentsiaali. Küpsus (samuti mudeli seisundimuutuja) jälgib, kui palju energiat on investeeritud küpsemisele ja määrab seega organismi arengudünaamika ning üleminekud ühelt eluetapilt teisele. Seisundimuutujate dünaamika esitatakse tavaliste diferentsiaalvõrranditega, mis hõlmavad peamisi energia tarbimise ja kasutamise protsesse: assimilatsioon, mobilisatsioon, säilitamine, kasv, küpsemine ja paljunemine.

Toit muundatakse reserviks, mis on aluseks arengule ja kõikidele ainevahetusprotsessidele. Söömise kiirus on proportsionaalne pindalaga, toidu käitlemiseaeg ja toidu muundamise tõhusus toidust reserviks ei sõltu toidu tihedusest. Etappide üleminekud toimuvad, kui kumulatiivne investeering küpsemisele ületab etteantud künnisväärtust. DEB-mudelites käsitletakse tavaliselt järgmisi elufaase: embrüo, noorloomad ja täiskasvanud loomad. Sigimiseks eraldatud reserv koguneb kõigepealt puhvrise. Reeglid puhvri muutmiseks sugurakkudeks on liigispetsiifilised (nt. kudumine võib toimuda üks kord hooaja jooksul). Mudeli parameetrid on indiviidispetsiifilised, kuid sama liigi isendite sarnasused võimaldavad defineerida liigispetsiifilisi parameetrite hinnanguid. DEB-parameetrid on võimalik hinnata väga eri tüüpi alusandmete põhjal. Hinnangulised parameetrid on kogutud veebipõhisesse raamatukokku, mida nimetatakse Add-my-pet projektiks ([http://www.bio.vu.nl/thb/deb/deblab/add\\_my\\_pet/index.html](http://www.bio.vu.nl/thb/deb/deblab/add_my_pet/index.html)). Tegemist on globaalselt hallatava andmekoguga, mida reaajas täiendatakse ja verifitseeritakse parimate valdkonna spetsialistide poolt. DEB-mudelite abstraktsete ja mõõdetud parameetrite sidumine toimub lihtsate matemaatiliste operatsioonide abil, mis hõlmavad abiparameetreid. Need on samuti DEB-teorias määratletud ja sisalduvad DEB-tool tööriistas. Matemaatilised operatsioonid hõlmavad ka üleminekuid energia-aja ja massi-aja konteksti vahel (Kooijman, 2000).

Käesolevas uuringus välja töötatud DEB mudel põhineb Kooijmani (2010) koostatud DEB-teorial. DEB teooria on rakendatav erinevate liikide uurimisel liigispetsiifiliste DEB parameetrite kaudu (Kooijman, 2010; Marques et al., 2018). DEB kirjeldab indiviidi energiadünaamikat nelja seisundimuutuja alusel: energiavaru, E (J), keha pikkus, L (cm), paljunemispuhver, ER (J) ja kumulatiivne investeering arengusse, mida DEB-terminoloogias nimetatakse küpsuseks, EH (J).

Kooijmani (2010) sõnul sõltuvad indiviidide ainevahetus ja energiavood toidu kättesaadavusest ja kehatemperatuurist. Toidu kättesaadavus on seotud energia assimilatsiooniga ( $\dot{p}_A$ ) üldreservis. Reservi kasutatakse energia mobiliseerimiseks ( $\dot{p}_C$ ). Osa ( $\kappa$ ) mobiliseeritud energiast kasutatakse somaatiliseks kasvuks ( $\dot{p}_G$ ) ja organismi funktsionaalseks säilitamiseks ( $\dot{p}_S$ ), ülejäänud energia ( $1 - \kappa$ ) suunatakse reproduktiivse süsteemi arenguks ( $E_H < E_H^p$ ) ja paljunemiseks ( $E_H \geq E_H^p$ ), ( $\dot{p}_R$ ). Arenguga kaasneb hoolduskulu, mida nimetatakse küpsemise säilitamiseks ( $\dot{p}_R$ ).

Iga konkreetse hetke seisundimuutjad arvutati käesolevas töös seisundimuutujate  $de$ ,  $dL$ ,  $dE_R$  and  $dE_H$  muutuste diferentsiaalvõrrandite lahendamise teel. Nii maksimaalne pikkus,  $L_m$  kui ka energiajuhtivus  $\dot{v}$  kohandati huvipakkuvale eluetapile kasutades kiirendustegurit  $S_M$ . Vikerforelli DEB mudeli puhul on  $S_M = 1$  ja söödava rannakarbi puhul (võimalik kompenseerimismeede vikerforelli keskondlike mõjude leevendamisel) on  $S_M = \min\left(\frac{L_j}{L_b}, \frac{L}{L_b}\right)$ .

Pikkuse  $dL$  muutumine on seotud  $\dot{r}$  ehk spetsiifilise mahu kasvukiirusega ( $J \cdot d^{-1}$ ) järgnevate seoste kaudu:

$$g = \frac{[Eg]}{\kappa [Em]}, \text{ kus } [E_m] = \frac{[p_{Am}]}{\dot{v}}$$

$$\dot{r} = \frac{\dot{v} \left(\frac{e}{L} - \frac{1}{L_m}\right)}{(e+g)}, \text{ kus } L_m = \frac{\dot{v}}{g \cdot \frac{p_M}{E_G}}$$

$$dL = L \cdot \frac{\dot{r}}{3}$$

Muutused skaleeritud reservitiheduses  $e$  arvutati allpooltoodud diferentsiaalvõrrandi kaudu:

$$de = (f - e) \cdot \frac{\dot{v}}{L}$$

ja muutused paljunemispuhvris ER ja küpsusastmes EH kirjeldati vastavalt võrranditele:

$$\begin{aligned} dE_H &= (1 - \kappa) \cdot p_c - E_H \cdot k_J & \text{ja} & & dE_r &= 0 & \text{kui} & & E_H &=< E_{Hp} \\ dE_H &= 0 & \text{ja} & & dE_r &= (1 - \kappa) \cdot p_c - E_{Hp} \cdot k_J & \text{kui} & & E_H &> E_{Hp}, \end{aligned}$$

kus energia mobiliseerimine reservist  $\dot{p}_C$  arvutati järgnevalt:

$$p_c = \left(\frac{\dot{v}}{L} - \dot{r}\right) \cdot e \cdot [E_m] \cdot L^3$$

Ainevahetuse kohandamine temperatuuriga toimub vastavalt Bourlès et al. (2009) meetodikale, korrutades  $k_J$  Arrheniuse võrrandile vastava temperatuuri parandusteguriga ja  $\dot{v}$  laiendatud Arrheniuse võrrandile vastava temperatuuri parandusega. Seda põhjendatakse sellega, et vikerforelli kasv väheneb, kui temperatuur tõuseb üle 20 °C, samas kui ülalpidamiskulud suurenevad kõrgematel temperatuuridel suurema stressitaseme tõttu. Söödava rannakarbi puhul kasutatakse nii kasvu kui ka hoolduse puhul standardset Arrheniuse võrrandit, sest temperatuur ei ületa optimaalseid piire.

$$T_{corr} = e^{\left\{\frac{T_A - T_A}{T_{ref} - T}\right\}} \quad \text{Lihtne Arrheniuse võrrand}$$

$$T_{corr} = e^{\left\{\frac{T_A - T_A}{T_{ref} - T}\right\}} \cdot \left(1 + e^{\left\{\frac{T_{AL} - T_{AL}}{T - T_L}\right\}} + e^{\left\{\frac{T_{AH} - T_{AH}}{T - T}\right\}}\right) \quad \text{Laiendatud Arrheniuse võrrand}$$

Toidu kättesaadavus  $f$  mõjutab energia-assimilatsiooni ja seega ka varude dünaamikat.  $f$  näol on tegemist mudeli parameetriga, mis defineerib ära selle, kui palju antakse kaladele sööta võrrelduna

nende metaboolse vajadusega antud keskkonningimuste juures. Matemaatiline kordaja varieerub 0 ja 1 vahel, kus kordaja väärtus 1 viitab optimaalsetele söötmingimustele ning väärtus 0 viitab olukorrale, kus söötmist ei toimu. Vikerforelli DEB mudeli puhul hoiti söötmismäär konstantsena suboptimaalsel tasemel 0,7. Söötmise optimaalsel tasemel ( $f = 1$ ) suurendaks küll kasvukiirust, kuid suurendaks oluliselt ka tootmiskulusid. Seetõttu kalduvad kalakasvatatajad söötma kalu tasemetel, mis vähendavad jooksvaid kulusid. Mudelis kasutatud söötmismäär kalibreeriti kalakasvandustest saadud reaalsete kasvuandmete põhjal.

Söödava rannakarbi söömise ja assimilatsiooni määrad sõltuvad toidukogusest, mille markerina kasutati klorofüll a väärtust. Madal soolsus muudab oluliselt söödava rannakarbi ainevahetust ja mõjutab toitumist (Maar et al., 2015; Kotta et al., 2015; Lavaud et al., 2017; Lavaud et al., 2021). Karpide soolsusest tingitud toitumiskiirus kalibreeriti uurimisrühma poolt Läänemeres varem läbi viidud eksperimentaaltööde alusel (Kotta et al., 2020).

DEB mudeli seisundimuutujad on abstraktsed ja neid ei saa otseselt mõõta mudeli parameetriseerimiseks või konkreetsete metaboolsete tunnuste simuleerimiseks. Suhted DEB seisundimuutujate ja simulatsiooniväljundite vahel, nagu ajalised muutused kalade ja karpide pikkuses, kudede märg- ja kuivkaalus, kudede ja väljaheidete elementaarses koostises, hingamises ja toitainete eritumises saadi Tagalahe kala- ja karbikasvatustes tehtud välimõõtmiste kaudu.

Vikerforelli DEB mudeli parameetrid on avaldatud Add My Pet andmebaasis (Kooijman et al., 2017). Käesoleva töö käigus ajakohastati andmebaasis suurusfaktor  $z$  ning vikerforelli reaktsioon temperatuuri muutustele  $T_A, T_H, T_{AH}, T_L, T_{AL}$ . Selleks kasutati varasemalt kogutud kasvuandmeid kuuest erinevast Läänemere forellifarmist (Chen et al., 2015) sh. ka Tagalahe farmist.

Söödava rannakarbi DEB mudeli parameetrid on samuti varasemalt avaldatud Add My Pet andmebaasis (Roberts & Kooijman, 2019). Avaldatud parameetritega tehtavat mudeliprognooosi võrreldi Eesti rannikumerest kogutud andmetega ja vajadusel kalibreeriti asjaomased parameetrid uuesti. Suurendusfaktori  $z$ , otsinguraadiuse  $F_m$ , seedimise tõhususe  $\kappa_X$  ja eritumise tõhususe  $\kappa_P$  kalibreerimiseks kasutati Eesti rannikumeres eksperimentaalselt mõõdetud karpide kasvu, filtreerimise tõhususe ja biodepositiooni andmeid. Küllastuskonstanti  $K_X$  ja soolsuse reaktsiooniparameetreid ( $S_L, S_H, S_{ref}$ ) optimeeriti kasutades kogu Läänemere akvatooriumi hõlmavat suurt eksperimentaalset andmekogu (Kotta et al., 2020).

Mudeli parameetrite kalibreerimiseks kasutati Marques et al. (2018) poolt loodud DEBtool tarkvarapaketti vastavalt DEBwiki koduleheküljel kirjeldatud meetoodikale ([http://www.debtheory.org/wiki/index.php?title=Main\\_Page](http://www.debtheory.org/wiki/index.php?title=Main_Page)). DEBtoolis sisalduv rutiin (Marques et al., 2018) võimaldab parameetrite samaaegset hindamist empiiriliste so. välitöödel kogutud andmete põhjal. Parameetrite optimeerimisel võrreldakse mudeliprognooosi empiirilise andmestikuga eesmärgiga minimeerida kaalutud ruutjääke (Lika et al., 2011). Mudeli keskmist suhtelist viga *MRE* hinnati järgnevalt:

$$MRE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \beta_{ij} \left( \frac{Y_{ij} - \hat{Y}_{ij}}{Y_{ij}} \right)^2}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \beta_{ij}}},$$

kus  $n$  on andmekogumite arv ja iga andmeväärtus loetakse üheks andmekogumiks.  $m_i$  on andmepunktide arv andmekogumites.  $Y_{ij}$  ja  $\hat{Y}_{ij}$  on andmekogumi  $J$  andmepunkti vaatlused ja mudeli prognoosid.  $\beta_{ij}$  on  $i$  andmekogumi  $J$  andmepunkti kaalukoefitsient. Kuigi *MRE* määratleb kvantitatiivselt vastavuse esitatud andmete ja mudeli hinnangute vahel, on selle statistiku tähtsus peamiselt parameetrite väärtuste ja hinnangute realistlikkuse hindamisel. Suuremahulised

erinevused parameetrites võivad sageli põhjustada vaid pisikesi erinevusi sobivuse headuses (Lika et al., 2011).

## Merepõhja setete toitainete sisalduse ja suurselgrootute koosluste kaardistamine Tagalahe kalakasvatuse piirkonnas

Selleks, et kaardistada aruandes kirjeldatud stsenaariumi keskkonnamõju meresetete toitainete sisaldusele ja merepõhja suurselgrootute kooslustele kogusime 2021. aastal Tagalahest bentoseproove, et määratleda kalakasvatusest merepõhja settinud toitainete määra ning lisandunud toitainete mõju põhjakooslustele. Andmed ja proovid koguti vastavalt riiklikus rannikumere seires kasutatavale meetodikale järgides HELCOM seirejuhendit (HELCOM Monitoring Manual; <http://www.helcom.fi/action-areas/monitoring-and-assessment/monitoring-manual/>) ja keskkonnaministri 01.10.2019 (redaktsioon jõustunud 01.07.2020) määrust nr 35 „Vesikonna veeseireprogrammi sisu, veeseireprogrammi koostamise põhimõtted, meetodid ja meetodika ning rakendamise nõuded“.

Proovikogumine toimus ühe kalakasvatuse tsükli jooksul kevadest sügiseni. Iga proovikogumise alguses kaardistas sukelduja visuaalselt olemasoleva olukorra kalasumba all ning ümbritsevatel aladel. Sukelduja hindas merepõhja seisundit ja kahjustatud ala ulatust ning tulemused jäädvustati digitaalse allveekaamera abil. Põhjasetete ja -elustiku proove koguti kalakasvatusest mõjutatud merealadelt (merepõhjas selgelt eristuv suurema orgaanilise aine sisaldusega kiht), üleminekuvaldel (orgaanilise aine kiht esineb merepõhjal laiguti) ja foonialalt (visuaalselt ei ole meresetel näha kalakasvatusest lähtuvat orgaanilist ainet so. ei esine kõrvalekaldeid Tagalahele omasest põhjaelupaikadest).

Merepõhja setteproovid koguti sukeldudes, kasutades standardmõõdus proovikogumisvahendit (proovitoru diameeter oli 5,0 cm). Proovid koguti kolmes korduses. Välitöödel pakiti proovid 200 ml viaalidesse, varustati etiketiga ning säilitati  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  juures kuni nende laboratoorse analüüsini. Toitainete analüüside aluseks on vastavad rahvusvahelised EVS-EN ISO meetodikad. Tartu Ülikooli Eesti Mereinstituudi merebioloogia osakonna labor on Eesti Akrediteerimiskeskuse poolt akrediteeritud ning akrediteerimisulatus hõlmab kõiki kasutatud analüüsimetoodikaid (akrediteering nr L179).

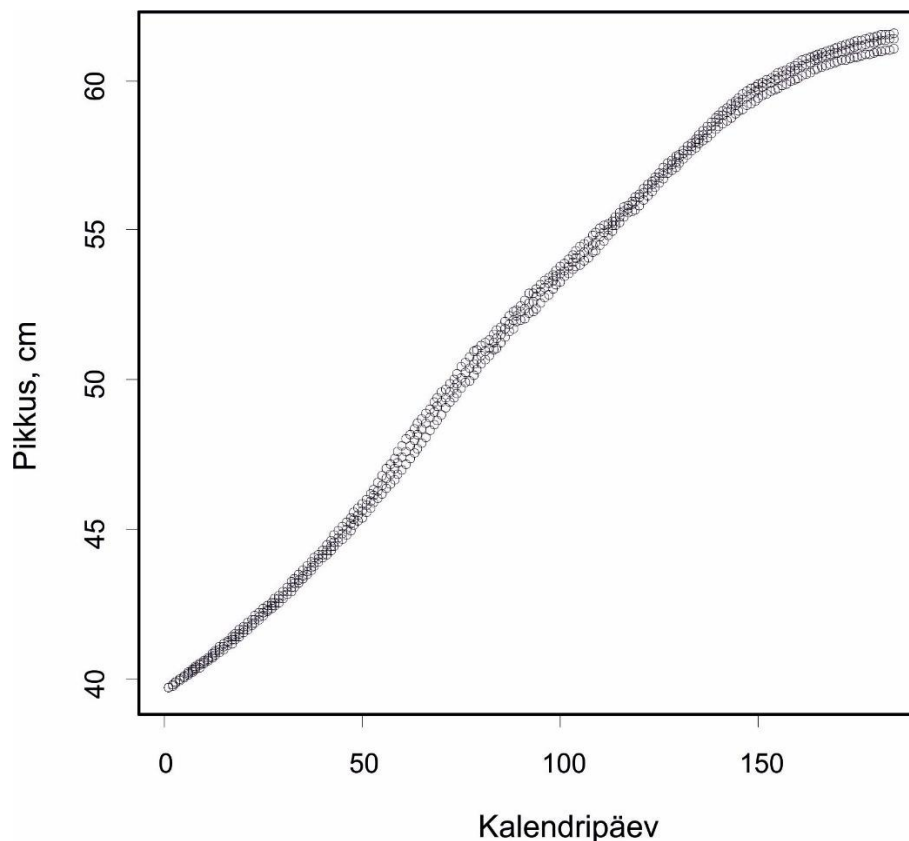
Põhjaelustiku proovid koguti Ekman tüüpi põhjaammutajaga. Proovid koguti kolmes korduses. Seejärel pesti proovid nailonsõeltel. Nailonsõela siidi ava diameeter oli 0,25 mm. Välitöödel pakiti proovid kilekottidesse, varustati etiketiga ning säilitati  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  juures kuni nende laboratoorse analüüsini. Kõikides proovides määrati põhjaloomastiku ja -taimestiku liigiline koosseis ja leiti iga liigi kuivkaal  $1\text{ m}^2$  mereala kohta. Kuivkaalu leidmiseks hoiti loomset materjali  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  juures vähemalt 48 tundi, taimset materjali vähemalt üks nädal. Laboratoorsed tööd toimusid Eesti Akrediteerimiskeskuse poolt akrediteeritud Tartu Ülikooli Eesti Mereinstituudi katselaboris registreerimisnumbriga L179 ja vastavalt kvaliteedisüsteemi tööjuhenditele KJ I/4 Zoobentos: Makrozoobentose liigilise koosseisu, arvukuse ja biomassi määramine. Proovide kogumisel ja analüüsimisel kasutati HELCOMi poolt väljatöötatud meetodilisi standardeid (<https://helcom.fi/media/publications/Manual-for-Marine-Monitoring-in-the-COMBINE-Programme-of-HELCOM.pdf>). See tagab põhjaelustiku ülevaate võrreldavuse teiste Läänemere põhjaloomastiku uuringutega.

