

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

Loodusteaduskond

Meresüsteemide instituut

**HAPNIKU DEFITSIIDIGA ALA SUURUS JA DÜNAAMIKA
SOOME LAHES**

Bakalaureusetöö

Oliver Samlas

Juhendaja: Stella-Theresa Stoicescu, MSc

Tallinn

2017

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus ning kinnitan, et esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Kinnitan, et antud töö koostamisel olen kõikide teiste autorite seisukohtadele, probleemipüstitustele, kogutud arvandmetele jmt viidanud.

Oliver Samlas

(allkiri ja kuupäev)

Juhendaja: *Stella-Theresa Stoicescu*

Töö vastab bakalaureusetööle/magistritööle esitatavatele nõuetele.

(allkiri ja kuupäev)

Kaitsmiskomisjoni esimees:

Lubatud kaitsmisele

.....

(nimi, allkiri, kuupäev)

SISUKORD

1. SISSEJUHATUS.....	4
1.1. Läänemeri ja eutrofeerumine	4
1.2. Merekeskkonnaseisundi hindamine.....	5
1.3. Töö eesmärk.....	6
2. TEOREETILINE OSA	7
2.1. Läänemere veevahetus	7
2.2. Eutrofeerumine ja selle hindamine	8
2.3. Soome lahe iseloomustus ja hapnikutingimuste sesoonne käik.....	10
2.4. Kliima muutumise aspekt.....	11
2.5. Merekeskkonna eutrofeerumise seisundi hindamine kasutades vees lahustunud hapniku andmeid	11
3. ANDMED JA METOODIKA.....	13
3.1. CTD andmete kogumine ja algtöötlus	13
3.2. Hüpsilise kihi minimaalne sügavus veesambas	15
3.3. Hüpsilise ala suuruse leidmine.....	16
4. TULEMUSED	19
4.1. Hüpsilise kihi sügavus	19
4.2. Hüpsiline kiht ruumis.....	20
4.3. Hüpsilise ala dünaamika ajas	24
5. ARUTELU JA JÄRELDUSED	28
5.1. Soome lahe hapnikutingimused valitud perioodil	28
5.2. Hüpsilise ala suurus.....	29
KOKKUVÕTE.....	31
ABSTRACT	32
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU.....	34

1. SISSEJUHATUS

1.1. Läänemeri ja eutrofeerumine

Läänemere keskkonnaseisundit mõjutab eutrofeerumine, mis saab alguse suurenenud toitainete koguste sissevoolust veekogusse. Toitainete, lämmastiku ja fosfori, liig veekogus põhjustab fütoplanktoni õitsenguid, millele järgneb vee läbipaistvuse ja põhjataimestiku esinemissügavuse vähenemine (HELCOM 2017a).

Läänemere sügavamates osades, kus esineb pikaajaline veemasside kihistatus, akumulereb basseini alumistesse kihtidesse orgaaniline aines, mille lagundamiseks kulutatakse põhjakihtides leiduvat hapnikku. Fütoplanktoni biomassi lagundamise ja kihistatuse koosmõjul võib põhjalähedastes kihtides tekkida hapnikuvaegus ehk hüpoksia. Hüpoksia võib asendada anoksiaga (hapniku puudumine) piirkondades, kus ei esine piisavat veevahetust (HELCOM 2009).

Üldiselt loetakse hüpoksia piiriks hapnikutaseme langemist alla 2.8-3.4 ml/l (4- 4.8 mg/l) ja äge hüpoksia on tavaliselt 1,4 - 2,1 ml/l (2-3 mg/l) vahel (Hansson & Andersson 2015). Piirina kasutatakse ka väärtust 2.0 mg/l, kuna sellisel piirväärtusel hakkab hüpoksia kalakooslusi letaalselt mõjutama.. Uuringud on aga näidanud, et 2.0

mg/l on osadele liikidele allpool empiirilist letaalset või subletaalset piiri. Seega erinevate koosluste erineva hüpoksia taluvuse tõttu kasutatakse enamjaolt hüpoksiliste tingimuste piiritlemisel kahte piirväärtust, $O_2 = 2,0$ mg/l ja $O_2 = 2,9$ (2,0 ml/l) (Vaquer-Sunyer & Duarte 2008).

Kuna Läänemerd iseloomustab pikaajaline veemasside kihistatus, piiratud veevahetus ava-ookeaniga (madalad Taani väinad) ja (nüüd küll juba vähenev) toitainete sissekanne jõgedest, on Läänemeri siiski kergesti mõjutatud eutrofeerumise poolt (HELCOM 2009).

Merekeskkonna eutrofeerumine mõjutab ka sealset bioloogilist mitmekesisust, limiteerides põhjaelustiku esinemissügavust hüpoksiliste alade laienemise tõttu ja mõjutades terveid toiduahelaid läbi potentsiaalselt toksiliste tsüanobakterite õitsengute (HELCOM 2009). Hapnikutingimuste halvenemisega võib väheneda ka kalasaagikus, millel on juba otsene mõju inimese toidulauale (Carstensen et al. 2014).

1.2. Merekeskkonnaseisundi hindamine

Läänemere avaosa keskkonnaseisundi hindamist viib läbi ja koordineerib HELCOM (*Baltic Marine Environment Protection Commission - Helsinki Commission*). HELCOM koostab regulaarselt temaatilisi ja terviklikke merekeskkonnaseisundi eutrofeerumise hinnanguid, et saada ülevaade eutrofeerumist iseloomustavate parameetrite hetkeväärtustest ja ka pikaajalistest trendidest. Seisundi hinnanguteks

kasutatakse liikmesriikide poolt kogutud seireandmeid. Seisundi hinnangu eesmärgiks on tuvastada tekkivaid keskkonnaprobleeme ja anda alus erinevate meetmete koostamiseks, mis aitaksid taastada Läänemere üldist head keskkonnaseisundit ja ökosüsteemi (HELCOM 2017d).

HELCOM kasutab eutrofeerumise hindamisel erinevaid, liikmeriikide poolt kinnitatud, tuumindikaatoreid, mis iseloomustavad merekeskkonna toitainete ja klorofüll-a sisaldust, vee läbipaistvust ning vees lahustunud hapnikusisaldust (HELCOM 2017b).

Hapnikutingimuste hindamiseks kasutatakse HELCOMis halokliini aluse hapnikudefitsiidi tuumindikaatorit (*Oxygen debt*), mille rakendusala on piiratud sügavamate Läänemere piirkondadega, kus moodustub halokliin (Pyhälä et al. 2014). Hetkel puudub universaalne, üle kogu Läänemere rakendatav hapniku indikaator, mida saaks kasutada eutrofeerumise seisundi hinnangutes.

1.3. Töö eesmärk

Töö eesmärk on leida hüpoksilise ala suurus Soome lahes, kasutades kahte erinevat piirväärtust hapnikuvaeguse defineerimiseks. Teema aktuaalsus seisneb selles, et Läänemere avaosa eutrofeerumise hindamise jaoks puudub hetkel kõikides basseinides kasutatav universaalne hapniku indikaator.

2. TEOREETILINE OSA

2.1. Läänemere veevahetus

Läänemeri on maailmas üks suuremaid riimveelisi veekogusid, mida iseloomustab piiratud veevahetus ookeaniga läbi kitsaste ja madalate Taani väinade. Läänemerd mõjutab ka suur magevee sissevool jõgedest, 1950 kuni 2014 aasta keskmine sissevooluhulk oli $14381 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (Johansson 2017). Eelnevast tulenevalt iseloomustab Läänemerd soolsuse kahekihiline stratifikatsioon, mis takistab veemasside vertikaalset segunemist (Andrejev et al. 2004).

Oma piiratud veevahetuse tõttu ookeaniga ja pika vee viibeajaga on Läänemeri aldis hüpoksiliste tingimuste tekkimisele. Põhja-Atlandi soolasem ja tihedam vesi toob küll uusi hapnikuvarusid sügavamatesse kihtidesse, kuid samal ajal suurendab ka stratifikatsiooni mis omakorda suurendab hüpoksiat kogevat ala. Selline hapnikuga varustamine on eelkõige tingitud suurematest kõrgema soolsusega sissevooludest ($>17 \text{ PSU}$ – ühikuta suurus, ligikaudu sama mis g/kg) (MBI - *Major Baltic Inflows*), mis on viimase kolmekümne aastaga harvemaks muutunud (Carstensen et al. 2014). Viimane tugevaim toimus detsembris aastal 2014. Vaatluste ja mudelite põhjal võis

öelda, et see oli üks väga haruldastest tugevatest sissevooludest. Nimestiku põhjal, mida on koostatud alates aastast 1880, oli 2014-nda aasta MBI tugevuselt kolmas koos 1913.nda aasta MBI-ga (Mohrholz et al. 2015).

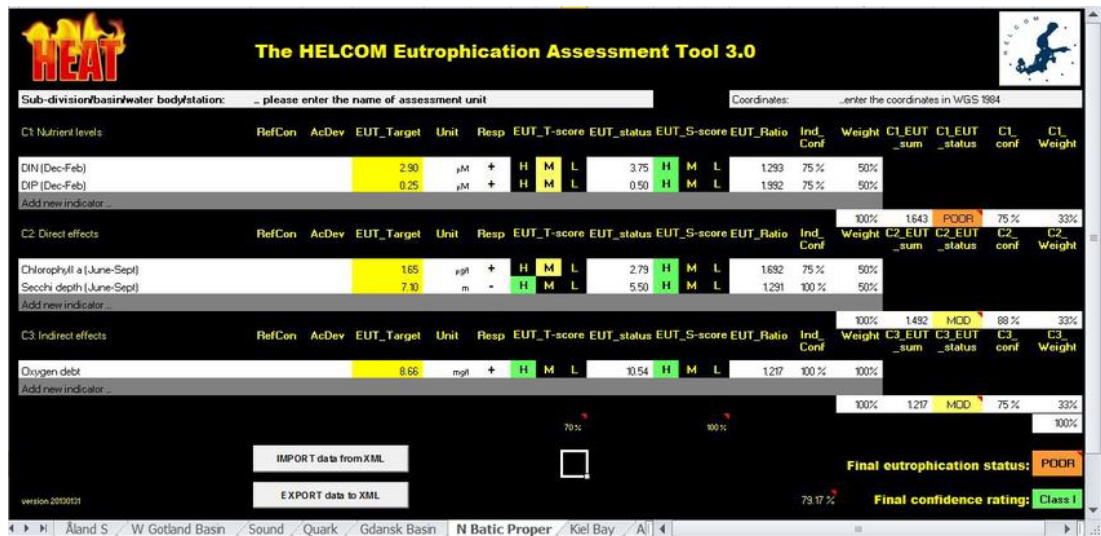
2.2. Eutrofeerumine ja selle hindamine

Veekogude eutrofeerumist põhjustab peamiselt toitainete, nagu lämmastik ja fosfor, ülemäärane koormus. Liigsed toitained võivad olla pärit nii punktreaostusallikatest, nagu tööstuslikud ja erinevad olmereoveed, hajureostusallikatest, nagu põllumajandusest või reostunud pinnaseveed (Dauvin et al. 2007), kui ka atmosfäärist. Umbes veerand kogu lämmastikukoormusest on pärit atmosfäärist. Lämmastikuühendid eralduvad atmosfääri lämmastiku oksiididena, läbi laevanduse, maanteetranspordi ja energia tootmise, ja ammoniaagina, millest umbes 90% on pärit põllumajandusest. Põllumajandus moodustab 43% kogu atmosfääri lämmastikukoormusest (HELCOM 2005). Suurenenud toitainetereostust veekogudes peetakse peamiseks ohuks rannikumere ökosüsteemidele (Dauvin et al. 2007).

Toitainete sissekanne Läänemerre on vähenenud alates 1980-ndate lõpust - lämmastiku ja fosfori sissekanne kogused on perioodil 1994 kuni 2010 vähenenud vastavalt 16% ja 18%, ja praegune tase on võrdne sellega mis oli 1960-ndate alguses. Toitainete kontsentratsioonid aga ei ole vastavalt sissekandele vähenenud. Neid mõjutavad vee pikk viibeaeg, fosfori vabanemine anoksilistes tingimustes ja lämmastiku fikseerivate vetikate õitsengud (HELCOM 2014).

HELCOMis hinnatakse eutrofeerumise taset viie tuumindikaatori abil, millest igaüks keskendub ühele olulisele eutrofeerumise aspektile, milleks on vee läbipaistvus, anorgaanilise lahustunud lämmastiku, anorgaanilise lahustunud fosfori, klorofüll-a ning lahustunud hapniku kontsentratsioonid (HELCOM 2017c). Hinnangu jaoks kasutatakse indikaatorite etteantud sihtväärtuste ja mõõdetud seisundiväärtuste suhet. Sellel eesmärgil on Läänemere avaosas jagatud hinnanguüksusteks. Indikaatorid on jaotunud kolme kriteeriumi vahel - (1) toitainete sisaldus, (2) otsesed mõjud ja (3) kaudsed mõjud. Indikaatori kaal kriteeriumis määrati vastavalt indikaatori tähtsusele uuritavas sektoris. Etteantud sihtväärtused saadi HELCOMi TARGREVi (HELCOM 2013) projekti käigus kogutud andmetest. Seisundihinnang, mis arvestab kõiki indikaatoreid, saadi etteantud sihtväärtuste ja mõõdetud seisundiväärtuste võrdlemisel (HELCOM 2014).

Seisundihinnangu leidmiseks kasutatakse eutrofeerumise hinnangu tööriista HEAT 3.0-i (*Helcom Eutrophication Assessment Tool 3.0*) (HELCOM 2014) (joonis 2.2). See jagab hea keskkonnaseisundi (HKS) kaheks, (1)väga heaks ja (2)heaks klassiks, ja all-HKS-i kolmeks, (3)kesiseks (4)halvaks ja (5)väga halvaks klassiks. HEAT 3.0 on kasutatav MS Excelis ja näitab kriteeriumitesse jagatud indikaatoreid, etteantud sihtväärtusi ja mõõdetud seisundiväärtusi koos lõpliku eutrofeerumise tasemega, mis saadakse *one-out-all-out* meetodiga. Selle meetodi mõte seisneb selles, et lõplik hinnang vastab kolme kriteeriumi kõige halvemale hinnangule. Isegi kui kaks kolmest on head ja viimane halb, sõltub kogu basseini hinnang siiski viimasest.