## Toitainete liikumine kalakasvatuses

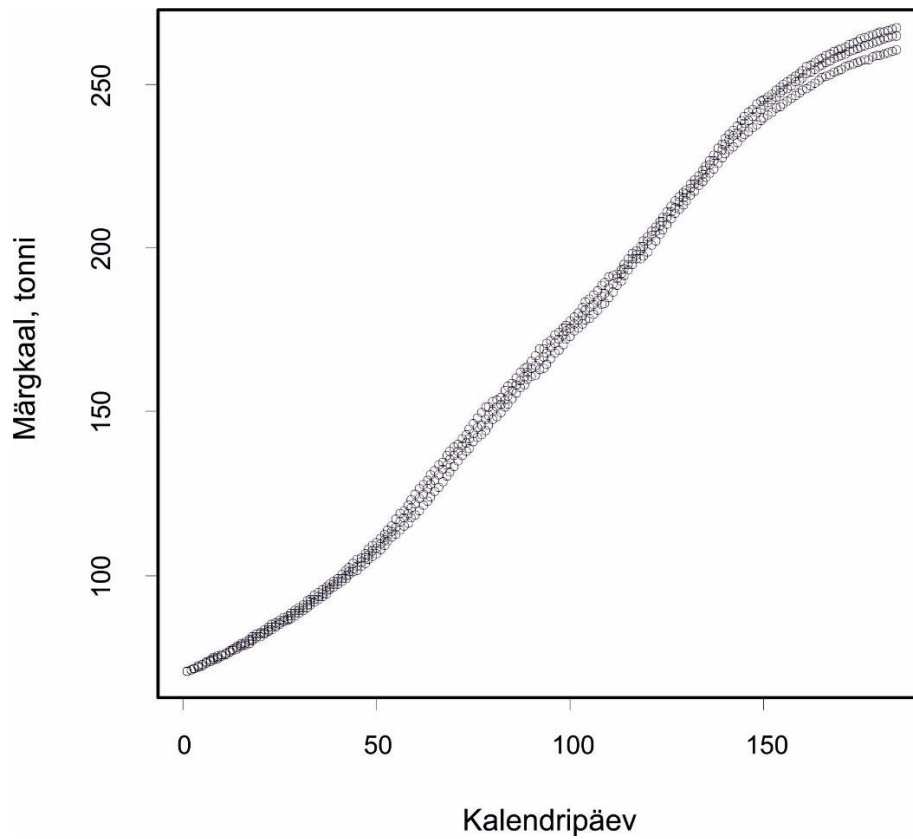
### *Toitainevõogude ajaline muutlikkus kalakasvatuses ühe kasvatamistsükli jooksul*

Realistlikke toitainete koormuste hindamiseks potentsiaalsetel kalakasvatusaladel Lääne-Eestis rakendasime Tagalahe piirkonnas loodud DEB-mudeleid. Uuritud stsenaariumi puhul (kasvatuses

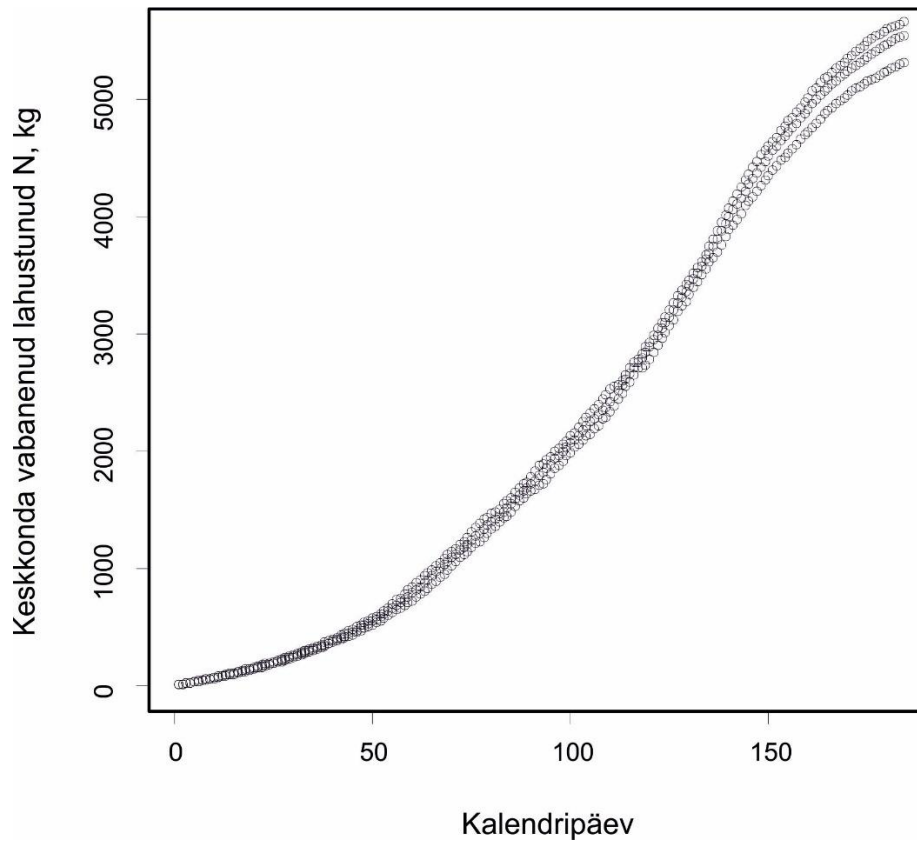
70000 kala, kalade algkaal 1 kg, kasvuperiood 180 päeva, Tagalahe keskkonnatingimused) ennustas mudel täpselt kalade pikkuse ja kaalu kogu kasvuperioodi jooksul (Joonised 3–4). Kasutatud stsenaariumi puhul kasutatakse sööta kokku 223 tonni märgkaalus (178 tonni kuivkaalus). Kalakasvatuse söödas sisaldub 10450 kg lämmastikku ja 1232 kg fosforit. Kalakasvatusest vabaneb lahustunud kujul keskkonda 5546 kg lämmastikku ja 20 kg fosforit (Joonis 5–6) ning merepõhja settib 1486 kg lämmastikku ja 479 kg fosforit (Joonised 7–8). Kasvuperioodi lõpus eemaldatakse kaladega merekeskkonnast 3419 kg lämmastikku ja 733 kg fosforit (Joonised 9–10).



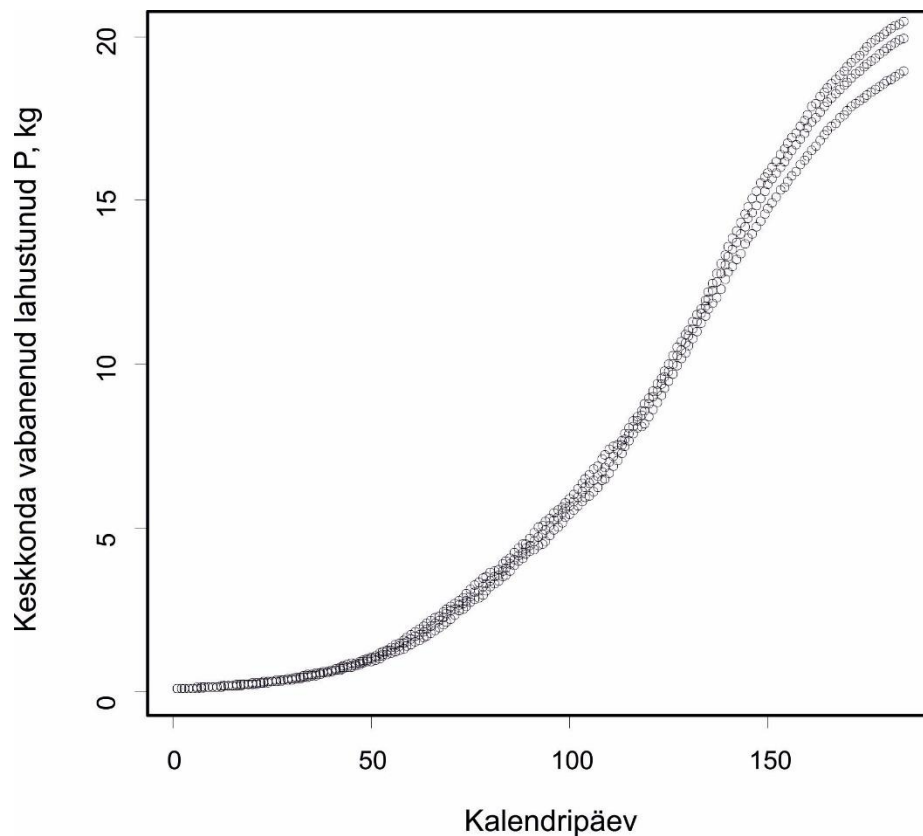
Joonis 3. Kalade pikkuskasv kalakasvatuses kasvuperioodi jooksul. Joonisel on näidatud tunnuse keskväärtns ja 95% usaldusvahemik.



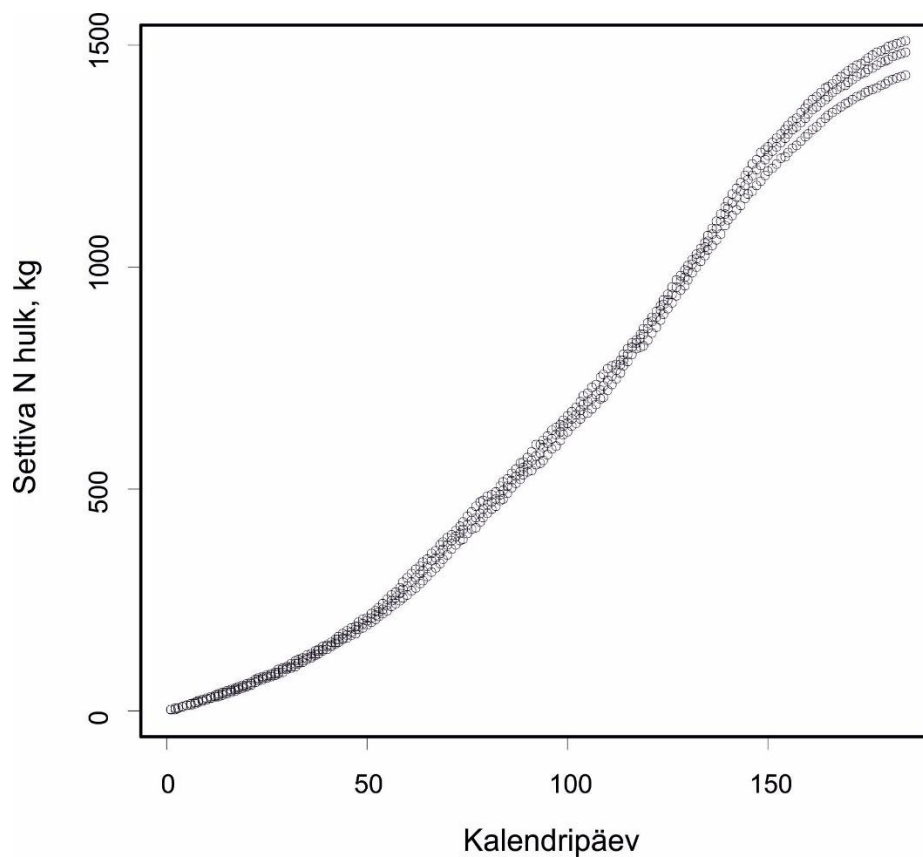
Joonis 4. Kumulatiivne kalabiomassi juurdekasv kalakasvatustes kasvuperioodi jooksul. Joonisel on näidatud tunnuse keskväärtus ja 95% usaldusvahemik.



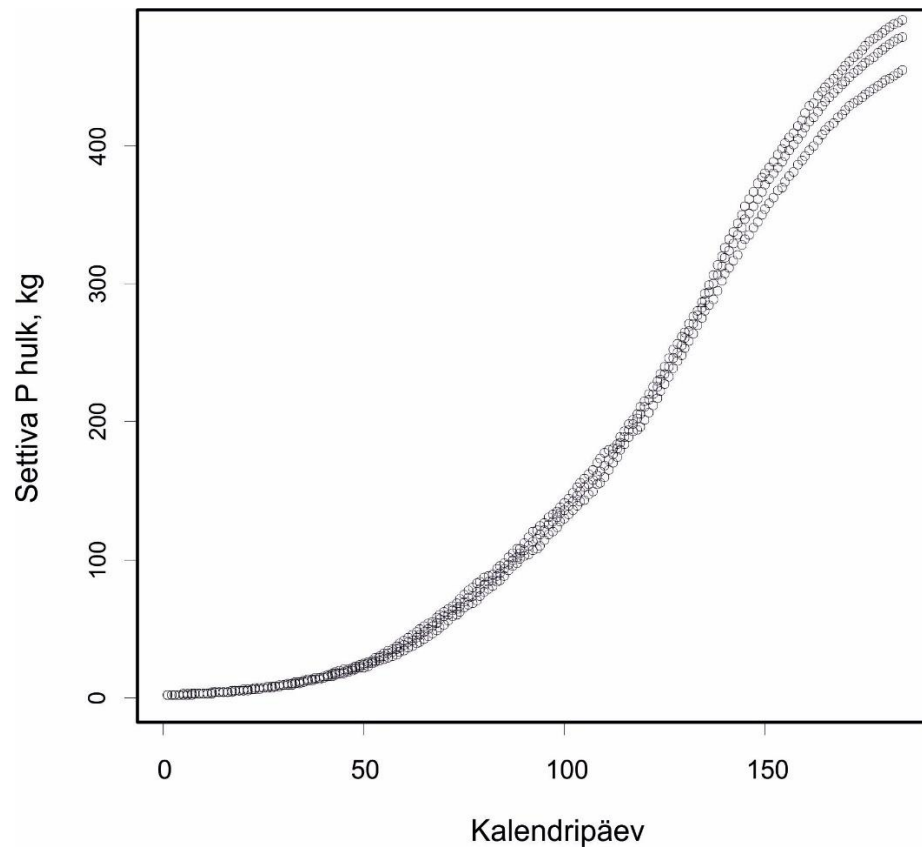
Joonis 5. Kalakasvatusest merekeskkonda vabanenud lahustunud lämmastiku kumulatiivne kogus kasvuperioodi jooksul. Joonisel on näidatud tunnuse keskväärtus ja 95% usaldusvahemik.



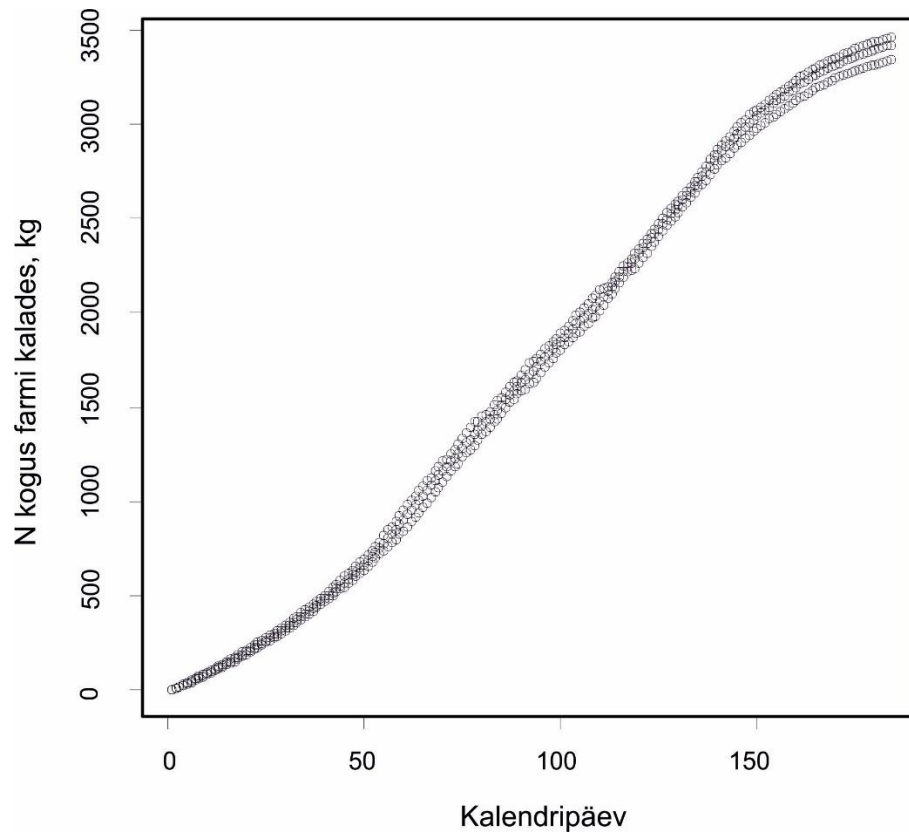
Joonis 6. Kalakasvatusest merekeskkonda vabanenud lahustunud fosfori kumulatiivne kogus kasvuperioodi jooksul. Joonisel on näidatud tunnuse keskvärtus ja 95% usaldusvahemik.



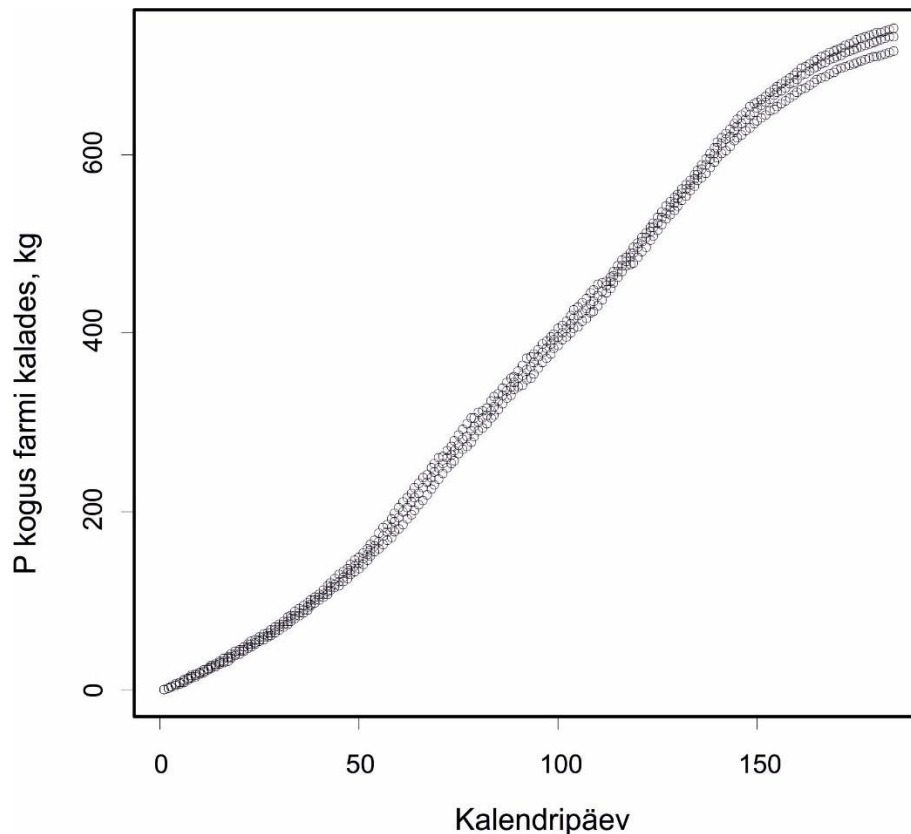
Joonis 7. Kalakasvatusest merepõhja settinud lämmastiku kumulatiivne kogus kasvuperioodi jooksul. Joonisel on näidatud tunnuse keskvärtus ja 95% usaldusvahemik.



Joonis 8. Kalakasvatusest merepõhja settinud fosfori kumulatiivne kogus kasvuperioodi jooksul. Joonisel on näidatud tunnuse keskväärtus ja 95% usaldusvahemik.



Joonis 9. Kasvatuse kalades sisalduva lämmastiku kumulatiivne kogus kasvuperioodi jooksul. Joonisel on näidatud tunnuse keskväärtus ja 95% usaldusvahemik.

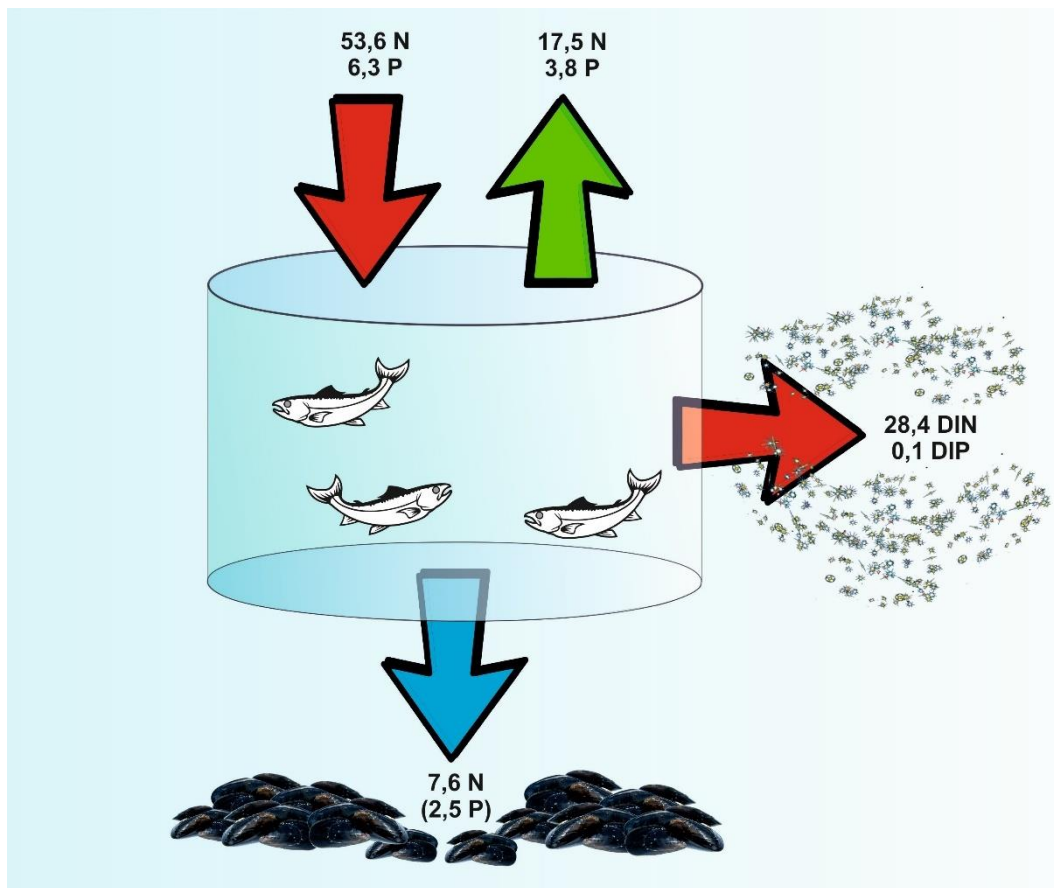


Joonis 10. Kasvatuse kalades sisalduva fosfori kumulatiivne kogus kasvuperioodi jooksul. Joonisel on näidatud tunnuse keskväärts ja 95% usaldusvahemik.

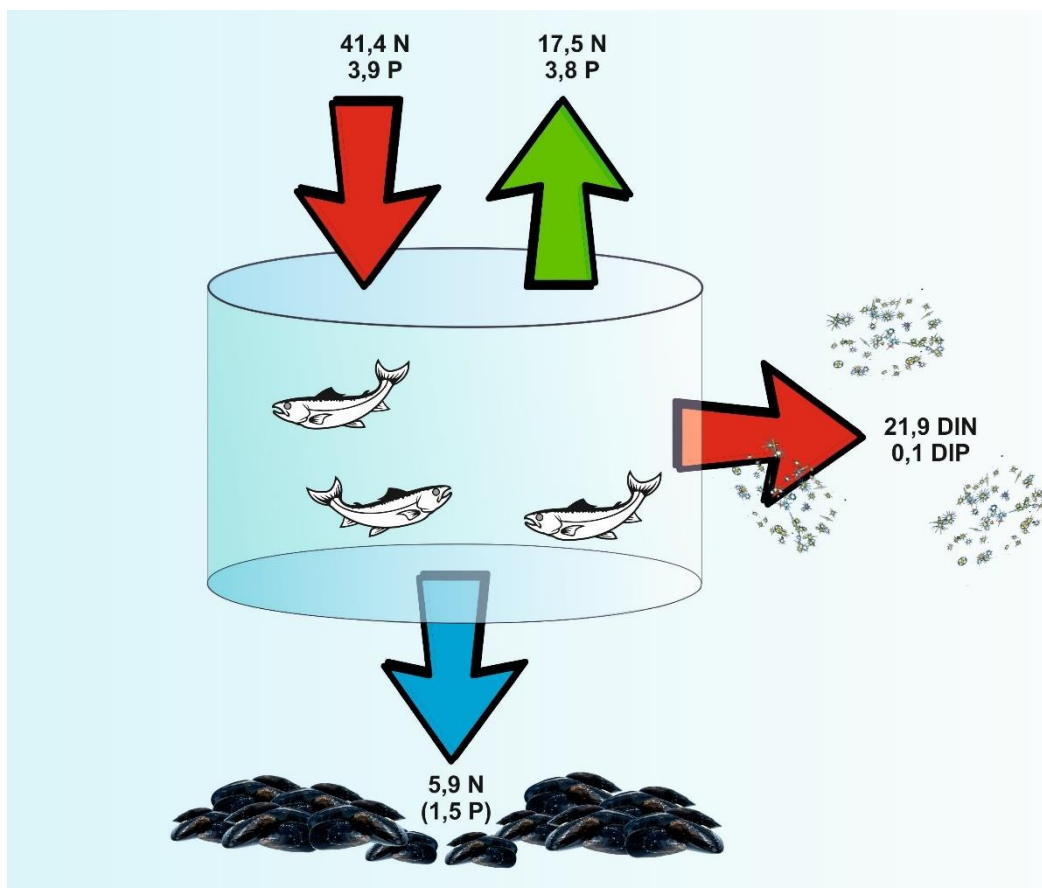
### *Toitainete bilanss kalakasvatuses*

Järgnevalt kirjeldame toitainete bilanssi kalakasvatuses. Bilansi arvutamisel on toodangust maha lahutatud kasvatusperioodi alguses sumpadesse sissepandud kalade kaal (so. kogutoodang = kalade kaal kasvatusperioodi lõpus – kalade kaal kasvatusperioodi alguses). Et tulemused oleksid paremini võrreldavad teiste sarnaste uuringutega on emissioonid väljendatud toodetud kalatonna kohta.

Juhul kui kalasöödas ei kasutata piirkondlikku kala, siis iga toodetud kalatonna kohta vabaneb Läänemere hinnanguliselt 36,0 kg lämmastikku ja 2,6 kg fosforit (veesambasse ja meresetesse liikunud fraktsioonide summa). Vabanenud lämmastikust esineb 28,4 kg lahustunud kujul ning 7,6 kg settib väiksemate osakeste näol merepõhja. Toitainete ringluse seisukohast on oluline eristada BioMar Blue Impact 9024 sööda puhul erinevaid fosforiühendeid. Nimelt BioMar Blue Impact 9024 sööda kasutamisel vabaneb söödas sisalduvast kogufosforist veesambasse lahustunud fosforühendite, ortofosfaatide näol vaid 4 %, toodetud kalatonna kohta kokku 0,1 kg. Ortofosfaadid põhjustavad selget keskkonnamõju, kuna need tarvitatakse taimse hõljumi poolt koheselt ära. Valdav osa fosforiemissioonist (96 %) ehk 2,5 kg toodetud kalatonna kohta aga settib hüdroksüapatiidi,  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$ , osakeste näol merepõhja ning väljub toitainete ringlusest. Kuna merepõhja settinud hüdroksüapatiit ei ole bioloogiliselt omastatav, ei ole selle fraktsiooni näol tegemist ka fosforiemissiooniga. Looduses moodustuvad hüdroksüapatiiti sisaldavad mineraalsed setted näiteks šelfimeredes, kus toimub mineraalse skeletiga mereloomade intensiivne sedimentatsioon. Ka Eestis kaevandatav fosforiit on selliselt moodustunud. Saagi koristamisel eemaldatakse merekeskkonnast iga toodetud kalatonna kohta 17,5 kg lämmastikku ja 3,8 kg fosforit (Joonis 11).



Joonis 11. Kalakasvatusega seotud lämmastiku ja fosfori vood merekeskkonnas. Käesoleva töö analüüsis lähtusime eeldusest, et avamere kalakasvatajad kasutavad keskkonnasõbralikku sööta, mille puhul kalakasvatusest lähtuv toitainete emissioon on minimaalne. Oma arvutustes kasutasime söötadena BioMar tooteid Blue Impact 9024 6mm ja Blue Impact 9024 8mm. Joonisel on toodud 1 tonni kalatootmisega tekkivad ainevood (kilogrammides), kui me ei kasuta söödas kohalikku kala. Punase noolega on näidatud merekeskkonda viidud toitainete kogused (sööt ja kaladest lähtuv vees lahustuvate toitainete emissioon; DIN, DIP: lämmastiku ja fosforiühendite lahustuv fraktsioon). Sinise noolega on näidatud merepõhja (sh. ka põhjakooslustes leiduvatesse merekarpidesse) ladestuvate toitainete kogused. Meresetetesse ladestunud fosfor on näidatud sulgudes, kuna tegemist on hüdroksüapatiidiga so. bioloogiliselt mitteomastatava fosforifraktsiooniga. Karpides püsivad toitained stabiilselt aastakümneid ning aja jooksul viiakse need biomineralisatsiooni kaudu toitainete ringlusest välja. Rohelise noolega on näidatud toodanguga eemaldatav toitainete kogus kalakasvatusest. Toitainete bilanssi on põhjalikumalt kirjeldatud tekstiosas.



Joonis 12. Kalakasvatusega seotud lämmastiku ja fosfori vood merekeskkonnas. Joonisel on toodud 1 tonni kalatootmisega tekkivad ainevood (kilogrammides) olukorras, kus söödas kasutatakse kohaliku kala. Valitud stsenaariumi kohaselt moodustab kalajahu ja -õli kalasööda lämmastiku üldsisaldusest 22,9 % ja fosfori üldsisaldusest 39 %. Kuna tegemist on kohaliku kalaga, siis joonisel näidatud bilansiarvutustes see fraktsioon ei kajastu. Punase noolega on näidatud merekeskkonda viidud toitainete kogused (sööt ja kaladest lähtuv vees lahustuvate toitainete emissioon; DIN, DIP: lämmastiku ja fosforiühendite lahustuv fraktsioon). Sinise noolega on näidatud merepõhja (sh. ka põhjakooslustes leiduvatesse merekarpidesse) ladestuvate toitainete kogused. Meresetetes ladestunud fosfor on näidatud sulgudes, kuna tegemist on hüdroksüapatiidiga so. bioloogiliselt mitteomastatava fosforifraktsiooniga. Karpides püsivad toitained stabiilselt aastakümneid ning aja jooksul viiakse need biomineralisatsiooni kaudu toitainete ringlusest välja. Rohelise noolega on näidatud toodanguga eemaldatav toitainete kogus kalakasvatusest. Toitainete bilanssi on põhjalikumalt kirjeldatud tekstiosas.

Vastavalt peatükis "Hüpoteetiline kalakasvatus" toodud arvutustele moodustab kalajahu ja -õli kalasööda lämmastiku üldsisaldusest 22,9 % ja fosfori üldsisaldusest 39 %. Juhul, kui kasutame kalasöödas kohaliku kala, võime bilansiarvutuslikult seda fraktsiooni (22,9 % N ja 39 % P) emissioonide määramisel mitte arvestada. Lähtudes nendest eeldustest lisatakse kohaliku sööda kasutamisel merekeskkonda iga toodetud kalatonna kohta 27,8 kg lämmastikku ja 1,6 kg fosforit. Vabanenud lämmastikust esineb 21,9 kg lahustunud kujul ning 5,9 kg settib väiksemate osakeste näol merepõhja. Söödas sisalduvast kogufosforist vabaneb veesambasse lahustunud fosforiühendite, ortofosfaatide näol iga kalatonna kohta 0,1 kg fosforit. Merepõhja settiv fosfor (1,5 kg) esineb hüdroksüapatiidi osakeste kujul ning väljub toitainete ringlusest. Saagi koristamisel eemaldatakse merekeskkonnast sarnaselt eelmisele stsenaariumile iga toodetud kalatonna kohta 17,5 kg lämmastikku ja 3,8 kg fosforit (Joonis 12).

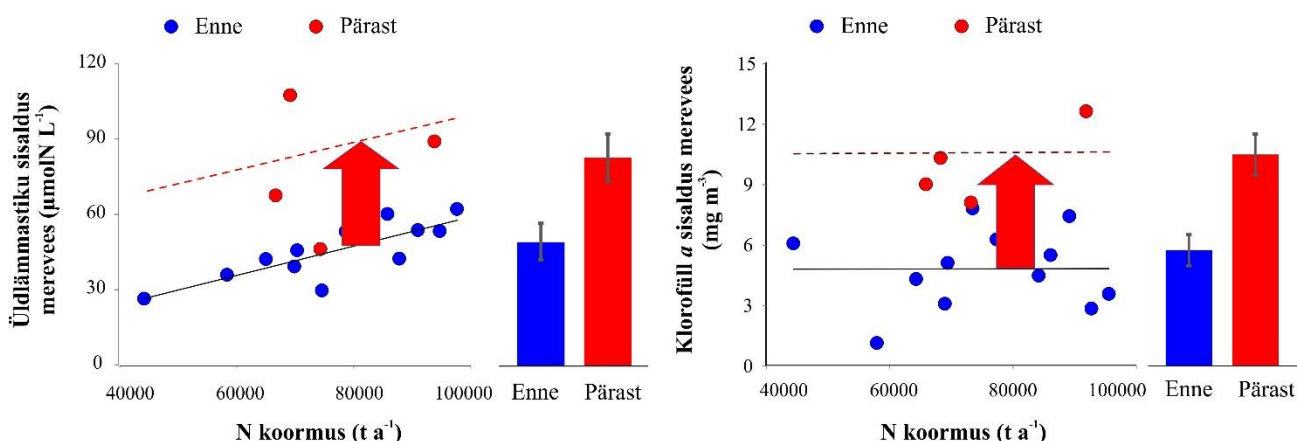
Käesoleval ajal ei toodeta ühtegi kalasööta, mille koostisained oleks ainult Läänemere päritolu ning üldjuhul koosnevad kalasöötade segud eri päritolu kalajahust ja -õlist. Selleks, et kalasöötade tootmine oleks jätkusuutlik, tuleb komponentidena tihti kasutada ka mitmeid muude kalatööstuste

kõrvalsaadusi (nt. lõhe- ja tursaõli). Näiteks meie stsenaariumis kasutatud söötade puhul moodustab Läänemere kala kogu söödas sisalduva õli kogusest vaid 37% ning ülejäänud õli pärineb kalatööstuste kõrvalsaadustest ja/või Lõuna-Ameerika päritoluga kaladest.

Sellest tulenevalt on kindla päritolu kalajahu- ja õli kasutamine söödas hetkel veel majanduslikult ebaratsionaalne, kuna tegemist oleks kallima söödaga ning kalade kasvutulemused ei pruugi tulla nii head, kui teiste (kasvutingimuste mõistes tasakaalustatute) söötade puhul. Jätksuutlike lahenduste loomiseks oleks vaja läbi viia majandusuuringuid, mis analüüsiks Läänemerest püütud toorme (sh. rannakarpide, võõrliikide jms) kasutamisevõimalusi kohalike kalasöötade valmistamisel ning pakuks välja selliste söötade kulutõhusama tootmise lahendusi.

### *Suurselgrootute koosluste potentsiaal merepõhja settinud toitainete biomineraliseerimisel*

Suurem osa (umbes 95%) merepõhja settinud fosforist esineb hüdroksüapatiidi näol ja väljub toitainete ringlusest, kuna tegemist ei ole bioloogiliselt omastatava fosfori fraktsiooniga. Kalakasvatusest merepõhja settinud ülejäänud lämmastiku- ja fosforiühendite vormid kasutatakse normaalsete hapnikutingimuste esinemisel ära pikaealiste põhjaorganismide (nt. merekarpide) poolt. Pikaealised põhjaloomad on toitainete tohutult suureks looduslikuks reservuaariks, kust toitainete vabanemine toimub vaid elupaiga (nt. karide) täielikul hävinemisel (mida pole viimase 50. aasta jooksul ava-Läänemere regioonis täheldatud). Näiteks levib söödav rannakarp Läänemere avaosas umbes 75000 km<sup>2</sup> merealal ning selline kooslus seob endas stabiilselt 525000 tonni lämmastikku ja 49500 tonni fosforit (Kotta et al., 2020). Toitainete koormuse suurenemisel suudab selline kooslus kasvatada oma toitainete reservuaari kordades. Nii näiteks olid enam eutrofeerunud tingimustes 1980ndatel aastatel söödava rannakarbi biomassid 10–100 korda suuremad tänapäevastest väärtustest (Kotta et al., 2009). Lisaks söödavale rannakarbile elab aga Läänemere põhjakooslustes veel teisi toitainete ringluse osas samaväärse puhverdava mõjuga mereorganisme (balti lamekarp, liiva-uurikkarp, südakarp). Loomulikult ei suuda selline looduslik filter merest eemaldada kogu toitainete varu, kuna rannikumere pindala/veemaht on kogu Läänemere pindala/veemahu arvestades siiski üsna väike ning veevahetus ava-Läänemere ja rannikumere vahel toob madalamatesse merepiirkondadesse toitaineid pidevalt juurde. Küll aga hoiavad põhjaloomastiku liigid rannikumere vees toitainete sisalduse oluliselt madalamal nivool, kui see oleks ilma nendeta.



Joonis 13. Aastase maismaalt siseneva lämmastikukoormuse, merevee üldlämmastiku ja klorofüll a sisalduse vaheline seos enne ja pärast rändkrabi sissetungi Pärnu lahte. Lineaarse regressiooni jooned näitavad merevee üldlämmastiku ja taimse hõljumi sisalduse taset erinevate reostuskoormuste juures enne (must sirgjoon) ja pärast rändkrabi sissetungi (punane sirgjoon). Vertikaalsed tulbad tähistavad kogu uurimisperioodi (2000–2015) merevee üldlämmastiku ja klorofüll a sisalduse keskväärte suurendamist koos 95% usaldusnivoo.