Joonis 2.2. HEAT 3.0 kasutajaliides. (HELCOM 2014)

2.3. Soome lahe iseloomustus ja hapnikutingimuste sesoonne käik

Soome laht on pikliku kujuga estuaarne mereala, mis paikneb Läänemere kirde osas. Soome lahte suubub ida poolt Neeva jõgi, mille magevee sissevool moodustab 15% terve Läänemere sissevoolust. Lahte toimub soolase vee sissevool ava-Läänemere põhjaosast. Soome lahe ja ava-Läänemere põhjaosa kokkuleppeliseks piiriks peetakse mõttelist joont Hanko poolsaare ja Osmussaare vahel (Alenius et al. 1998). Soome lahe üldises stratifikatsioonis ja segunemises mängib olulist rolli halokliin, takistades vee vertikaalset segunemist. Soolsuse stratifikatsioon erineb suvel ja talvel. Suurenenud vertikaalse segunemise protsessid sügisel ja talvel murravad stratifikatsiooni ja uuendavad vett Soome lahe sügavamates kihtides. Põhjakihtide vee uuenemine halokliini all sõltub põhiliselt adveksioonist Ava-Läänemere

põhjaosast. Soolsuse stratifikatsioon väheneb idasuunas ning madalamates kohtades isegi kaob suure magevee sissekande tõttu Neeva jõest ja tugevast segunemisest. Selle tulemusena on soolsuse erinevus pinna ja põhja kihtide vahel 1,5 kuni 2 g/kg, samas kui suvel tugevnenud stratifikatsiooni perioodil on vahe umbes 4 g/kg (Raateoja et al. 2016).

2.4. Kliima muutumise aspekt

Kliima muutumine põhjustab suure tõenäosusega vee temperatuuri kõrgenemise, mis vähendab hapniku lahustumist, suurendab stratifikatsiooni ja magevee sissevooluhulkasid. Suurenenud magevee sissevool toob endaga kaasa rohkem toitaineid, mille tõttu suureneb primaarproduksioon ja orgaanilise materjali eksport süvavesesse, sellest tulenevalt muutuvad ka looduslikud hapnikutingimused (Rabalais et al. 2009; Carstensen et al. 2014).

2.5. Merekeskkonna eutrofeerumise seisundi hindamine kasutades vees lahustunud hapniku andmeid

Merekeskkonna eutrofeerumise seisundi hindamiseks on HELCOMis välja töötatud hapnikukao indikaator (*Oxygen debt*), mille idee seisneb hapnikutingimuste kirjeldamises halokliini aluses kihis (Pyhälä et al. 2014). Tuumindikaatorina on ta oma kasutuselal siiski mõneti piiratud, esiteks kuna indikaator on kasutatav ainult

sügavates basseinides (Bornholmi, Lääne Gotlandi ja Ida Gotlandi basseinis, Läänemere põhjaosas ning Soome lahes) ja teiseks, kuna indikaatori ajakohastamine/ümberarvutamine vajab spetsiaalseid programmeerimise ja statistilise töötamise oskusi. Madalamates vetes, kus hapnikukao indikaatorit ei saa kohaldada, ei ole veel hapnikutingimuste mõõtmiseks kokkulepitud viisi (Viktorsson 2016).

Kinnitatud hapniku tuumindikaatori piiratud kasutuse tõttu on alustatud uue indikaatori, hapnikukulu (*Oxygen consumption*), välja arendamist. Indikaatori idee seisneb selles, et leida stagneerunud vahekihi hapnikukulu allpool produktiivset pinnakihti ja seostada seda eutrofeerumisega (Viktorsson 2016). Hapnikukulu leitakse termo- ja halokliini vahelises stabiilses kihis (Wesslander et al. 2015). Kasutades rutiinse keskkonnaseire käigus kogutud suhteliselt suure aja- ja ruumisammuga andmeid, saadi väga varieeruvad tulemused. Indikaatori eutrofeerumisega sidumiseks uuriti talvise fosfori sisalduse ja suvise hapnikutarbimise korrelatsiooni, mis osutus ebaoluliseks ($r \sim -0.2$). Indikaatorite, hapnikukulu ja lahustunud anorgaaniline fosfor, vaheline korrelatsiooni puudumine võib olla põhjustatud bioloogilistest tingimustest, nagu erinev vetikate õitsengu algus aeg või orgaanilise aine lagunemishulk. (Wesslander et al. 2015).

3. ANDMED JA METOODIKA

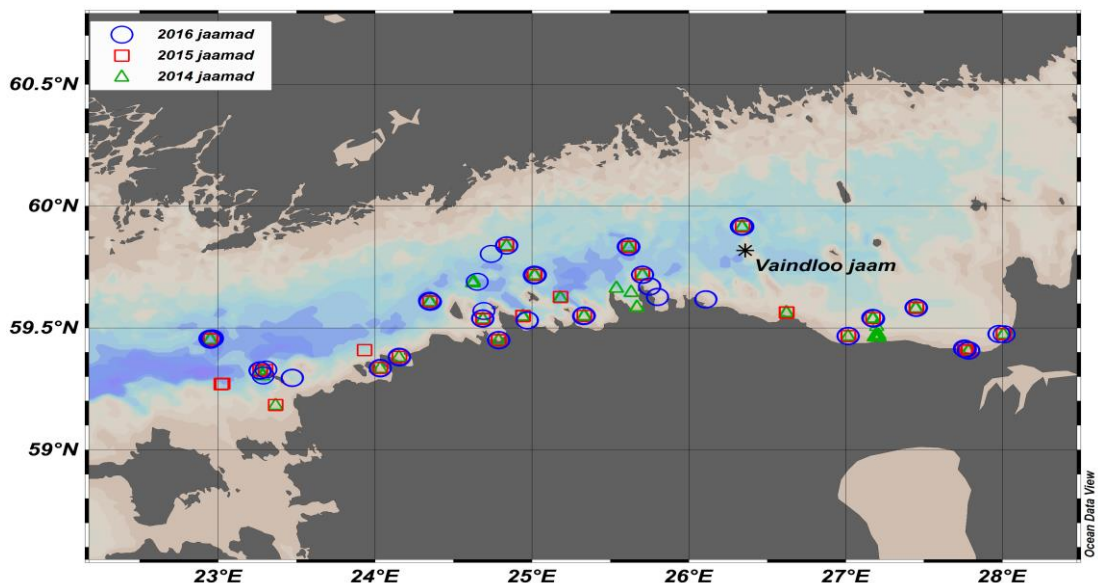
3.1. CTD andmete kogumine ja algtöötlus

CTD (*Conductivity, Temperature, Depth*) on esmane vahend merevee füüsikaliste omaduste määramiseks. See annab täpse ülevaate vee temperatuuri, soolsuse ja tiheduse variatsioonist ja jaotusest (Steele et al. 2009). Standardne lahustunud hapniku koguse määramine põhineb Winkleri meetodil mitmete modifikatsioonidega, mis põhineb reaktsioonil leeliselises keskkonnas lahustunud hapniku ja jodiidiooni vahel mangaan(II) iooni juuresolekul. Elektrokeemilised sondid kasutavad ära hapniku redutseerimist, mis tekitab voo mida väljendatakse lahustunud hapniku ekvivalentides. Koos CTD sondile lisatud hapniku anduri abil on teostatav ka lahustunud hapniku pidev profiil (HELCOM 2016).

Lahustunud hapniku kontsentratsiooni määramiseks võetakse veeproov erinevate proovide kogumise korral alati kõige esimesena. Proov võetakse batomeetrist (veeproovi kogumise seade) proovipudelisse voolikuga, mis ulatub pudeli põhjani. Vett proovipudelisse kogudes lastakse vett üle voolata mahus, mis oleks võrdne kolmekordse võetava proovi mahuga - et lükata välja vesi, mis segunes pudelis oleva

õhuga. Seejärel suletakse pudel õhutihedalt korgiga. Seejärel viiakse proovipudel laborisse, hapnikumeetrisse (OX 4000 L , tootja VWR) sisestatakse prooviga samalt sügavuselt CTD sondiga mõõdetud soolsuse väärtus (parandi arvutamiseks). Lugem hapnikumeetri ekraanilt võetakse siis, kui näit stabiliseerub. Kirja pannakse hapniku kontsentratsioon (mg/l), hapniku küllastusprotsent (%) ja temperatuur (°C) (Tallinna Tehnikaülikool Meresüsteemide instituut n.d.).