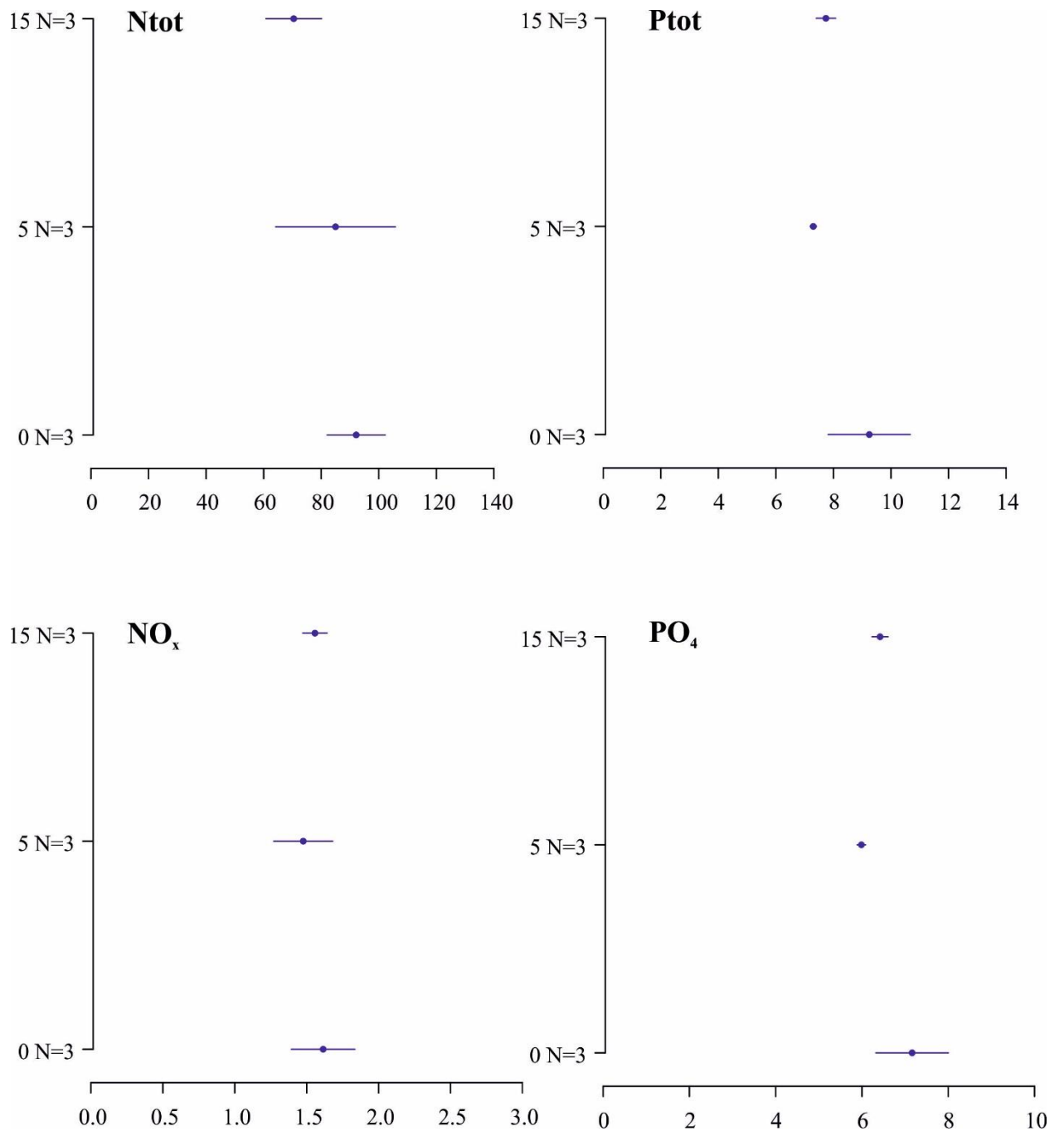
Sellise loodusliku filtri toimimise efektiivust ja tähtsust saame näidata Pärnu lahe näitel. Nimelt jõudis Pärnu lahte 2011. aastal harilik rändkrabi *Rhithropanopeus harrisi*. Tegemist on võõrliigiga, mille sarnast Läänemere rannikumere kooslused polnud varasemalt kogenud. Liigile Pärnu lahe keskkond sobis ning ta kujunes siin domineerivaks liigiks. Rändkrabi suutis vaid mõne aastaga vähendada suurselgootute (eriti piirkonnas domineeriva balti lamekarbi) biomassi 61% ulatuses. Selle tagajärjel vähenes rannikumere looduslik isepuhastusvõime sellisel määral, et merevee toitainete ja taimse hõljumi sisaldus suurenes kaks korda. Foonialal (krabideta mereala) selliseid muudatusi aga ei täheldatud (Joonis 13) (Kotta et al., 2018). Vaadeldud muutuse ulatus on samaväärne vee kvaliteedi halvenemisele kahe klassi võrra. See "inimtekkeline eksperiment" näitlikustab ilmekalt rannikumere koosluste isepuhastumisvõime potentsiaali ning on veenvaks tõendiks selliste protsesside olulisusest Läänemere rannikumere veekvaliteedi kujunemisel.

## Tagalahe kalakasvatuse keskkonnamõju merepõhja setete toitainete sisaldusele ja suurselgootute kooslustele

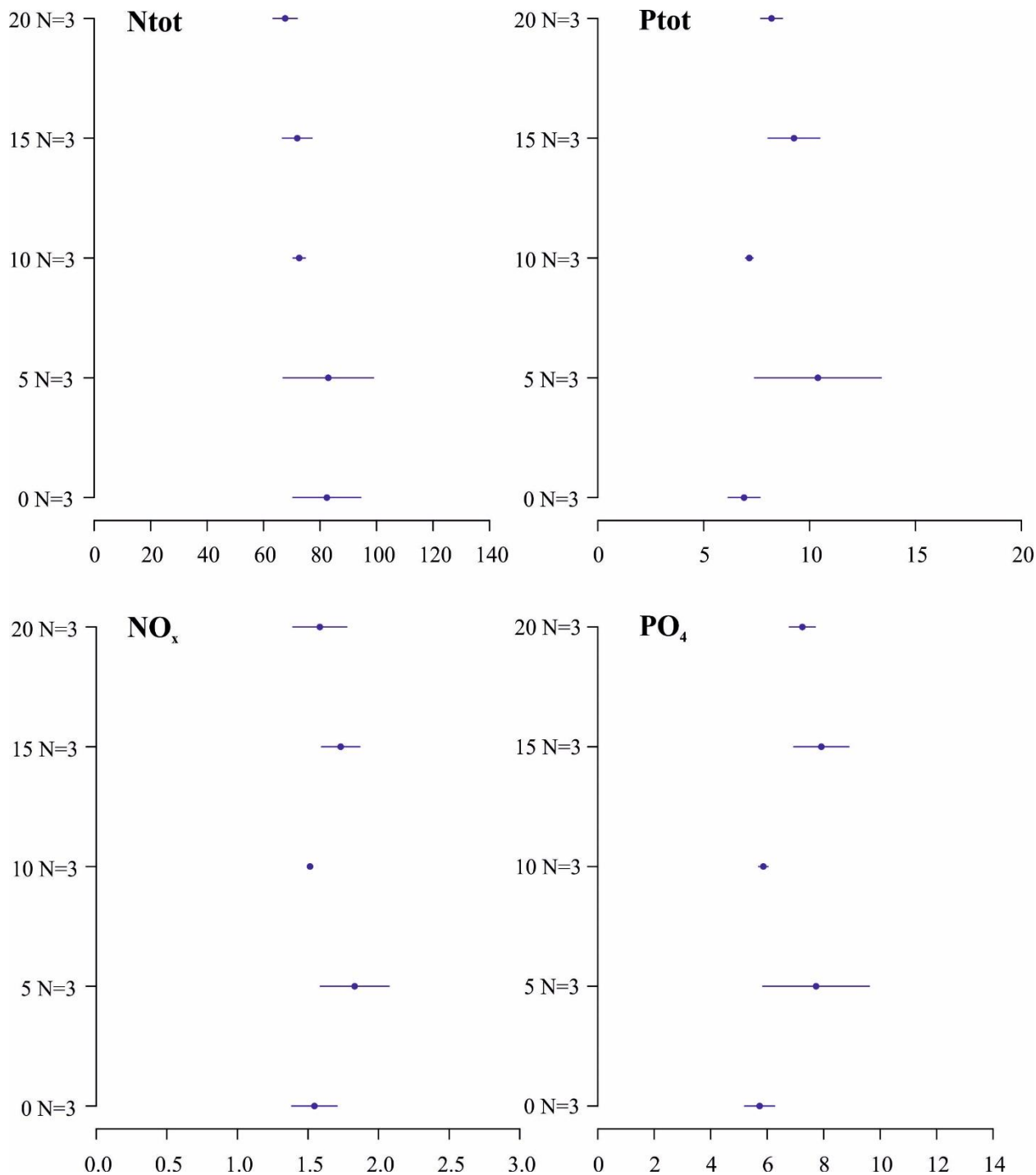
25. mail mõõdeti kogu uurimisalal orgaanilise aine kihi paksuseks 1–2 mm ning statistiliselt olulised erinevused sumbaaluse ja ümbritseva ala vahel puudusid ( $p > 0,05$ ). 11. augustil eristus sumbaalune piirkond aga visuaalselt naabruses olevatest merealadest. Sumba all oli orgaanilise aine kihi paksus 1 cm, kuid juba 5 m kaugusel sumbast oli see poole väiksem (0,5 cm) ning 15 m kaugusel ja kaugemal oli orgaanilise kihi paksus 0,2 cm (looduslik foon). 5. oktoobril mõõdeti paksem orgaanilise aine kiht vahetult sumba all oleval merepõhjal (0,5 cm kiht) ning laiguti oli suurenenud orgaanilise aine sisaldust näha ka 5 m kaugusel sumbast (0,3 cm kiht). 10 m kaugusel ja kaugemal oli orgaanilise kihi paksus 0,2 cm (looduslik foon).

*Tagalahe kalakasvatusel puudus selge statistiline mõju meresetete toitainete sisaldusele kogu uurimisperioodi jooksul ( $p > 0,05$ ). Setete üldlämmastiku ja -fosfori kontsentratsioon farmi vahetus läheduses (0–10 m) oli mõnevõrra kõrgem kui foonialal (15–20 m), kuid mõõdetud erinevus oli marginaalne ning ei olnud statistiliselt oluline. Nitraatide, nitritite ja fosfaatide osas ei olnud farmi läheduses võimalik näha mingisugust selget toitainete kontsentratsioonide kasvu (Joonised 14–16). Lähtudes mõõdetud üldfosfori ja -lämmastiku kontsentratsioonide keskväärtustest oli bioloogiliselt omastatava ladestunud toitainete fraktsiooni kogus (koonderinevus sumba- ja fooniala vahel) kõikide sumpade all kokku järgmine: kevadine üldfosfor 0,932 kg ja -lämmastik 0,006 kg, suvine üldfosfor 1,242 kg ja -lämmastik 0,167 kg ning sügisene üldfosfor 0 kg ja -lämmastik 0,041 kg. Tegemist on väga väikeste toitainete hulkadega ning mitte ühelgi juhul ei erinenud sumbaalal mõõdetud toitainete kogused statistiliselt fooniala väärtustest.*

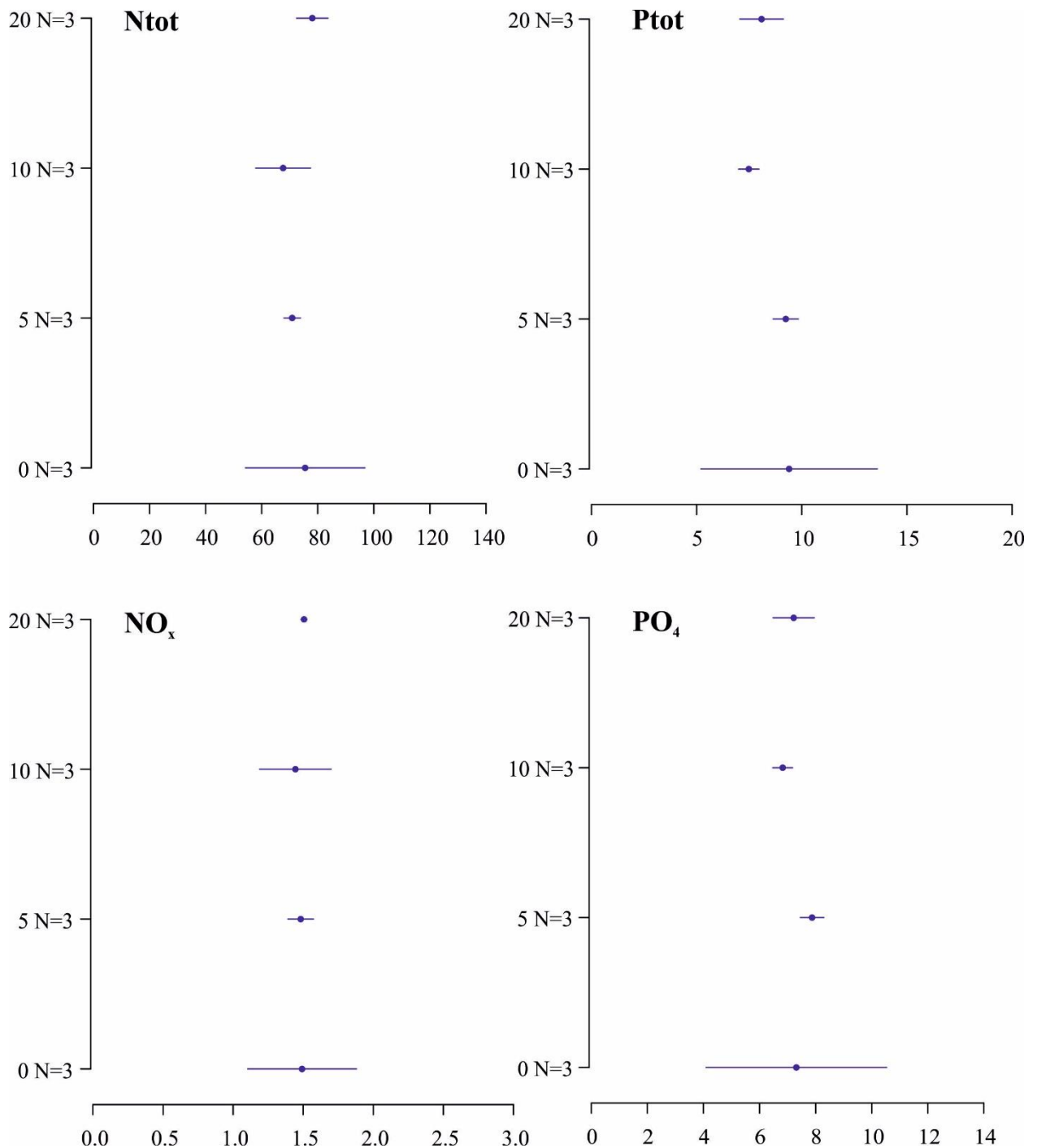
*Kalakasvatuse mõju puudumine meresetete toitainete sisaldusele on tagatud mitme teguri koostoimel. Väga oluliseks komponendiks on loodussõbralike kalasöötade kasutamine, kuna selliselt on viidud sumbakasvatuse keskkonnamõju miinimumini. Valdav osa söödas sisalduvast fosforist esineb hüdroksüapatiidi kujul. Tegemist on bioloogiliselt mitteomastatava fraktsiooniga, mis settib merepõhja ning väljub toitainete ringlusest. Samaväärselt oluline on aga ka piirkonna suur veevahetus teiste ava-Läänemere osadega, mis tagab veesambasse sattunud toitainete lahustumise suurtel merealadel. Seetõttu ei ole isegi väga intensiivse kalakasvatustahenduste korral oodata mõõdetavate negatiivsete keskkonnamõjude avaldumist Ava-Läänemere veekogumites. Ja väga oluliseks tuleb lugeda ka sumbakasvatuse all olevates meresetetes elavate suurselgootute võimet kiirelt toitaineid omastada. Nii näiteks täheldasime välimõõtmiste käigus orgaanilise aine mõnetist suurenemist kalasumpade vahetus läheduses, kuid see erinevus ei väljendunud enam setete toitainete sisalduses, kuna mereelustik oli kergemini kättesaadavad toitainete fraktsioonid meresettest juba ära kasutanud.*



Joonis 14. Üldlämmastiku (Ntot), -fosfori (Ptot), nitraatide ja nitritite (NO<sub>x</sub>) ning fosfaatide (PO<sub>4</sub>) kontsentratsioon seirejaamade meresetetes ( $\mu\text{g}$  toitaineid g sette kohta) 25. mail 2021. aastal. Punkt tähistab uuritava tunnuse keskvaartust ja sinine joon 95% usaldusvahemikku. Jaama kood y-teljel näitab proovipunkti kaugust kalafarmist meetrites ning N tähistab proovikorduste arvu.



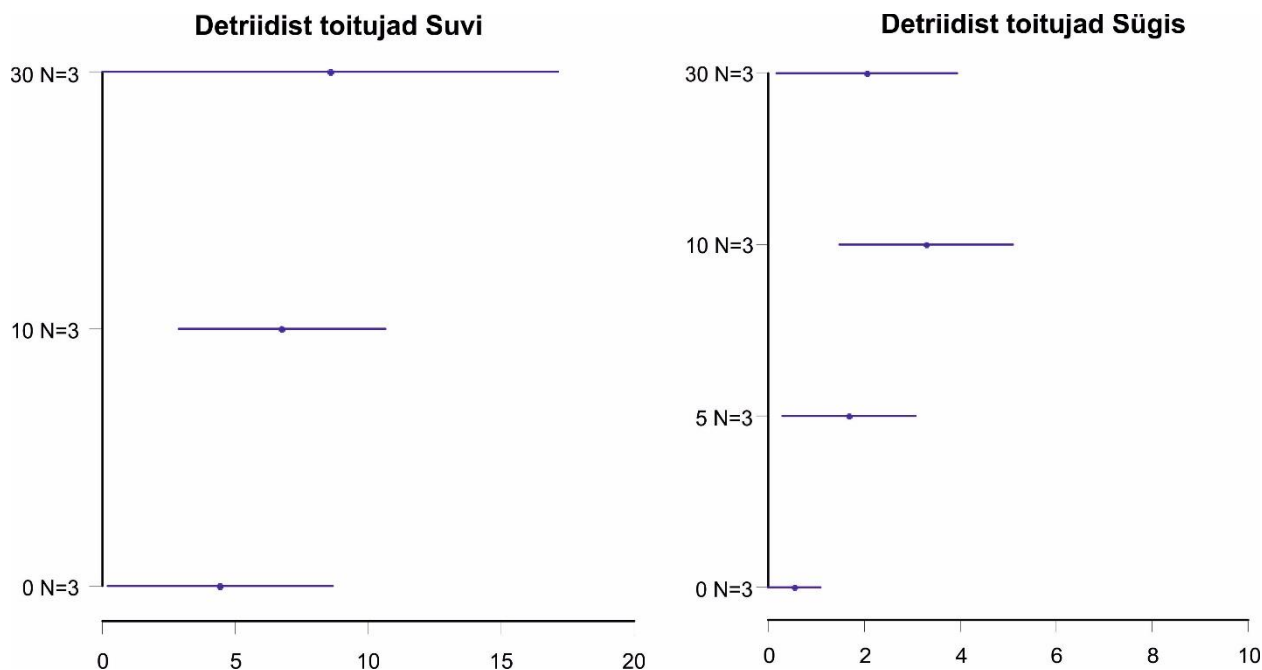
Joonis 15. Üldlämmastiku (Ntot), -fosfori (Ptot), nitraatide ja nitritite (NO<sub>x</sub>) ning fosfaatide (PO<sub>4</sub>) kontsentratsioon seirejaamade meresetetes ( $\mu\text{g}$  toitaineid g sette kohta) 11. augustil 2021. aastal. Punkt tähistab uuritava tunnuse keskväärtust ja sinine joon 95% usaldusvahemikku. Jaama kood y-teljel näitab proovipunkti kaugust kalafarmist meetrites ning N tähistab proovikorduste arvu.