Töös kasutati Tallinna Tehnikaülikooli Meresüsteemide instituudi poolt Soome lahest kogutud CTD andmeid aastatest 2014-2016 (joonis 3.1.1), mille võtmiste periood ja andmehulgad on toodud tabelis 3.1.2. Analüüsideks kasutati CTD sondiga mõõdetud hapniku profile, mis on korrigeeritud arvestades hapniku laboratoorsete analüüside tulemusi. Eraldi analüüsiiti ka kevadperioodi (aprill – mai), suve alguse perioodi (mai – juuni), suve lõpu perioodi (juuli – august) ja kogu aktiivse produktsiooni perioodi (aprill – september).



Joonis 3.1.1. Jaamade asukohad Soome lahes.

Tabel 3.1.2. Mõõdetud profiilide arv erinevatel aastatel ja kuudel.

	2014	2015	2016	Kokku
Jaauar	19	4	0	23
Aprill	15	18	25	58
Mai	21	24	7	52
Juuni	3	0	23	26
Juuli	23	19	27	69
August	23	18	30	71
September	0	0	0	0
Oktoober	0	4	22	26
November	27	0	0	27
Kokku	131	87	134	352

3.2. Hüpoksilise kihi minimaalne sügavus veesambas

Andmeid töödeldi okeanograafia andmetöötlusprogrammis, ODV-s (*Ocean Data View*) (Schlitzer 2017), mille tulemusena leiti hüpoksia minimaalne sügavus veesambas iga profiili jaoks. Hüpoksia minimaalse sügavuse leidmiseks eraldati jaamad, mis paiknevad Soome lahes ja valiti need sügavuse andmed, kus hapniku väärtused vastavad etteantud hüpoksia piirväärtusele ($O_2 = 2,0$ mg/l ja $O_2 = 2.9$ mg/l). Algandmeid töödeldi eraldi veel ODV-s paikneva DIVA (*Data-Interpolating Variational Analysis*) tarkvaraga, et saada kaardid interpoleeritud hapnikutingimuste paiknemise kohta perioodideks kevad, suve algus, suve lõpp ja aktiivne

produktiooni periood. Selleks eraldati sarnaselt ainult Soome lahes paiknevad jaamad, aga kasutati kõiki sügavuse andmeid. Nendest andmetest interpoleeris DIVA hapnikutingimused vastavateks perioodideks.

Edasi vaadati, kuidas hüpoksia piir veesambas oli ruumis jaotunud, kas Soome lahes asuv hüpoksiline kiht on ida – lääne sihis, ehk piki lahte kaldu. Selleks leiti korrelatsioon pikkuskraadi ja hüpoksilise piiri sügavuse vahel. Korrelatsioonid leiti terve mõõtmisperioodi igale kuule. Lisaks erinevate kuude korrelatsioonidele leiti pikkuskraadi ja sügavuse seos ka veel perioodidele aprill – mai, mai – juuni, juuli – august ja aprill – september..

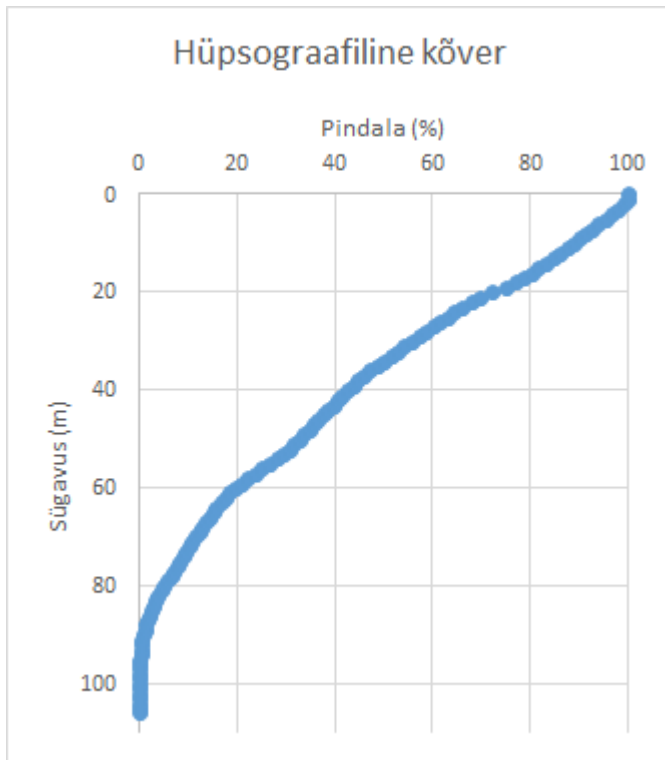
3.3. Hüpoksilise ala suuruse leidmine

Hüpoksilise ala suuruse leidmiseks on vajalik teada, kui suur on pindala lahes vastava sügavuse juures. Hüpsograafiline kõver kujutab erinevatel sügavustel asuvate merepõhja osade levikut teatud alal.

Käesolevas töös kasutatud Soome lahe hüpsograafiline kõver põhineb sügavusandmetel, mille puhul on Soome laht jaotatud 463 meetri pikkuste külgedega ruutudeks ja, kus igal ruudul on vastav arvuline väärtus, mis märgib mere sügavust selles konkreetses punktis (joonis 3.3) (Andrejev et al. 2010; Andrejev et al. 2011).

Soome lahte mõjutavad palju ka tuuled, kirdetuuled aidates kaasa tavalisele tsirkulatsioonile, samas kui edelatuuled võivad tsirkulatsiooni ümberpöörata (Liblik et al. 2013). Selletõttu kasutati hüpoksilise ala suuruse leidmiseks veel ka Soome

lahe keskel asuvast Vaindloo jaamast ($59^{\circ} 49' 4''$ N $26^{\circ} 21' 35''$ E) kogutud tuuleandmeid. Tuuleandmetest mõõdeti 10 minuti keskmine tuule suund ja kiirus 24 korda ööpäevas täistunnil. Saadud andmetest valiti välja periood aprill – september aastatest 2014 – 2016. Seejärel grupeeriti tuule suundade kaardid vastavalt ilmakaarte kraadide vahemikele. Saadud graafikute x – telgedel on toodud tuulesuunad ja y – telgedel tuule sagedused, mis saadi igale ilmakaarele, kui jagada kogu mõõdetud tuulte arv vastava ilmakaare tuulte arvuga. Eraldi on nendel veel välja toodud kõik tuuled, $> 5\text{m/s}$ tuuled ja $> 10\text{ m/s}$ tuuled.