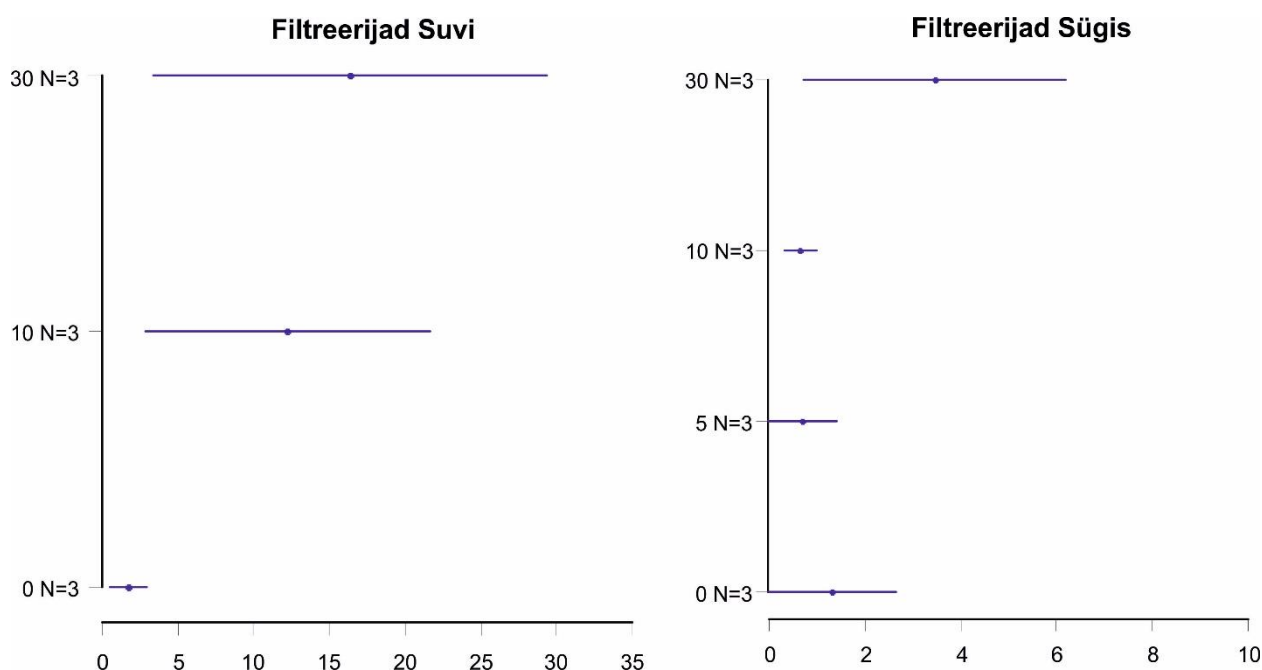
Joonis 16. Üldlämmastiku (Ntot), -fosfori (Ptot), nitraatide ja nitritite (NO<sub>x</sub>) ning fosfaatide (PO<sub>4</sub>) kontsentratsioon seirejaamade meresetetes ( $\mu\text{g}$  toitaineid g sette kohta) 5. oktoobril 2021. aastal. Punkt tähistab uuritava tunnuse keskväärtust ja sinine joon 95% usaldusvahemikku. Jaama kood y-teljel näitab proovipunkti kaugust kalafarmist meetrites ning N tähistab proovikorduste arvu.

Uuritud Tagalahe piirkonna liivased elupaigad olid, arvestades piirkonna sügavust (18 m), väga liigirikkad. Suvistes proovides leiti merekarpe *Cerastoderma glaucum*, *Limecola balthica*, *Mya arenaria* ja *Mytilus trossulus*, tigudest elas uurimisalal *Peringia ulvae*, vähilaadsetest esinesid *Gammarus* spp. ja ussides *Hediste diversicolor*. Sügisel oli liikide arv mõnevõrra suurem. Putukatest leiti Chironomidae vastseid, merekarpidest olid esindatud *Cerastoderma glaucum*, *Limecola balthica* ja *Mya arenaria*, vähilaadsetest esinesid *Amphibalanus improvisus*, *Corophium volutator*, *Idotea balthica*, *Palaemon adspersus* ja ussides *Hediste diversicolor*. Nii suvel kui ka sügisel domineeris liikidest ülekaalukalt *Limecola balthica*. Selline põhjaloomastiku liigiline mitmekesisus ja koosluste liigiline koosseis ei viita mitte ühelegi inimtekkelise häiringu olemasolule uurimisalal.

Tagalahe kalakasvatus ei avaldanud ebasoovitavat keskkonnamõju ka erinevate põhjaloomastiku liikide biomassidele. Kogutud seireandmed näitasid kogu uurimisperioodi vältel statistilise mõju puudumist farmi- ja referentsalade vahelisel võrdlusel ( $p > 0,05$ ). Sellest võib järeldada, et Tagalahe kalakasvatusel puudub selge ebasoovitav lokaalne keskkonnamõju (Joonised 17–19).

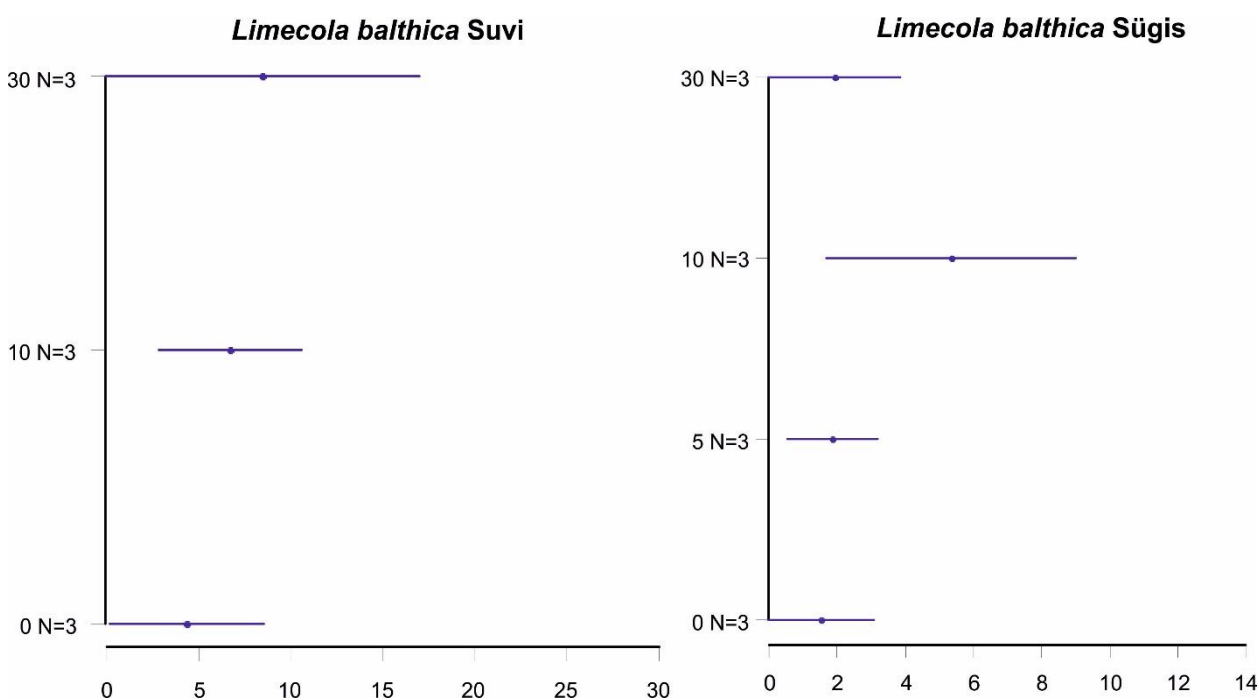


Joonis 17. Detriivooride biomass (g kuivkaalus m<sup>2</sup> kohta) seirejaamades 11. augustil ja 5. oktoobril 2021. aastal. Punkt tähistab uuritava tunnuse keskväärtsust ja sinine joon 95% usaldusvahemikku. Jaama kood y-teljel näitab proovipunkti kaugust kalafarmist meetrites ning N tähistab proovikorduste arvu.



Joonis 18. Filtreerijate biomass (g kuivkaalus m<sup>2</sup> kohta) seirejaamades 11. augustil ja 5. oktoobril 2021. aastal. Punkt tähistab uuritava tunnuse keskväärtsust ja sinine joon 95% usaldusvahemikku. Jaama kood y-teljel näitab proovipunkti kaugust kalafarmist meetrites ning N tähistab proovikorduste arvu.

Suurselgrootute erinevad funktsionaalsed rühmad (toitumistüübid) indikeerivad erinevaid eutrofeerumise aspekte. Näiteks detriivooride so. setetest toituvate loomade biomass, näitab lisandunud orgaanilise aine mõju elustikule. Suurenenud orgaanilise aine sedimentatsiooni tagajärjel suureneb meresetetes detriivooride hulk. Ülemäärase sedimentatsiooni tagajärjel so. hapniku kadumisel, aga mereelustik hävib. Hapnikutingimuste halvenemist Tagalahe seiretööde käigus kordagi ei täheldatud, kõikides proovipunktides oli põhjaelustik alati esindatud ning setetes väävelvesinikku (hapnikupuuduse indikaator) ei leidunud. Detriivooride (sh. ka massliigi, *Limecola balthica*) biomass oli kogu uurimisalal ühtlase väärtusega ning statistilisi erinevusi kalafarmi ja fooniala vahel ei esinenud. Filtreerijate so. taimsest hõljumist toituvate loomade biomass aga näitab veesambas olevate mikrovetikate hulka, mis omakorda on seotud mineraalsete toitainete kättesaadavusega mereveest. Veesamba toitainete kättesaadavuse suurenemisel suureneb kiirelt fütoplanktoni (taimse hõljumi) sisaldus ning selle tagajärjel ka filtreerijate biomass merepõhja kooslustes. Sarnaselt detriivooridele oli ka filtreerijate biomass kogu uurimisalal homogeenne ning statistilisi erinevusi kalafarmi ja fooniala vahel ei esinenud.



Joonis 19. Balti lamekarbi *Limecola balthica* biomass (g kuivkaalus m<sup>2</sup> kohta) seirejaamades 11. augustil ja 5. oktoobril 2021. aastal. Punkt tähistab uuritava tunnuse keskvärtust ja sinine joon 95% usaldusvahemikku. Jaama kood y-teljel näitab proovipunkti kaugust kalafarmist meetrites ning N tähistab proovikorduste arvu.

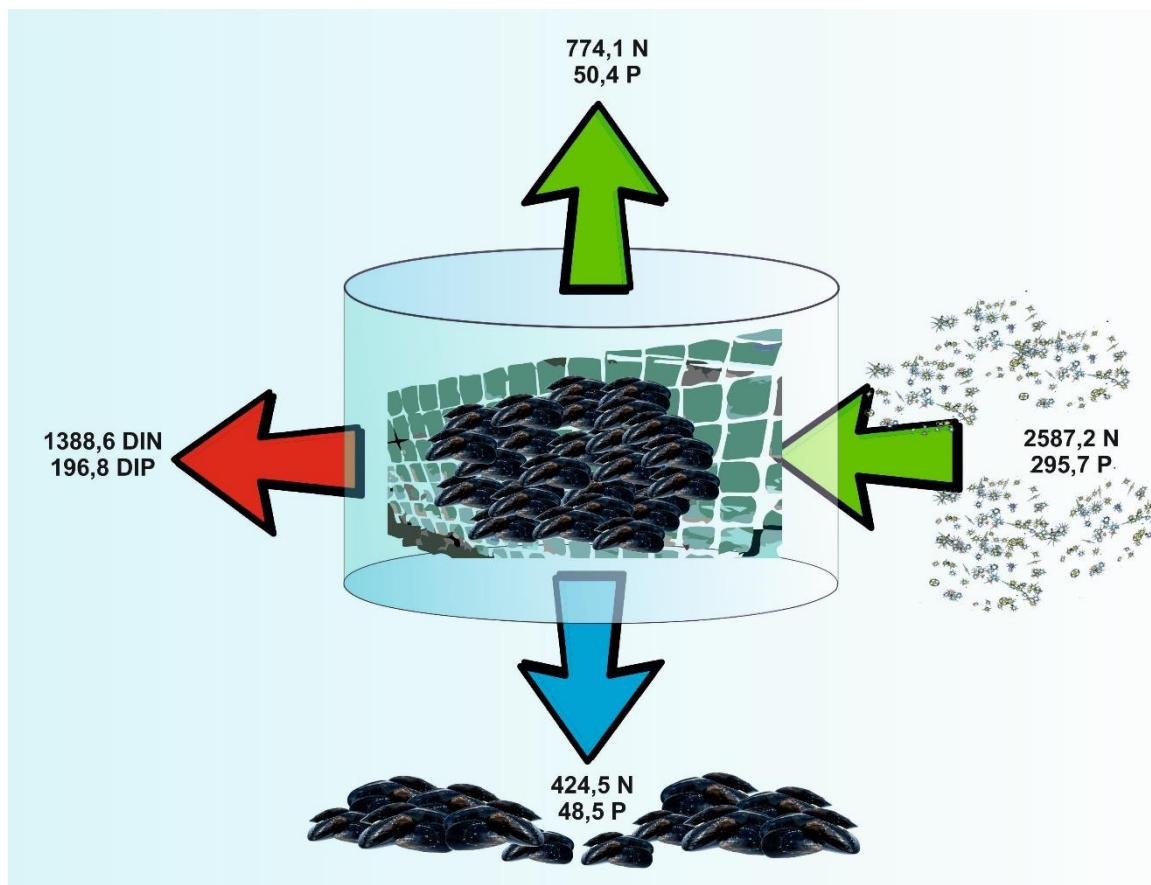
## Kalakasvatusest veesambasse ja meresetetes sattunud toitainete kompenseerimine karbikasvatuse abil

Veesambas elavatele hõljumorganismidele on hästi kättesaadavad ortofosfaadid (fosforühendite mineraalsed vormid) ja lahustunud lämmastikuühendid. Lahustunud toitainete liigne sisaldus merevees põhjustab eutrofeerumisnähte sh. vee õitsengut ning sellest tulenevalt on mõistlik rakendada veesambasse vabanenud toitainete eemaldamiseks kompensatsioonimeetmeid, et vältida ebasoovitavaid keskkonnamõjusid. Üheks selliseks võimaluseks on merekarpide kasvatuste rajamine, mille kaudu on võimalik merevett puhastada liigsetest toitainetest. Kasvanduse karbid filtreerivad mereveest välja suures koguses taimset pishõljumit ja selles sisalduvat fosforit ja lämmastikku.

Tagalahte on rajatud Redstorm OÜ poolt töenduslik karbifarm. Euroopa Merendus- ja Kalandusfondi (EMKF) rakenduskava 2014–2020 meetme 2.1 “Vesiviljeluse

innovatsioonitoetus” projekti "Karbikasvatuste lahenduste loomine kogu väärtusahela ulatuses" toel uuritakse sellise karbifarmi saagikust ja toitainete eemaldamise potentsiaali. Hinnatakse ka karbikasvatuse otsest mõju veesamba toitainete bilansile (Tartu Ülikool, 2021c).

Karbikasvatuse stsenaariumi kirjeldamisel võtsime aluseks Tagalahes paikneva arenduse, kuna reaalse farmi olemasolu võimaldab toitainevoo modelleerimistulemusi ning keskkonnamõjude ulatust ka väliandmete kogumise kaudu valideerida. Oma analüüsidest lähtusime stsenaariumist, mille kohaselt arendatavas karbikasvatuses kasvavad karbid traalvõrkudel. Farm paikneb 0,5 hektarisel merealal ning sellises kasvatuses kasutatakse kokku 1 km traalvõrku. Juhul, kui kasvatuses kasutatakse veesambas rippuvaid kõisi (nõ. fuzzy rope tüüpi kasvusubstraate), siis oleks traalvõrkudele võrdväärse farmi pindala ligikaudu 2,9 hektarit. Sellises karbikasvatuses korjatakse saaki iga 1,5–2 aasta tagant, saagis olevad karbid on keskmiselt 2,8 cm pikkused. Keskkonnaningimuste osas lähtusime Tagalaha rannikumere keskkonnaningimustest.



Joonis 20. Karbikasvatusega seotud lämmastiku ja fosfori vood merekeskkonnas. Joonisel on näidatud ühe 0.5-hektarilise karbifarmi poolt tekitatud aastased toitainete vood (kilogrammides). Rohelise noolega on näidatud karpide poolt merekeskkonnast tarbitud taimne hõljum (selles sisalduv lämmastik ja fosfor) ja saagi korjel eemaldatud toitainete hulk. Sinise noolega on näidatud merepõhja (sh. merekeskkonnas looduslikult esinevatesse karpidesse) ladestuvate toitainete kogused. Karpides püsivad toitained stabiilselt aastakümneid ning aja jooksul viiakse need biomineralisatsiooni kaudu toitainete ringlusest välja. Punase noolega on näidatud karbifarmist merekeskkonda emiteeritav toitainete kogus (DIN, DIP: lämmastiku ja fosforiühendite lahustuv fraktsioon). Toitainete bilanssi on põhjalikumalt kirjeldatud tekstiosas.

Tagalahes tehtud modelleerimise- ja mõõtmistulemused näitasid, et 0,5 hektariline karbifarm suudab filtreerimise kaudu veesambast aasta jooksul eemaldada 2587,2 kg lämmastikku ja 295,7 kg fosforit. Sama farm vabastab veesambasse 1388,6 kg lämmastikku ja 196,8 kg fosforit. *Seega bilansiarvutuslikult eemaldab karbifarm aasta jooksul veesambast kokku 1198,5 kg lämmastikku ja 98,9 kg fosforit. Saagi korjel eemaldatakse aasta jooksul 774,1 kg lämmastikku ja 50,4 kg*

*fosforit*. Lisaks suunatakse sellisest karbifarmist põhjasetetesse 424,5 kg lämmastikku ja 48,5 kg fosforit, mis seotakse kiirelt pikaajaliste põhjaorganismidesse: peamiselt merekarpide biomassi (Joonis 20). Ühel saagikorjel eemaldatakse sellisest karbifarmist 70 tonni karbimassi kuivkaalus (arvutuslik aastane saagikus 35 tonni).

Need tulemused näitavad veenvalt, et karpide positiivne keskkondlik mõju on oluliselt suurem, kui pelgalt karpidesse ladestatud toitainete hulk. Seega tuleb karbikasvatuse käsitleda kui biogeenseid filtreid, mis parandavad keskkonda ka siis, kui karpe kasvatusest ei eemaldata. Rannakarpide kasvatamist on ka mujal Läänemeres kasutatud veekeskkonnast üleliigsete toitainete eemaldamiseks ja rannikuvee eutrofeerumise negatiivsete mõjude vastu võitlemiseks. Näiteks Taanis asuvas eutrofeerunud Skive fjordis vähendasid karbifarmid oluliselt taimse hõljumi sisaldust (klorofüll *a*) ja suurendasid vee läbipaistvust kogu vesikonna ulatuses. Rannakarpide farmi all oli osakeste settimine veidi intensiivsem kui naaberaladel, kuid samas kogu vesikonna ulatuses vähenes orgaanilise materjali settimine. Antud uuringus oli rannakarpide kasvatustel isegi suurem ja pikaajalisem mõju veekvaliteedile kui toitainete eemaldamisel maismaapõhiste meetmete abil (Timmermann et al., 2019). Eelpoolkirjeldatud omaduste tõttu on karbikasvatustel väga suur perspektiiv kompenseerimaks kalakasvatustest veesambasse sattunud toitainete keskkonnamõju.

Kalakasvatustel on väga raske piirata vees lahustuva lämmastiku emissiooni merekeskkonda, seda isegi juhul, kui kasutatakse kohalikust toormest valmistatud kalasööta. Seega on karbikasvatustel suur roll just sellise keskkonnariski maandamisel. Käesolevas töös kasutatud kala- ja karbikasvatuste stsenaariumite puhul on vajalik karpe kasvatada kokku 2,9 hektaril, et täielikult kompenseerida kalakasvatusest veesambasse ja setetesse vabanenud bioloogiliselt omastatava toitainete keskkonnamõju (kui arvestame vaid saagikorjega so. karpidega merekeskkonnast eemaldatud toitainete koguseid, tuleks karpe kasvatada 4,5 hektaril). Juhul, kui söödas kasutatakse kohaliku päritoluga kalajahu ja -õli, on emissioonide kompenseerimiseks vajalik karpe kasvatada 1,9 hektaril (kui arvestame vaid saagikorjega so. karpidega merekeskkonnast eemaldatud toitainete koguseid, tuleks karpe kasvatada 3,0 hektaril). Rakendades karbikasvatust kompensatsioonimeetmena ning kasutades kohaliku kala söödas toimub bilansiarvutuslikult merekeskkonna puhastamine fosforist (Tabel 6).

Tabel 6. 195 tonni kala kasvatamisel veesambasse ja meresetetesse vabanenud toitainete 100% kompenseerimiseks vajaliku karbifarmi suurus hektarites. Arvutustest on eemaldatud vaid hüdroksiapatiidi ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$ ) osakeste fraktsioon, mis ei ole bioloogiliselt omastatav, seab merepõhja ning väljub toitainete ringlusest ehk selle fraktsiooni näol ei ole tegemist fosforiemissiooniga. Akumuleerumise puhul arvestatakse vaid karpidesse ladestunud toitainete hulka, filtreerimise puhul arvestatakse karpide kogu keskkondlikku mõju (veesambast filtreerimise kaudu eemaldatud toitainete hulka, millest on maha lahutatud veesambasse tagasi suunatud toitained).

Sööda tüüp	Akumuleerumine		Filtreerimine	
	N	P	N	P
<b>Toitainete</b>				
<b>Tavaline sööt</b>	4,5	0,2	2,9	0,1
<b>Söödas kohalik kala</b>	3,0	0,0	1,9	0,0

*Keskkonnahoiu seisukohast on hädavajalik kompenseerida just veesambasse jõudnud lahustunud lämmastiku ja fosfori keskkonnamõju. Meresetetesse ladestunud toitained kujutavad oluliselt väiksemat keskkonnariski ümbritsevale keskkonnale, kuna Eesti rannikumere koosluste isepuhastumisvõime potentsiaal on väga suur. Siin on aga oluline, et kalafarmi suurus ei ületa piirkondlikku looduslikku kandevõimet, sumpade asukoht oleks õigesti valitud ning söötmisel rakendatakse kõiki ettevaatusabinõusid, et vähendada sumbakasvatuse negatiivset keskkonnamõju.*

*Piirkondliku kandevõime arvutamisel on vaja kvantitatiivselt hinnata, kuidas mereelustik reageerib toitainete hulga muutustele ökosüsteemis. Selleks tuleb kokku koondada olemasolev seirematerjal toitainete sisalduse ja mereelustiku (taimne hõljum, põhjataimestik, põhjaloomastik) sesoonselt ja aastatevaheliselt varieeruvusest ning statistiliselt määratleda toitainete dünaamikast tingitud muutused mereelustikus (sh. muutused võtmeliikidele ja kogubiomassile). Selline statistiline mudel peab arvestama ka veekogumi sidusust teiste veekogumite ja ava-Läänemerega, kuna veevahetus mõjutab väga suurel määral seda, kuidas ökosüsteemid reageerivad lisandunud toitainetele. Seejärel on vajalik kaardistada selliste põhjakoosluste ruumilist paiknemist, millel on suur looduslik toitainete ärastamise potentsiaal (nt. balti lamekarbi *Limecola balthica* ja söödava rannakarbi *Mytilus trossulus* kooslused). Piirkondades, kus domineerivad sellised kooslused, on looduslik kandevõime eriti suur.*

*Avamere veekogumid (Hiiu madala rannikuvesi, Soela väina rannikuvesi ja Kihelkonna lahe rannikuvesi) on väga suured ning veevahetus teiste ava-Läänemere osadega on tohutu. Samuti on nendele piirkondadele iseloomulikud ulatuslikud ja suure biomassiga söödava rannakarbi kooslused. Sellest tulenevalt pole oodata, et isegi väga intensiivse kalakasvatuse korral avaldaks selline tegevus mõõdetavat negatiivset keskkonnamõju ava-Läänemere veekogumitele. Seetõttu tuleks sumbakasvatuse praktilise mõjuindikaatorina kasutada hoopis kalafarmi alla ladestunud rohke orgaanilise ainega rikastatud ala pindala ja sellel alal määratletud ladestunud orgaanilise aine mahtu. Lisaks tuleks kaardistada põhjakoosluste iseloomu ja hapnikuga varustatust.*

*Avamere kalakasvatuse puhul ei ole oluline, et seda kompenseerivad meetmed asuksid ruumiliselt täpselt samas piirkonnas, kuna avamere intensiivse vee liikumise tingimustes on jätkusuutlikult planeeritud kalafarmide lokaalsed keskkonnamõjud enamasti tühised. Seetõttu on üldjuhul piisav, kui kompenseerivad meetmed paiknevad kalakasvatustega samas veekogumis.*

## Soovitused ja järeldused

- Käesolev uuring on tehtud Läänemere regiooni hetkel kõige keskkonnasõbralikuma kalasööda näitajaid kasutades ning tegelikkuses seda sööta ainult Läänemere kilust ja räimest veel ei valmistata. Juhul kui kalakasvanduses kasutatakse teistsugust sööta või isegi sama sööda teist partiid, tuleb emissiooniarvutusi sööda tegeliku toitainete sisalduse põhjal korrigeerida.
- Läänemere vesiviljeluse jätkusuutliku arengu toetamiseks on hädavajalik lisada HELCOM'i toitainete bilansi arvutustesse kalapüügi kaudu merekeskkonnast eemaldavad toitainete hulgad. Kalapüüki arvestava indikaatori olemasolul tuleb eelistada vaid selliseid vesiviljelusalgatusi, mis kasutavad piirkondlikust kalast valmistatud söötasid ning selle kaudu oluliselt vähendavad kalakasvatuste negatiivset keskkonnamõju. Seda tuleb aga teha selliselt, et oleks tagatud kalavarude jätkusuutlik ekspluateerimine.
- Juba täna eemaldatakse kalapüügi kaudu merekeskkonnast märkimisväärsed toitainete koguseid. Kutseline kilupüük (ICES alampiirkonnad 27-32) kalalaeva kalapüügiloa alusel eemaldas 2020. aastal Läänemerest 583,425 tonni lämmastikku ja 104,530 tonni fosforit. Eesti kalurite räimepüük (ICES alampiirkonnad 27-32) eemaldas samal ajavahemikul Läänemerest kokku 686,590 tonni lämmastikku ja 123,010 tonni fosforit. Paldiski kalakomponentide tehases kasutatakse toorainena 50% Eestis püütavast räime ja kilu püügimahust, kuid see eksporditakse Eestist välja. Samas oleks perspektiivne kasutada tehase poolt toodetud kalajahu ja -õli kalasöötade valmistamisel, kuna selle abil saab bilansiarvutuslikult vähendada kalakasvatuse lämmastiku ja fosfori emissiooni vastavalt 22,9 % ja 39 %.
- Käesoleva uurimuse kontekstis on oluline rõhutada, et nii räime kui ka kilu liikuvus meres on väga suur ja pole õigustatud toitainete bilansi arvutamise seisukohast kasutada väiksemaid ruumiühikuid kui ICES'i poolt defineeritud varuühikud. Seega kui räim on püütud Läänemere keskosa alampiirkondades 25-29 ja 32 ning seda kala kasutatakse söödana samades alampiirkondades paiknevates kalakasvatustes (Eesti perspektiivsemad

kalakasvatuspriirkonnad asuvad ava-Läänemeres), on tegemist kohalikul toorainel põhineva söödaga. Läänemerest püütud kilu on sõltumata püügipiirkonnast käsitletav kui kohalikul toorainel põhinev sööt, kuna tegemist on ühe populatsiooniga.

- Loodussõbralike kalasöötade kasutamisel on võimalik oluliselt kalakasvatuse keskkonnamõju vähendada. Nii on näiteks Blue Impact 9024 söödas sisaldavast fosforist vaid 4 % bioloogiliselt omastatav so. teistele mereorganismidele kättesaadav. Ülejäänud osa fosforist esineb hüdroksiapatiidi kujul, tegemist on bioloogiliselt mitteomastatava fraktsiooniga, mis settib merepõhja ning väljub toitainete ringlusest.
- Keskkonnahoiu seisukohast on hädavajalik kompenseerida just veesambasse jõudnud lahustunud lämmastiku ja fosfori keskkonnamõju. Meresetetesse ladestunud toitained kujutavad oluliselt väiksemat keskkonnariski ümbritsevale keskkonnale, kuna Eesti rannikumere koosluste isepuhastumisvõime potentsiaal on väga suur.
- Kalakasvatustel on väga raske piirata vees lahustuva lämmastiku emissiooni merekeskkonda, seda isegi juhul, kui kasutatakse kohalikest toormest valmistatud kalasööta. Siin on karbikasvatustel väga suur roll, et merekeskkonda vabanenud lämmastikku 100% eemaldada. Karpide positiivne keskkondlik mõju on aga oluliselt suurem, kui pelgalt karpidesse ladestatud toitainete hulk. Mujal Läänemeres juba käsitletaksegi karbikasvatuse kui biogeenseid filtreid, mis parandavad keskkonda ka siis, kui karpe kasvatusest ei eemaldata. Sellest tulenevalt on põhjendatud kasutada karpide filtreerimise määra karbikasvatuse kompenseeriva mõju arvutamisel.
- Rakendades karbikasvatust kompensatsioonimeetmena ning kasutades kohaliku kala söödas toimub bilansiarvutuslikult merekeskkonna puhastamine fosforist, kuna karpide ja kaladega eemaldatakse merekeskkonnast rohkem toitaineid, kui neid sinna söödaga lisatakse.
- On oluline rõhutada, et sumbakasvatuse negatiivset keskkonnamõju aitab oluliselt vähendada õigesti valitud kalafarmi suurus, asukoht ja hooldus. Mõistlike kalakasvatuse mahtude määratlemise peab lähtuma piirkonna keskkonnaseisundist, hoovuste intensiivsusest ja vee viibeajast piirkonnas. Sumbakasvatuste planeerimine tuleb teha selliselt, et see tegevus ei halvendaks veekogude seisundit. Kuna avamere veekogumid (Hiiu madala rannikuvesi, Soela väina rannikuvesi ja Kihelkonna lahe rannikuvesi) on väga suured ning veevahetus teiste ava-Läänemere osadega on tohutu, siis isegi väga intensiivse kalakasvatuse korral ei ole oodata, et selline tegevus avaldaks mõõdetavat negatiivset keskkonnamõju ava-Läänemere veekogumitele. Seetõttu tuleks sumbakasvatuse praktilise mõjuindikaatorina kasutada hoopis kalafarmi alla ladestunud rohke orgaanilise ainega rikastatud ala pindala ja sellel alal määratletud ladestunud orgaanilise aine mahtu. Lisaks tuleks kaardistada põhjakoosluste iseloomu ja hapnikuga varustatust. Merepõhja filmimine farmi ümbritseval merealal võimaldab näha sulfaate redutseerivate bakterite olemasolu, mis omakorda näitab muule elustikule ebasoodsate (hapnikuvaeste) tingimuste olemasolu. Sellise hapnikuvaese mereala pindala koos sumba alla ladestunud orgaanikarikka sette mahuga näitab kalakasvatuse keskkonnamõju tegelikku määra.

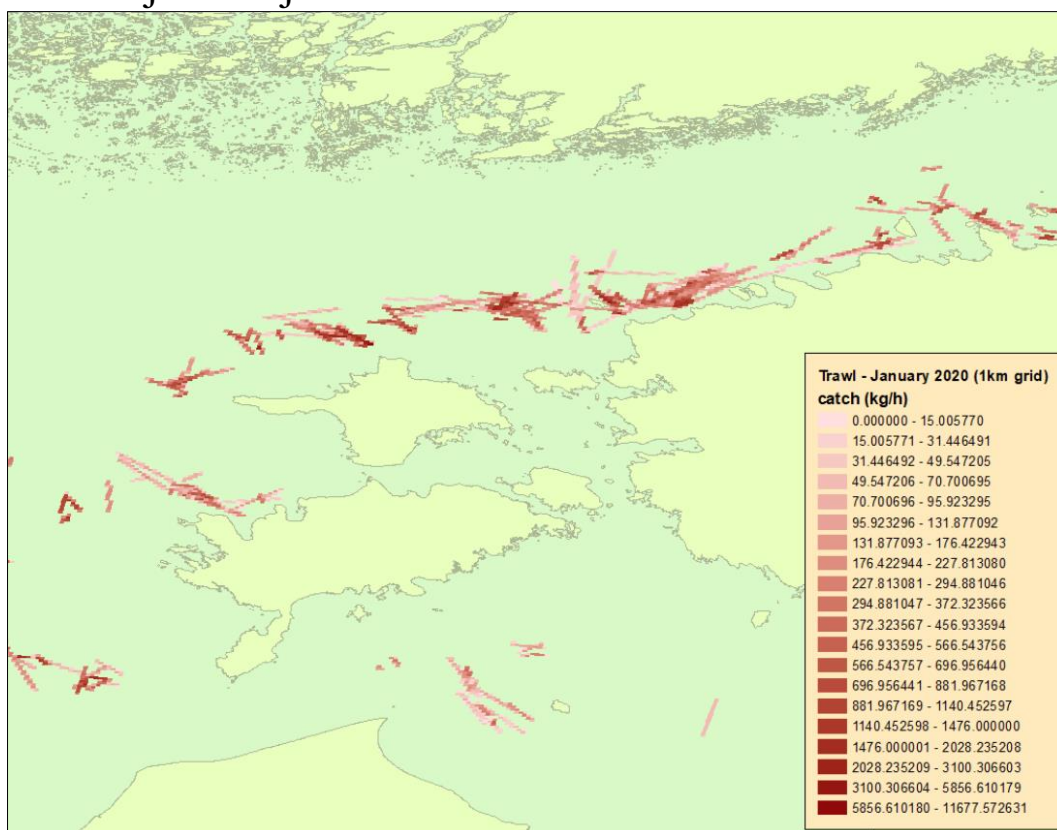
## Viited

- Chen, Z.; Snow, M.; Lawrence, C. S.; Church, A. R.; Narum, S. R.; Devlin, R. H.; Farrell, A. P. 2015. Selection for upper thermal tolerance in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss* Walbaum). *The Journal of Experimental Biology*, 218, 803–812.
- EKK. 2021. Eesti Kalatootjate Keskühistu. <https://www.teatmik.ee/et/personlegal/12939745-Eesti-Kalatootjate-Kesk%C3%BChistu>
- Eriksson, S.; Langeland, M.; Wikberg, D.; Nilsson, J.; Snuttan Sundell, K. 2017. Overview of farming techniques for aquaculture in Sweden – environmental impact, production systems, species and feeds. Swedish Agency for Marine and Water Management.
- Euroopa Komisjon. 2021. Komisjoni teatis Euroopa Parlamendile, Nõukogule, Euroopa Majandus- ja Sotsiaalkomiteele ning Regioonide Komiteele. ELi vesiviljeluse kestlikkuse ja