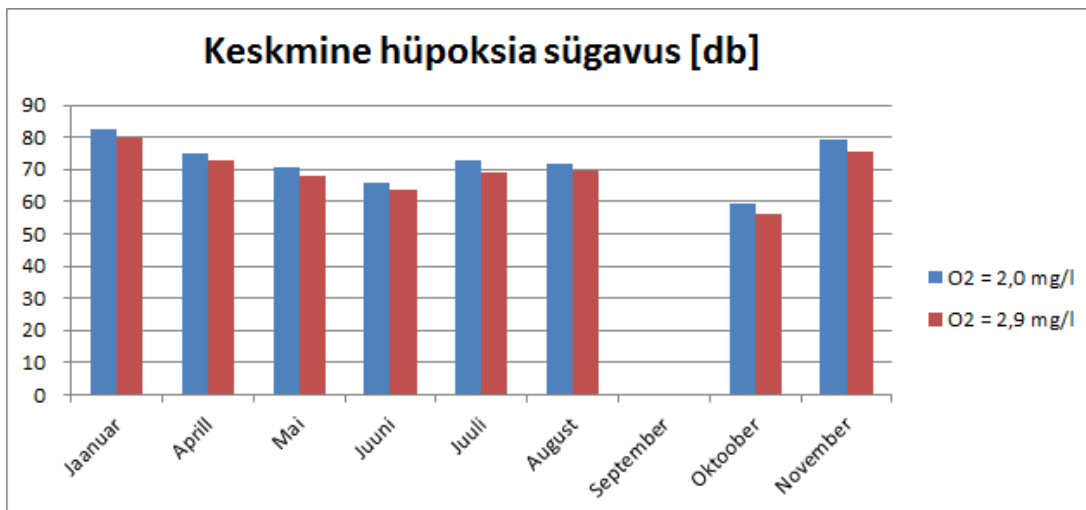
Joonis 3.3. Soome lahe hüpsograafiline kõver

4. TULEMUSED

4.1. Hüpoksilise kihi sügavus

Hüpoksilise kihi ülemise piiri leidmiseks leiti kuude keskmised väärtused, koondades kõikide aastate andmed (joonis 4.1). Hüpoksia piir leiti 352-st profiilist 224-st (105 piirväärtusel $O_2 = 2,0$ mg/l ja 119 piirväärtusel $O_2 = 2,9$ mg/l). Siinjuhul ei saa jaanuari, juuni, oktoobri ja novembri tulemusi väheste mõõtmiste tõttu tõsiselt arvestada (vastavalt 23, 26, 26 ja 27 profiili). Suurim keskmise hüpoksilise kihi sügavus kummagi piirväärtuse juures esines aprillis - 75 meetrit ($O_2 = 2,0$ mg/l) ja 73 meetrit ($O_2 = 2,9$ mg/l). Peale seda hakkas keskmine hüpoksilise kihi sügavus vähenema, ja mais paiknes see sügavusel 70 ($O_2 = 2,0$ mg/l) ja 68 ($O_2 = 2,9$ mg/l) meetrit. Suve algust ja lõppu, juuni-august, ei saa küll terviklikult vaadata, kuid kahe kuu andmetest on võimalik näha, et keskmised sügavused paiknesid sellel ajal stabiilsemalt, kõikides vähem. Sügisel oli kõige vähem andmeid. Oktoobris paiknes hüpoksiline kiht pinnale kõige lähedamal, olles sügavusel 59 ($O_2 = 2,0$ mg/l) ja 56 ($O_2 = 2,9$ mg/l) meetrit. Samu tulemusi näeb ka vaadeldes perioode, kus on mitme kuu andmed koos. Kevadperioodil on sügavused suuremad võrreldes suve lõpu

perioodiga. Perioodil, kus on kõige rohkem mõõtmistulemusi kokku, aktiivse produktsiooni perioodil, on keskmine hüpoksilise kihi sügavus 71 meetrit ($O_2 = 2.0$ mg/l) ja 69 meetrit ($O_2 = 2,9$ mg/l).

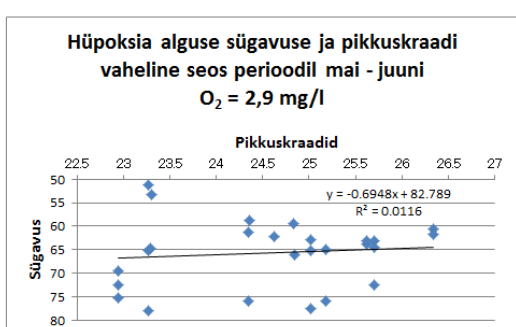
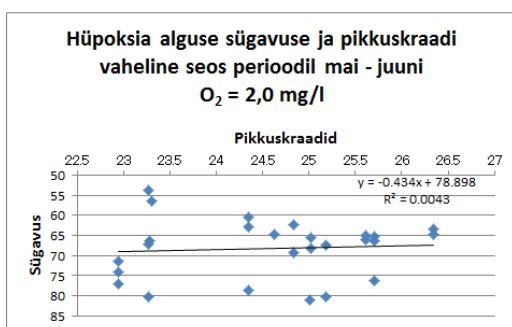
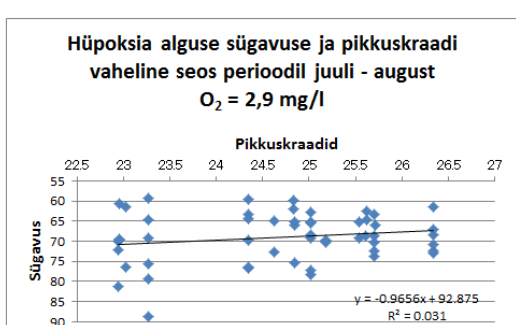
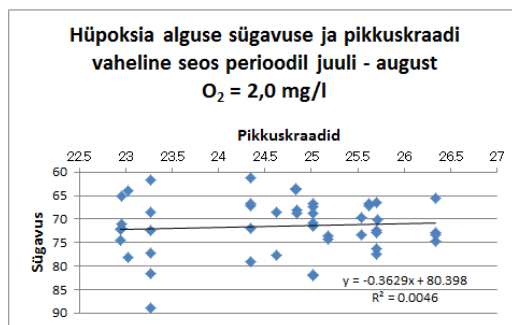
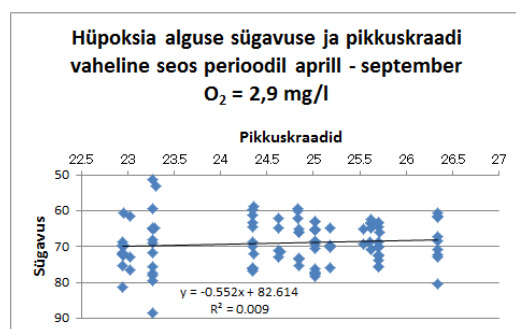
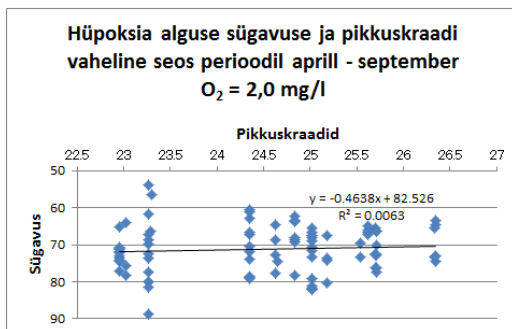
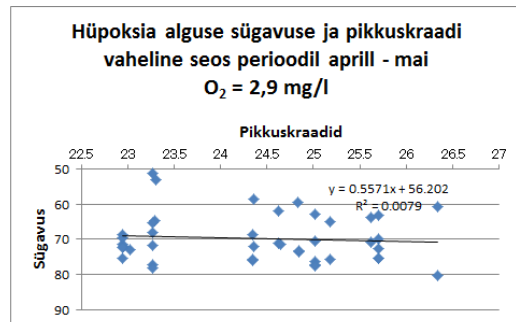
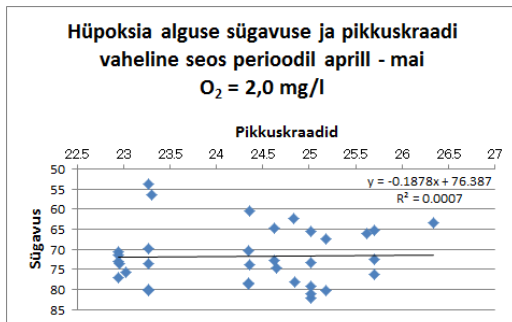


Joonis 4.1 Keskmine hüpoksia sügavus kuude lõikes kasutades andmeid aastatest 2014-2016. Septembris puudusid andmed.