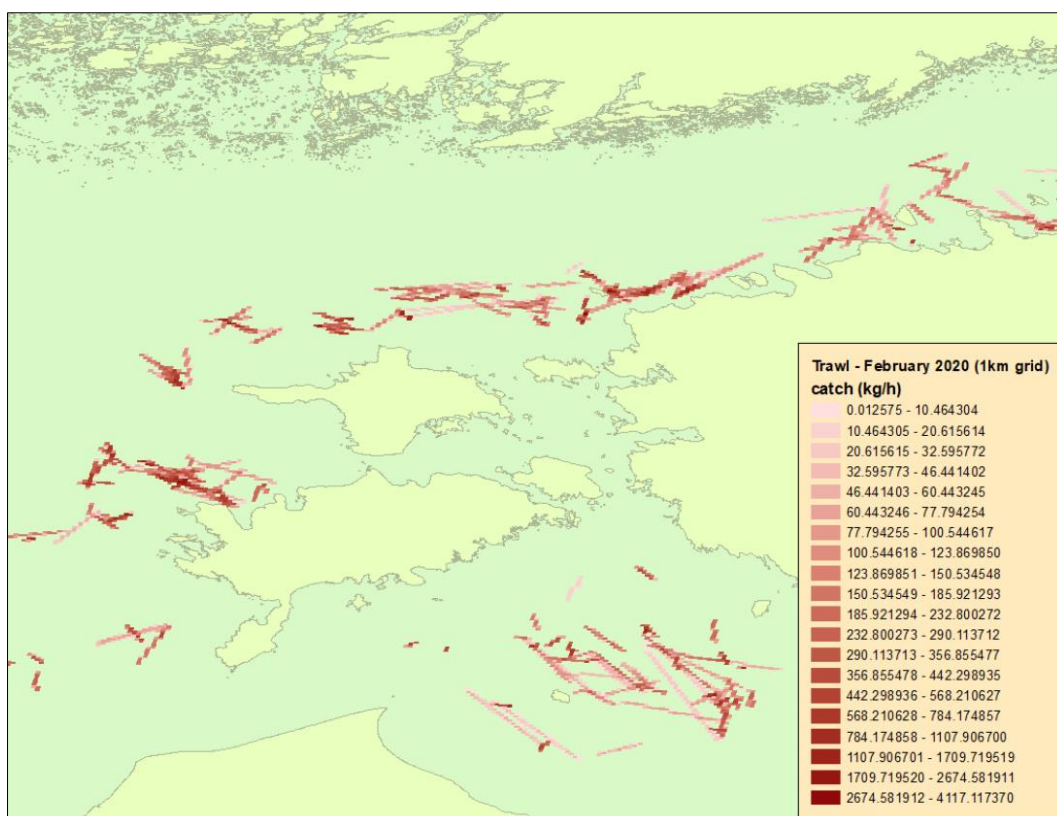
- konkurentsivõime suurendamise strateegilised suunised aastateks 2021–2030. Brüssel, 12.5.2021 COM(2021) 236 final.
- FAO. 2020. The State of World Fisheries and Aquaculture 2020. Sustainability in action. Rome.
- Filgueira, R.; Guyondet, T.; Comeau, L. A.; Grant, J. 2014. A fully-spatial ecosystem-DEB model of oyster (*Crassostrea virginica*) carrying capacity in the Richibucto Estuary, Eastern Canada. *Journal of Marine Systems*, 136, 42–54.
- Hjerne, O.; Hansson, S. 2002. The role of fish and fisheries in Baltic Sea nutrient dynamics. *Limnology and Oceanography*, 47, 1023–1032.
- Holmer, M. (2010). Environmental issues of fish farming in offshore waters: perspectives, concerns and research needs. *Aquaculture Environment Interactions*, 1, 57–70.
- ICES, 2020. Baltic Sea ecoregion – Fisheries overview 2020. <https://www.ices.dk/sites/pub/Publication%20Reports/Advice/2020/2020/FisheriesOverview%20BalticSea%202020.pdf>
- Kooijman, B.; Augustine, S.; Sadoul, B.; Zimmer, E. 2017. AmP *Oncorhynchus mykiss*, version 2017/10/30.
- Kooijman, S. A. L. M. 1986. Energy budgets can explain body size relations. *Journal of Theoretical Biology*, 121, 269–282.
- Kooijman, S. A. L. M. 1988. The von Bertalanffy growth rate as a function of physiological parameters: a comparative analysis. In: Hallam, G.T.; Gross, J.L.; Levin, A.S. (eds.). *Mathematical Ecology Proceedings Of The Autumn Course Research Seminars International Ctr For Theoretical Physics*. pp. 3–45. ISBN 9789814696777.
- Kooijman, S. A. L. M. 2000. *Dynamic energy and mass budgets in biological systems*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. ISBN 9780521786089. OCLC 42912283 (<https://www.worldcat.org/oclc/42912283>).
- Kooijman, S. A. L. M. 2010. *Dynamic energy budget theory for metabolic organisation*. Cambridge university press.
- Kotta, J., Kotta, I., Simm, M., Pöllupüü, M. 2009. Separate and interactive effects of eutrophication and climate variables on the ecosystem elements of the Gulf of Riga. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 84, 509–518.
- Kotta, J.; Futter, M.; Kaasik, A.; Liversage, K.; Rätsep, M.; Barboza, F.R.; Bergström, L.; Bergström, P.; Bobsien, I.; Díaz, E.; Herkül, K.; Jonsson, P.R.; Korpinen, S.; Kraufvelin, P.; Krost, P.; Lindahl, O.; Lindegarh, M.; Lyngsgaard, M.M.; Mühl, M.; Sandman, A.N.; Orav-Kotta, H.; Orlova, M.; Skov, H.; Rissanen, J.; Šiaulys, A.; Vidakovic, A.; Virtanen, E. 2020. 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. *STOTEN*, 709, 136144.
- 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(8): e0136949.
- Kotta, J.; Orav-Kotta, H.; Jänes, H.; Hummel, H.; Arvanitidis, C.; van Avesaath, P.; Bachelet, G.; Benedetti-Cecchi, L.; Bojanic, N.; Como, S.; Coppa, S.; Coughlan, J.; Crowe, T.; Dal Bello, M.; Degraer, S.; Juanes de la Pena, J. A.; Fernandes de Matos, V. K.; Espinosa, F.; Faulwetter, S.; Frost, M.; Guinda, X.; Jankowska, E.; Jourde, J.; Kerckhof, F.; Lavesque, N.; Leclerc, J-C.; Magni, P.; Pavloudi, C.; Pedrotti, M. L.; Peleg, O.; Pérez-Ruzafa, A.; Puente, A.; Ribeiro, P.; Rilov, G.; Rousou, M.; Ruginis, T.; Silva, T.; Simon, N.; Sousa-Pinto, I.; Troncoso, J.; Warzocha, J.; Weslawski, J. M. 2017. Essence of the patterns of cover and richness of intertidal hard bottom communities: a pan-European study. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 97, 525–538.
- Kotta, J.; Wernberg, T.; Jänes, H.; Kotta, I.; Nurkse, K.; Pärnoja, M.; Orav-Kotta, H. 2018. Novel crab predator causes marine ecosystem regime shift. *Scientific Reports*, 8, 4956.
- Lavaud, R.; Filgueira, R.; Augustine, S. 2021. The role of Dynamic Energy Budgets in conservation physiology. *Conservation Physiology*, 9, coab083.

- Lavaud, R.; La Peyre, M. K.; Casas, S. M.; Bacher, C.; La Peyre, J. F. 2017. Integrating the effects of salinity on the physiology of the eastern oyster, *Crassostrea virginica*, in the northern Gulf of Mexico through a Dynamic Energy Budget model. *Ecological Modelling*, 363, 221–233.
- Lika, K.; Kearney, M. R.; Freitas, V.; van der Veer, H. W.; van der Meer, J.; Wijsman, J. W.; Pecquerie, L.; Kooijman, S. A. 2011. The “covariation method” for estimating the parameters of the standard Dynamic Energy Budget model I: Philosophy and approach. *Journal of Sea Research*, 66, 270–277.
- Maar, M.; Saurel, C.; Landes, A.; Dolmer, P.; Petersen, J. K. 2015. Growth potential of blue mussels (*M. edulis*) exposed to different salinities evaluated by a Dynamic Energy Budget model. *Journal of Marine Systems*, 148, 48–55.
- Marques, G. M.; Augustine, S.; Lika, K.; Pecquerie, L.; Domingos, T.; Kooijman, S. A. L. M. 2018. The AmP project: comparing species on the basis of dynamic energy budget parameters. *PLoS Computational Biology*, 14, e1006100.
- Monaco, C. J.; McQuaid, C. D. 2018. Applicability of Dynamic Energy Budget (DEB) models across steep environmental gradients. *Scientific Reports*, 8, 16384.
- PTA, 2021. Põllumajandus- ja Toiduamet. Püügistatistika. <https://pta.agri.ee/ettevotjale-tootjale-ja-turustajale/kutseline-kalapuuk/puugistatistika#item-2>
- Roberts, E. A.; Kooijman, B. 2019. AmP *Mytilus trossulus*, version 2019/03/16.
- Stavrakidis-Zachou, O.; Papandroulakis, N.; Lika, K. 2018. A DEB model for European sea bass (*Dicentrarchus labrax*): Parameterisation and application in aquaculture. *Journal of Sea Research*, 143, 262–271.
- Tartu Ülikool, 2021a. Riikliku kalanduse andmekogumise programmi täitmine. Töövõtulepingu 4-1/20/3, lõpparuanne 2020 aasta kohta Osa: Akustilised uuringud, räim ja kilu.
- Tartu Ülikool, 2021b. Mereseire 2020. a. aruanne. Osa II Rannikumere seire. TÜ Eesti Mereinstituut, Hankeleping: 4-3/20/8.
- Tartu Ülikool, 2021c. Karbikasvatuse lahenduse loomine kogu väärtusahela ulatuses. Euroopa Merendus- ja Kalandusfondi (EMKF) rakenduskava 2014-2020 meede 2.1 “Vesiviljeluse innovatsioonitoetus”. Tegevusaruanne 1. Projekti viitenumber 821020790007.
- Timmermann, K.; Maar, M.; Bolding, K.; Larsen, J.; Windolf, J.; Nielsen, P.; Petersen, J. 2019. Mussel production as a nutrient mitigation tool for improving marine water quality. *Aquaculture Environment Interactions*, 11, 191–204.
- van der Meer, J.; Klok, C.; Kearney, M. R.; Wijsman, J. W. M.; Kooijman, S. A. L. M. 2014. 35 years of DEB research. *Journal of Sea Research*, 94, 1–4.

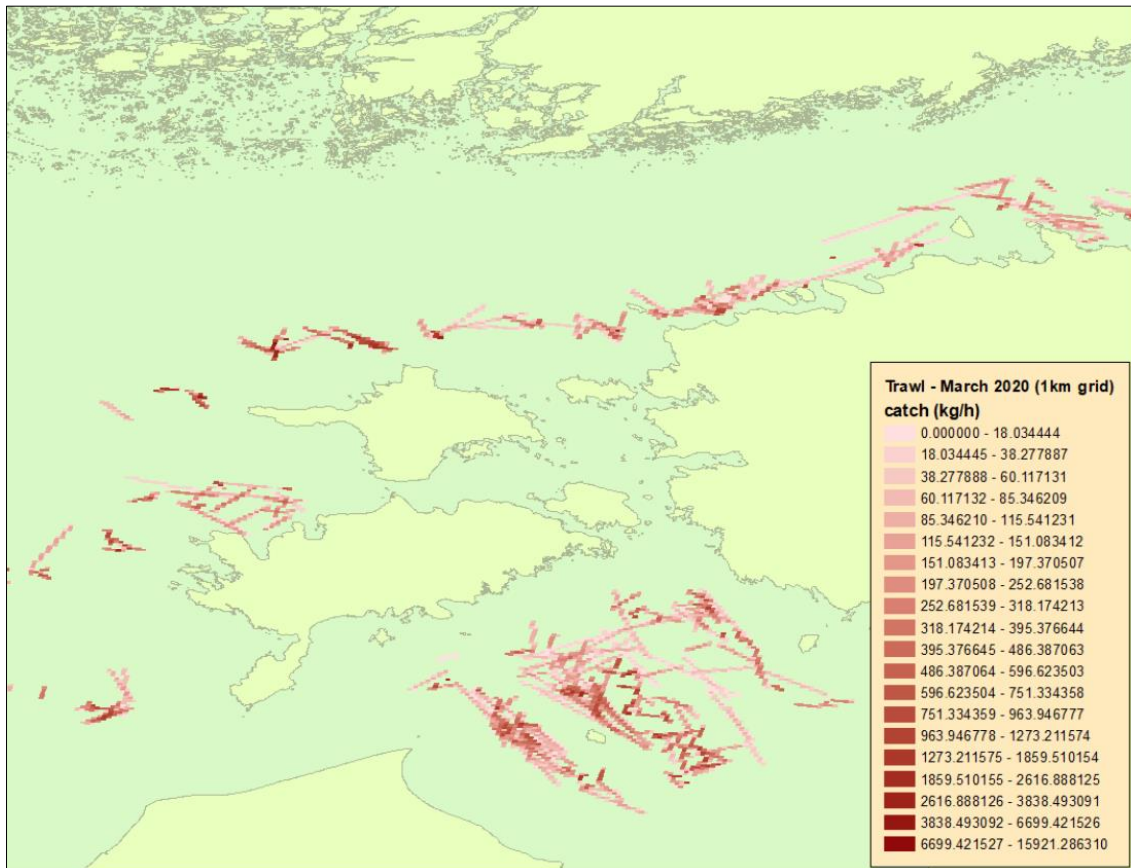
LISA 1. Eesti avamere ja Liivi lahe traalpüügi 2020. aasta igakuised summaarsed kalasaagid (kg) traaltunni kohta. Alusandmed pärinevad Põllumajandus- ja Toiduametist.



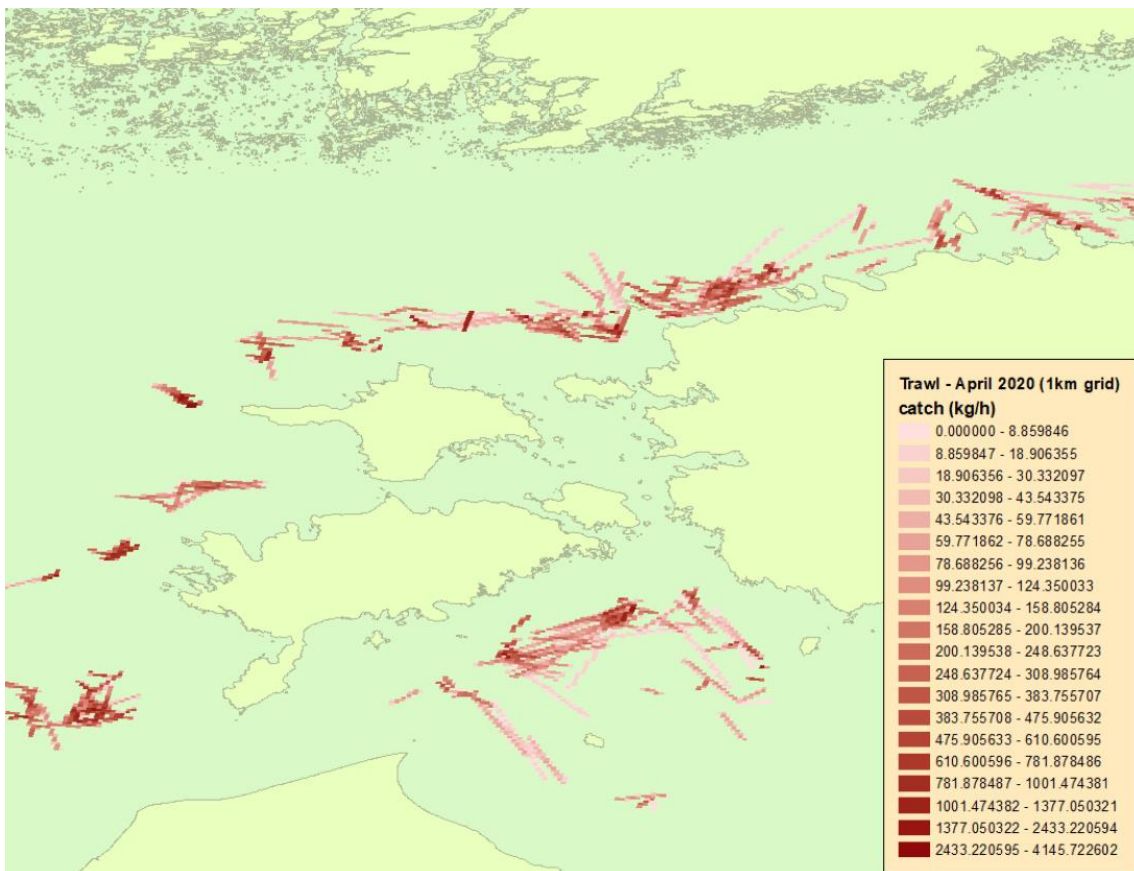
Lisa 1.1. Eesti avamere ja Liivi lahe traalpüügi 2020. aasta jaanuarikuu summaarne kalasaak (kg) traaltunni kohta. Analüüsi ruumiline lahutus on 1 × 1 km.



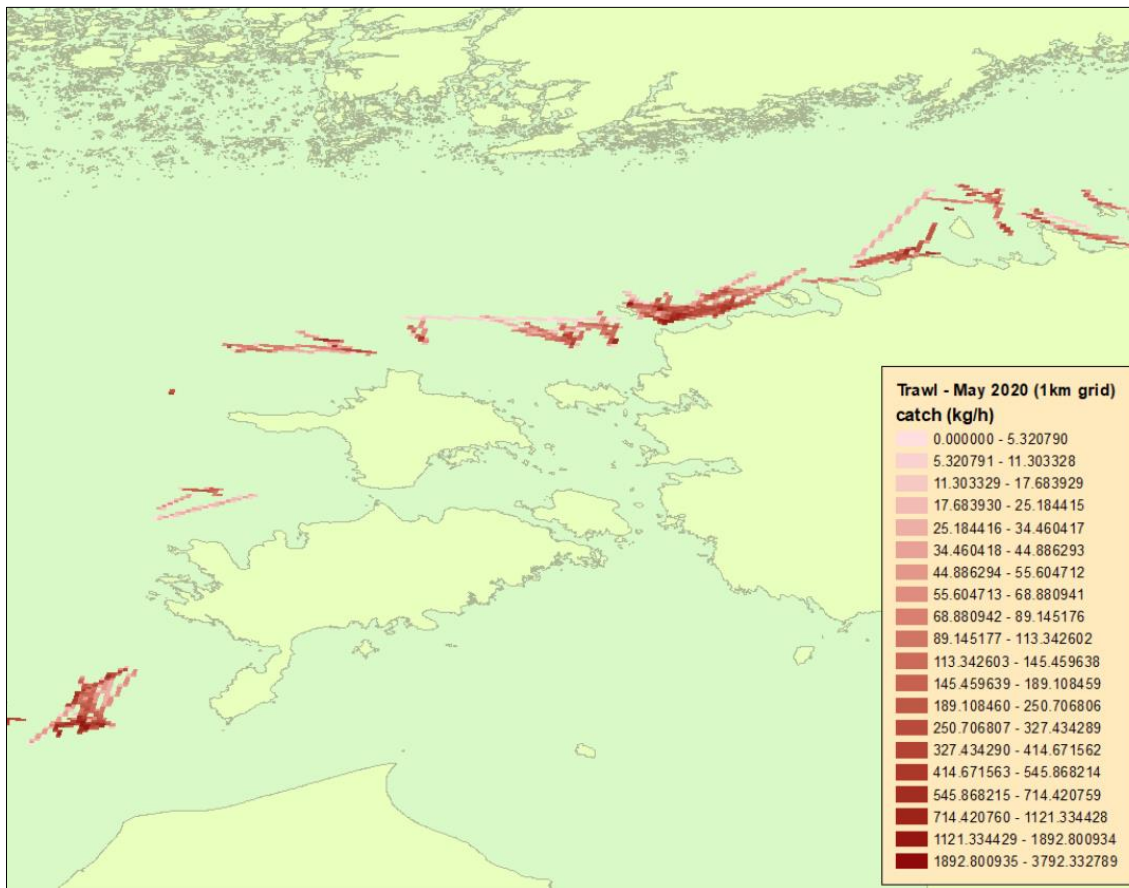
Lisa 1.2. Eesti avamere ja Liivi lahe traalpüügi 2020. aasta veebruarikuu summaarne kalasaak (kg) traaltunni kohta. Analüüsi ruumiline lahutus on 1 × 1 km.