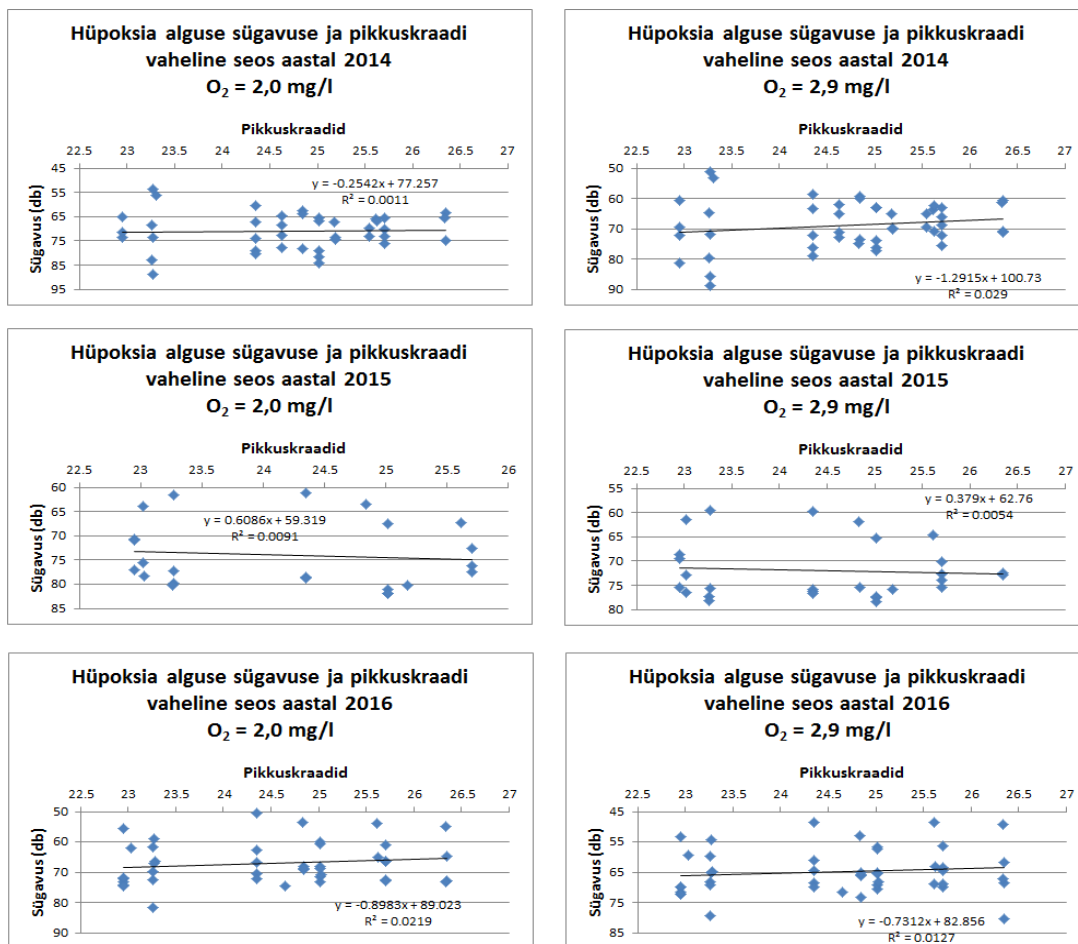
4.2. Hüpoksiline kiht ruumis

Hüpoksilise kihi kalde olemasolu leidmiseks uuriti kõikide aastate koondatud andmete põhjal erinevate perioodide hüpoksia alguse sügavuse ja pikkuskraadi vahelist seost (joonis 4.2.1.). Lisaks vaadeldi aasta kaupa koondatud andmete hüpoksia alguse sügavuse ja pikkuskraadi seoseid (joonis 4.2.2.). Üldjuhul puudusid mõõtmisperioodil märkimisväärsed korrelatsioonid, olles enamjaolt praktiliselt nullilähedased.

Saadud graafikutel (joonistel 4.2.1. ja 4.2.2.) leitud korrelatsioonid on väga väikesed. Sellised tulemused ütlevad ainult, et pikkuskraadi ja sügavuse vahel puudub seos. Seetõttu ei ole võimalik rääkida ka antud juhul otsitavast ida - läänesuunalisest kaldest Soome lahes. Suurimat kallet on märgata küll piirväärtuse 2,0 mg/l juures suve alguses ja piirväärtusel 2,9 mg/l suve lõpus, aga leitud andmete juures on see statistiliselt ebausaldusväärne.



Joonis 4.2.1. Hüpkoksia alguse sügavuse ja pikkuskraadi vahelised seosed aastatel 2014, 2015 ja 2016 mõlema piirväärtuse ($O_2 = 2.0 \text{ mg/l}$ ja $O_2 = 2.9 \text{ mg/l}$) juures.



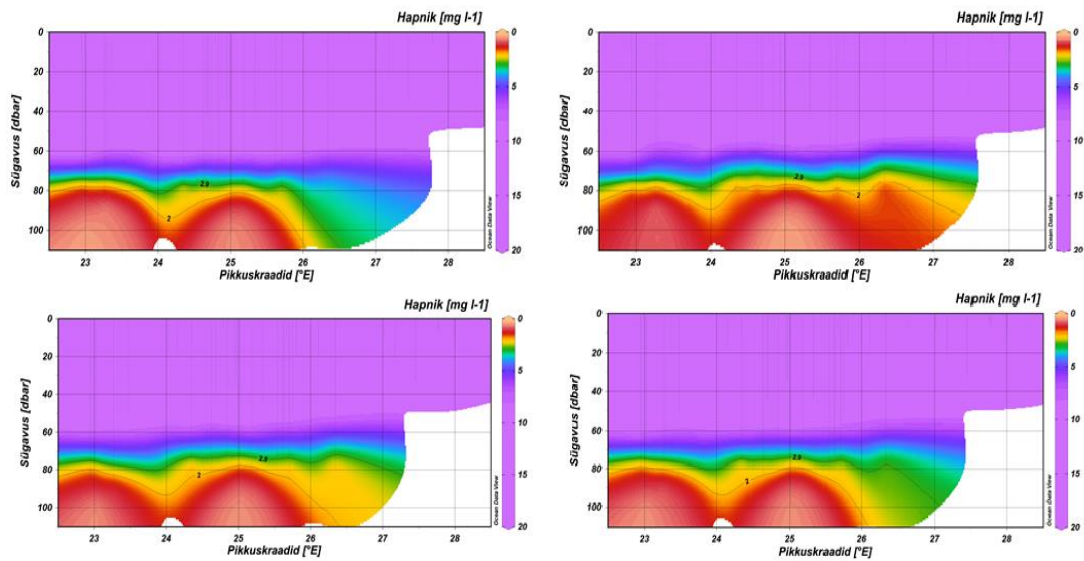
Joonis 4.2.2. Aastased hüpoksilise kihi sügavuse ja pikkuskraadi seosed.

Joonisel 4.2.3. on kujutatud ODV-s leiduva DIVA tarkvaraga interpoleeritud hapnikutingimused töös käsitletud perioodidel, kus kollase ja rohelisega on märgitud piirväärtuse vahemik 2,0 ja 2,9, samas kui punasega on märgitud piirväärtusest 2,0 madalamad tingimused. Kevadisel perioodil on hüpoksiline ala kõige väiksem, paiknedes kuni 26 pikkuskraadini. Suve alguses on hüpoksiline ala saavutanud kõige suurema ala, ulatudes juba üle 27 pikkuskraadi. Suve lõpuks on hüpoksilised tingimused vähenenud, kuigi hüpoksia piirväärtuse $O_2 = 2,0$ mg/l piir on langenud

peaaegu selliseks nagu ta oli kevadel, on piirväärtuse $O_2 = 2,9$ mg/l piir jäänud püsima suhteliselt kõrgel. Siinkohal peab arvestama ka sellega, et kuna DIVA interpoleerib neid andmeid, siis saadud kaardid ei ole seetõttu ka kõige täpsemad.

Kevad (aprill – mai)

Suve algus(mai – juuni)



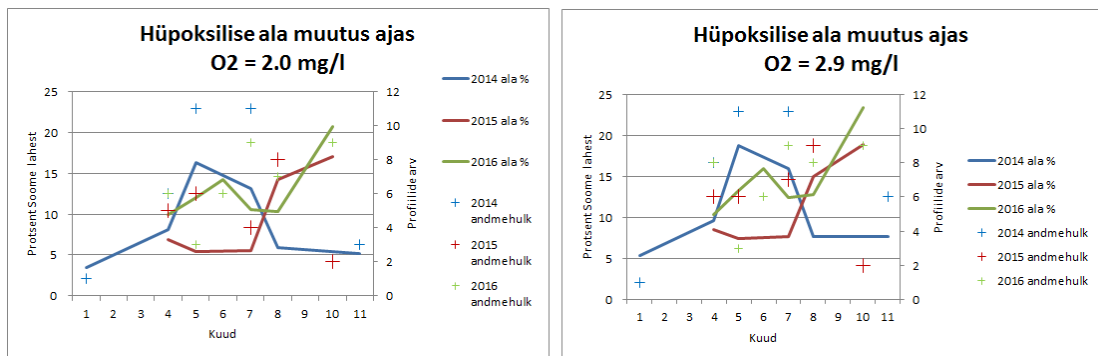
Suve lõpp (juuli – august)

Kogu produktiivne periood (aprill – september)

Joonis 4.2.3. Interpoleeritud hapnikutingimused eri perioodidel.

4.3. Hüpoksilise ala dünaamika ajas

Ajaline hüpoksilise ala muutus ühe aasta piires kirjeldab tüüpilist sesoonset hapnikutingimuste muutust, mida on näha ka andmetest (joonis 4.3.1). Hapnikutingimused olid paremad kevadel ja halvenesid suvel. Joonisel 4.3.1 on välja toodud hüpoksilise ala muutus ajaliselt koos vastava andmehulgaga (profiilide arv, milles tuvastati hüpoksia piirväärtus).



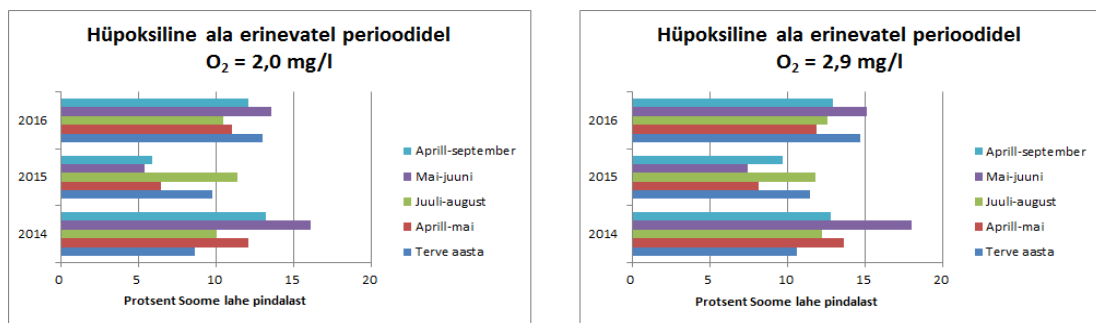
Joonis 4.3.1. Hüpoksilise ala muutus ajas koos profiilide arvuga, milles tuvastati hüpoksia piirväärtus.

Joonisel 4.3.2 on toodud kõikide aastate keskmised hüpoksilise kihi suurused eri perioodidel. Kõikidel aastatel langesid kummagi piirväärtuse juures hüpoksilised tingimused omavahel kõige rohkem kokku suve lõpu perioodidel, juuli – august, moodustades keskmiselt umbes 10 % ($O_2 = 2,0 \text{ mg/l}$) ja 12 % ($O_2 = 2,9 \text{ mg/l}$) Soome lahe pindalast. Kõige suuremad erinevused esinesid aga mõlemal piirväärtusel kõikidel aastatel suve alguses, moodustades keskmiselt ligikaudu 11,5 % ($O_2 = 2,0 \text{ mg/l}$) ja 13,5 % ($O_2 = 2,9 \text{ mg/l}$) kogu Soome lahe pindalast.

Mõlema piirväärtuse tulemused on sarnase muutlikkusega. Suurimad hüpoksilised alad esinesid 2016-ndal aastal kevadel moodustades Soome lahest umbes 13,5% ($O_2 = 2,0 \text{ mg/l}$) ja 2014-ndal aastal suve alguses, moodustades 18% ($O_2 = 2,9 \text{ mg/l}$). Väikseimad hüpoksilised alad olid mõlemal piirväärtusel 2015-ndal aastal suve alguses, olles 5% ($O_2 = 2,0 \text{ mg/l}$) ja ligikaudu 7,5% ($O_2 = 2,9 \text{ mg/l}$). Aktiivse produktsiooni perioodil moodustasid 2014-ndal ($O_2 = 2,0 \text{ mg/l}$) ja 2016-ndal ($O_2 = 2,9 \text{ mg/l}$) aastal mõlemad piirväärtused Soome lahest 13%. Sama perioodi

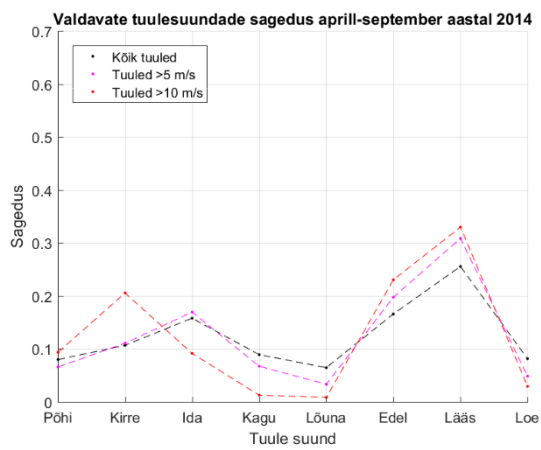
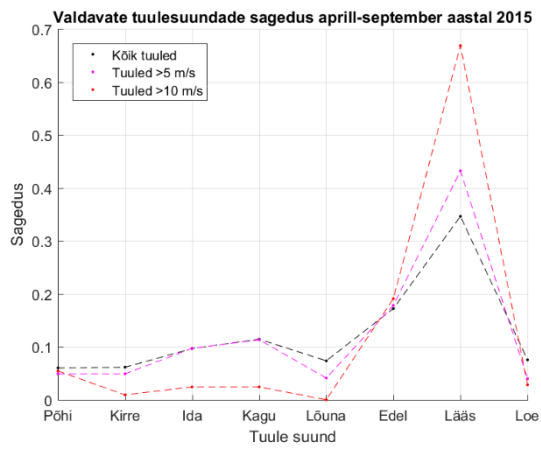
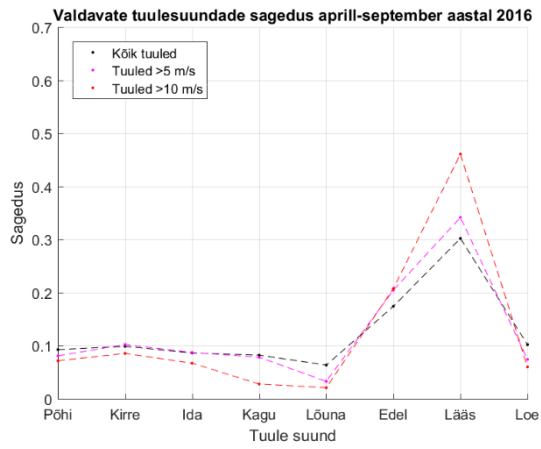
väikseimad hüpoksilised alad olid 2015-ndal aastal, 6% ($O_2 = 2,0$ mg/l) ja ligikaudu 10% ($O_2 = 2,9$ mg/l).