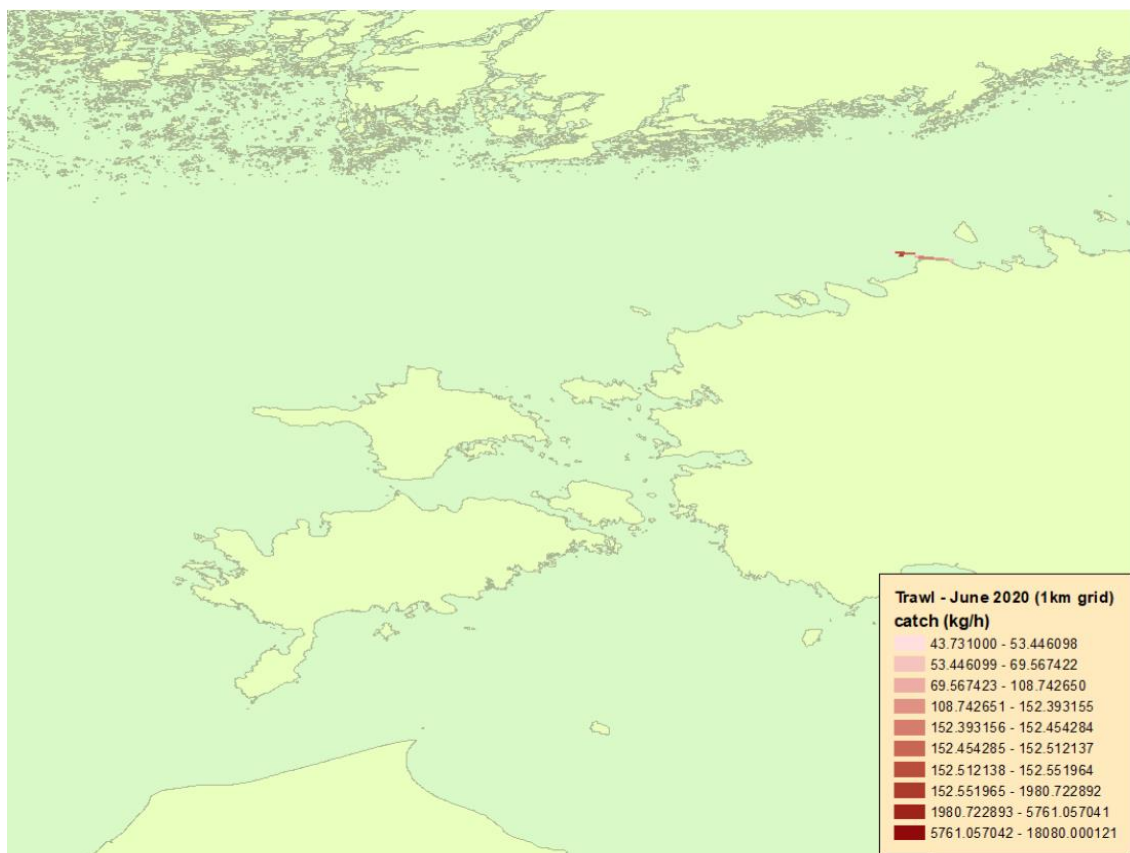
Lisa 1.3. Eesti avamere ja Liivi lahe traalpüügi 2020. aasta märtsikuu summaarne kalasaak (kg) traaltunni kohta. Analüüsi ruumiline lahutus on 1 × 1 km.



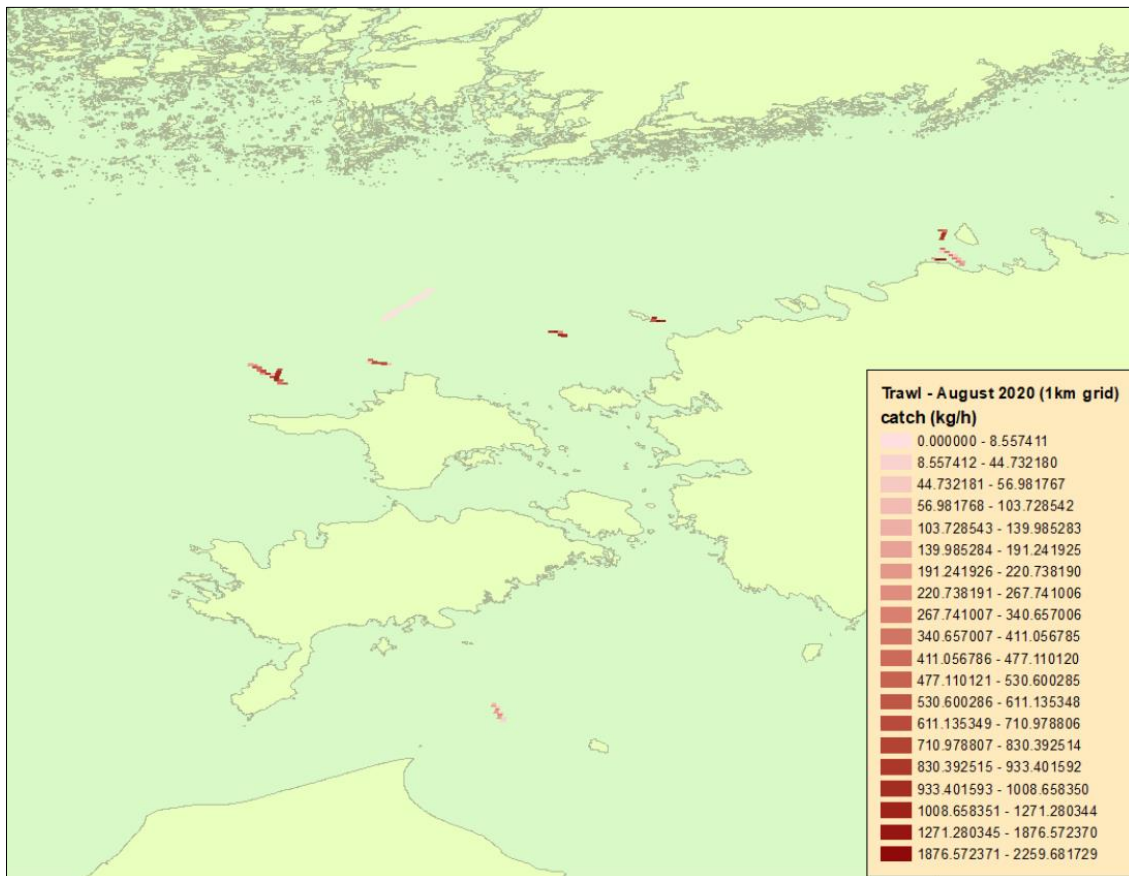
Lisa 1.4. Eesti avamere ja Liivi lahe traalpüügi 2020. aasta aprillikuu summaarne kalasaak (kg) traaltunni kohta. Analüüsi ruumiline lahutus on 1 × 1 km.



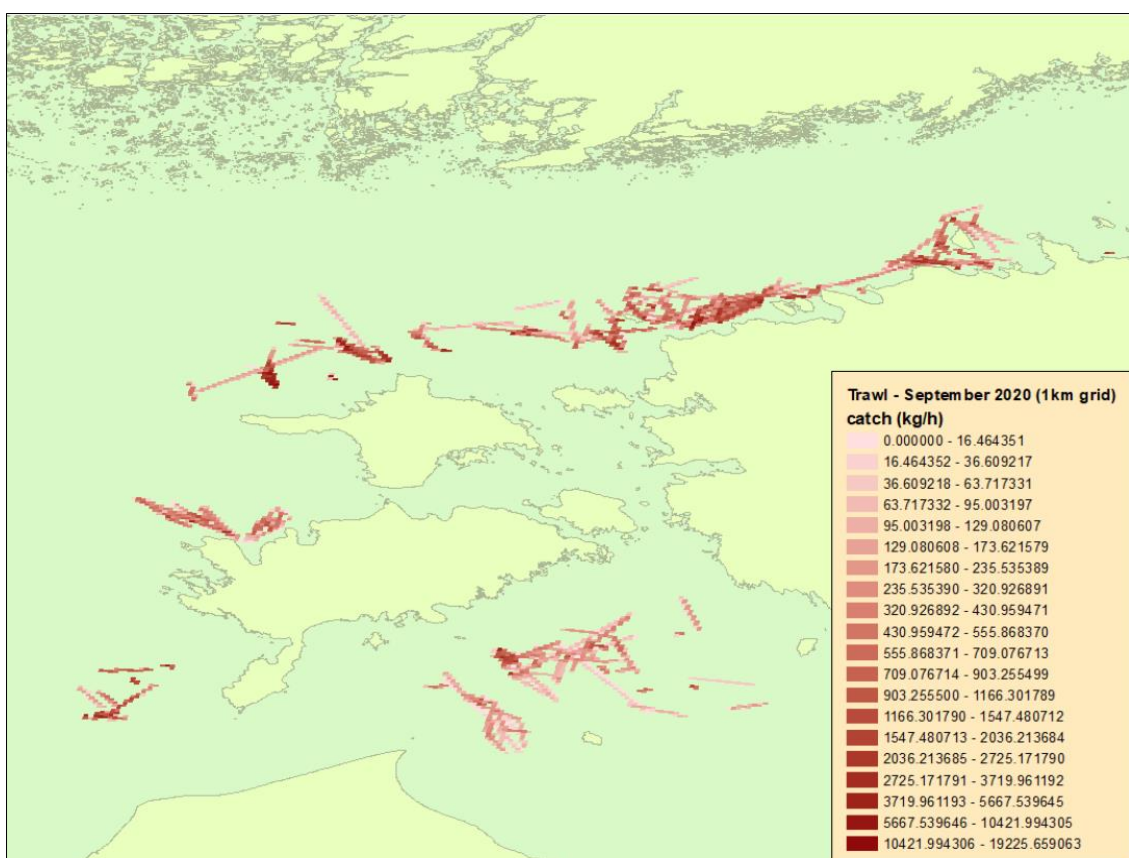
Lisa 1.5. Eesti avamere ja Liivi lahe traalpüügi 2020. aasta maikuu summaarne kalasaak (kg) traaltunni kohta. Analüüsi ruumiline lahutus on 1 × 1 km.



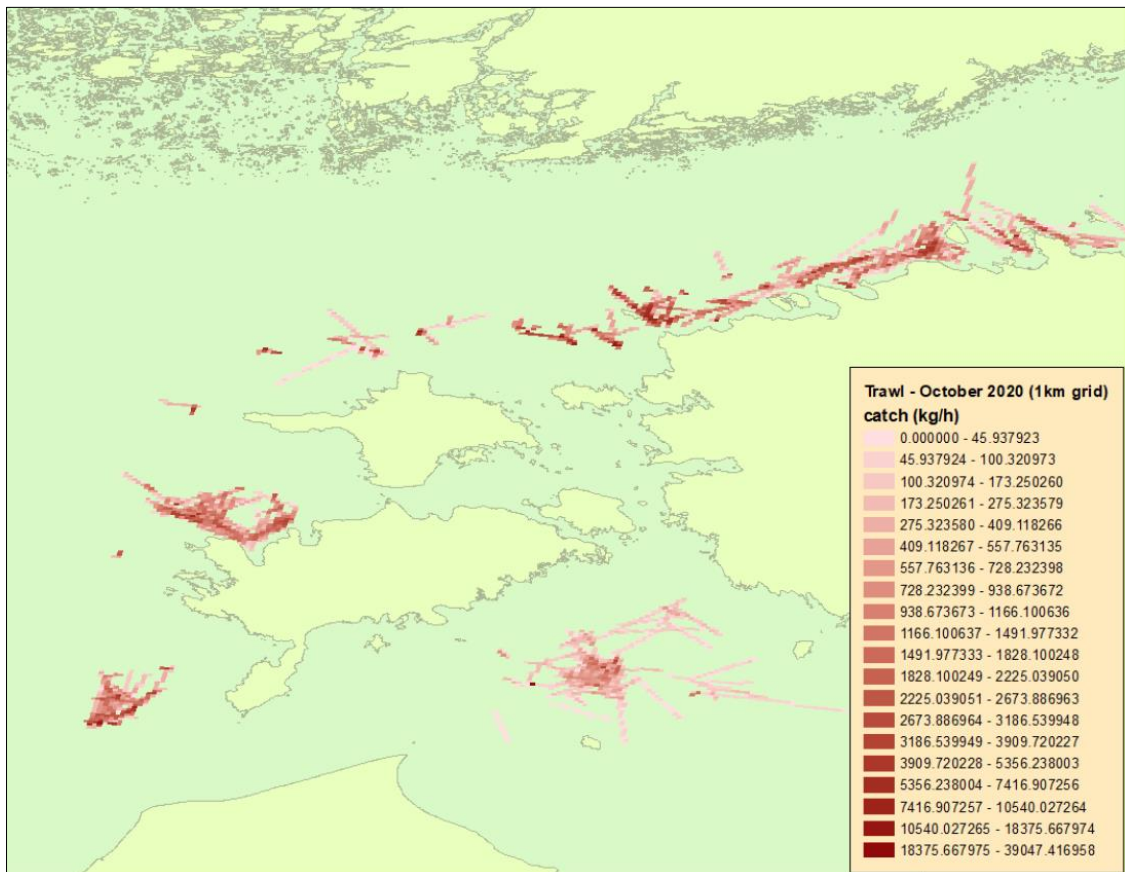
Lisa 1.6. Eesti avamere ja Liivi lahe traalpüügi 2020. aasta juuniku summaarne kalasaak (kg) traaltunni kohta. Analüüsi ruumiline lahutus on 1 × 1 km.



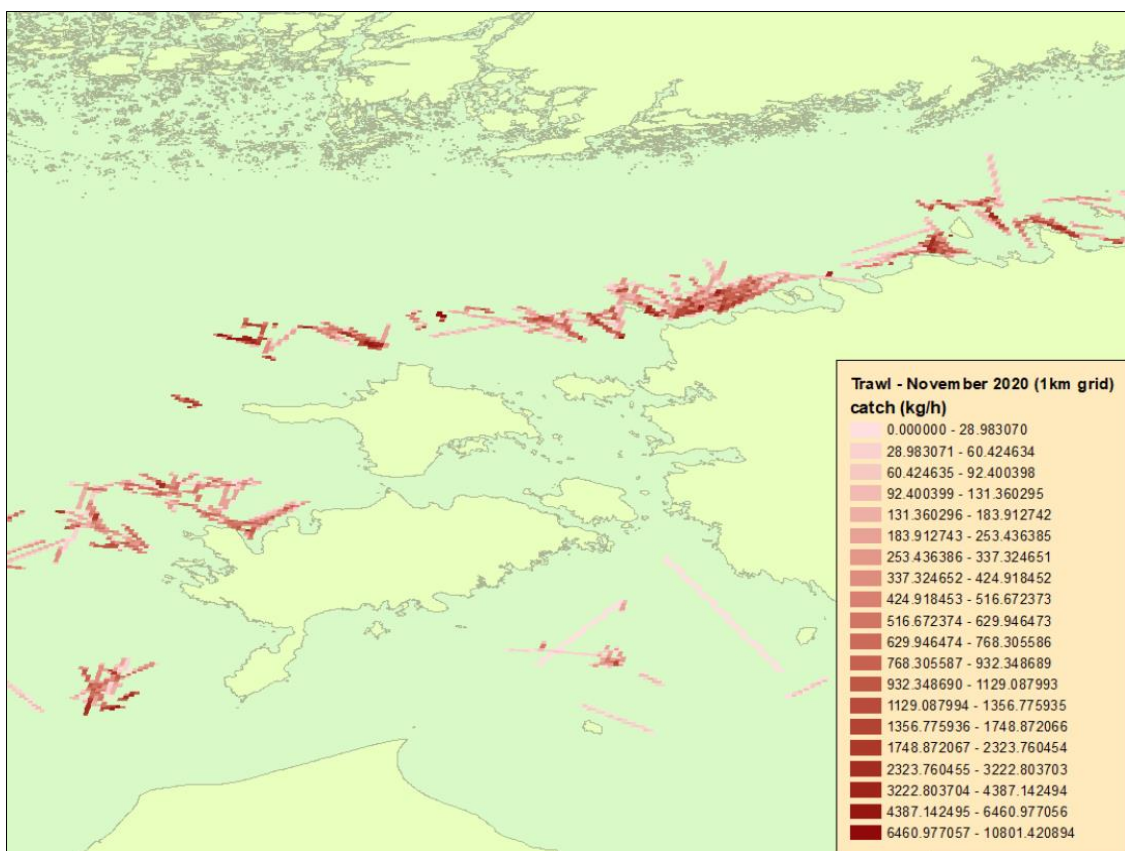
Lisa 1.7. Eesti avamere ja Liivi lahe traalpüügi 2020. aasta augustikuu summaarne kalasaak (kg) traaltunni kohta. Analüüsi ruumiline lahutus on  $1 \times 1$  km.



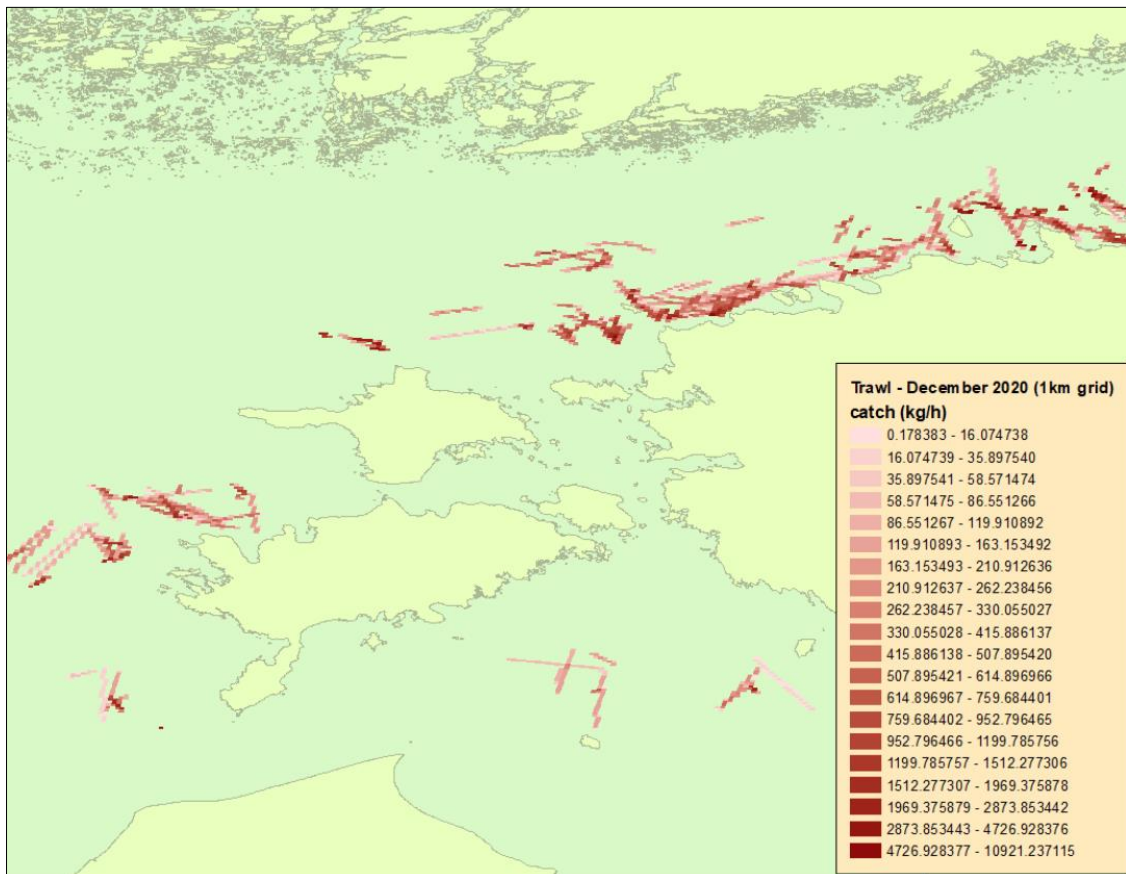
Lisa 1.8. Eesti avamere ja Liivi lahe traalpüügi 2020. aasta septembrikuu summaarne kalasaak (kg) traaltunni kohta. Analüüsi ruumiline lahutus on  $1 \times 1$  km.



Lisa 1.9. Eesti avamere ja Liivi lahe traalpüügi 2020. aasta oktoobrikuu summaarne kalasaak (kg) traaltunni kohta. Analüüsi ruumiline lahutus on  $1 \times 1$  km.



Lisa 1.10. Eesti avamere ja Liivi lahe traalpüügi 2020. aasta novembrikuu summaarne kalasaak (kg) traaltunni kohta. Analüüsi ruumiline lahutus on  $1 \times 1$  km.



Lisa 1.11. Eesti avamere ja Liivi lahe traalpüügi 2020. aasta detsembrikuu summaarne kalasaak (kg) traaltunni kohta. Analüüsi ruumiline lahutus on 1 × 1 km.