Võttes kõikide aastate kogu mõõtmisperioodi keskmised, arenesid mõlema piirväärtuse puhul suurimad hüpoksilised alad suve alguses, umbes 12 % ($O_2 = 2,0$ mg/l) ja 13,5 % ($O_2 = 2,9$ mg/l), samas kui väikseimad arenesid välja kevadperioodil, 10 % ($O_2 = 2,0$ mg/l) ja 11 % ($O_2 = 2,9$ mg/l). Kui vaadata kõikide aastate kõiki mõõtmisperioode, oli 2015-ndal aastal mõlema piirväärtuse juures väikseimad tulemused, välja arvatud suve lõpp piirväärtusel ($O_2 = 2,0$ mg/l) kus see oli mõlemast aastast suurem.



Joonis 4.3.2. Hüpoksiline ala erinevatel perioodidel.

Tuultest domineerisid igal aastal lääne- ja edelatuuled (joonis 4.3.3). Eriti tugevasti väljendus see domineerimine tugevate tuulte puhul. Aastal 2014 domineerisid lääne- ja edelatuuled, aga esines ka palju põhja- ja kirdetuuli, rohkem kui teisel kahel aastal. Aastal 2015 domineerisid lääne- ja edelatuuled ja ka nende tuulte sagedus oli suurem võrreldes teise kahe aastaga. Aastal 2016 domineerisid samuti lääne- ja edelatuuled.



Joonis 4.3.3. Valdavate tuulesuundade sagedused perioodil aprill – september aastatel 2014 – 2016

5. ARUTELU JA JÄRELDUSED

5.1. Soome lahe hapnikutingimused valitud perioodil

Antud perioodil, 2014 kuni 2016, olid hapnikutingimused kõikuvad, mida võis mõjutada ka 2014-ndal aastal esinenud soolase vee sissevool Läänemerre, mille mõju võis ulatuda ka Soome laheni (Mohrholz et al. 2015). Kolmest aastast erines kõige rohkem aasta 2015. Kolme aasta andmete ulatuses võib kõige usaldusväärsemaks lugeda 2016-ndat aastat, kus tehti 134 profiili, seejärel aasta 2014 kus oli 131 profiili ja kõige ebausaldusväärsem oli aasta 2015, kus tehti 87 profiili. Üldjuhul oli siiski graafikutelt võimalik välja lugeda tüüpilist sesoonsset muutust, kus kevadel olid hapnikutingimused paremad ja suvel halvenesid, hüpoksilised tingimused esinedes kevade lõpus kõrgemal veesambas ja suve perioodil moodustades stabiilsema kihi natukene sügavamal. Kuna kõik mõõtmised on tehtud Soome lahes, võis oletada, et aastased tulemused on sarnased, mida nad ka enamjaolt olid. Kõige tõenäolisemalt mõjutas neid tulemusi tsirkulatsioon. Vähemal määral võisid seda veel mõjutada erinevused aktiivse bioproduktiooni perioodi alguses ja lõpus, aga samuti ka osade perioodide vähesed või puuduvad andmehulgad.

5.2. Hüpoksilise ala suurus

Käesoleva töö autor jõudis oma töös järelduseni, et põhjalähedase hüpoksilise kihi alguse sügavus ei ole mingis märkimisväärses korrelatsioonis pikkuskraadiga. Liikudes itta võib küll märgata väikest idasuunalist hüpoksilise kihi sügavuse vähenemist, aga leitud korrelatsioonide juures on nende varieeruvused liiga suured ja näitavadki ainult seda, et nende vahel seos puudub. Seetõttu võibki saadud tulemuste juures väita, et väike idasuunaline kalle võib küll olemas olla, aga praegusel juhul ei ole see statistiliselt usaldusväärne. Võimalikku kallet ei saa praegusel momendil arvesse võtta, kuna selle olemasolu saaks hinnata siis, kui oleks tunduvalt rohkem andmeid.

Hüpoksilise ala kõikumine antud perioodi jooksul on tõenäoliselt põhjustatud tuultest ja seeläbi tsirkulatsioonist. Edelatuuled võivad estuaarsetes veekogudes tsirkulatsiooni vastupidi pöörata ja seeläbi hajutada stratifikatsiooni ja talveperioodidel varustada põhjakihte hapnikuga. Sellega võivad kaasned ka muutused hoovustes ja hüpoksilise kihi hajumine. Kirdetuuled aga omakorda aitavad kaasa tavalisele tsirkulatsioonile (Liblik et al. 2013). 2014-ndal aastal domineerisid küll edela- ja läänetuuled nagu ka teistel aastatel, aga kuna andmetest näeb kuidas sellel aastal oli ka märgatavalt palju kirdetuuli, oli tõenäoliselt selletõttu ka 2014-ndal aastal suurem hüpoksiline ala. 2015-ndal aastal oli lääne- ja edelatuulte esinemissagedus kõige suurem võrreldes teiste aastatega, eriti > 10 m/s tuulte puhul, mistõttu oli ka sellel aastal hüpoksilise ala suurus väiksem. 2016-ndal aastal oli aga

hüpkosiline ala suurenenud, mille otsene mõju võis olla soolase vee sissevoolust mis toimus 2014-ndal aastal.

Kahe erineva piirväärtuse kasutamist hapnikuvaeguse defineerimiseks saab kasutada nii suuremate kui väiksemate basseini hapnikutingimuste ja hüpkosiliste alade leidmiseks, aga selleks oleks vaja mõõtmised korraldada tihedamalt ja samadel perioodidel. Kuni universaalse indikaatori leidmiseni terve Läänemere jaoks on selline meetod üks võimalus vahepealseks kasutuseks.

KOKKUVÕTE

Käesolevas töös on esitatud ülevaade Soome lahe põhjalähedase hüpoksilise kihi suuruselt ja dünaamikast. Töö eesmärgiks oli analüüsida kolme aasta, 2014 kuni 2016, käigus kogutud hapniku andmeid ja leida Soome lahe hüpoksilise kihi ala kasutades selleks kahte piirväärtust, $O_2 = 2,0 \text{ mg/l}$ ja $O_2 = 2.9 \text{ mg/l}$. Analüüsiks kasutati 352 profiili, mis koguti uurimislav Salme pardalt. Lisaks kasutati veel Keskkonnaagentuuri poolt kogutud tuuleandmeid. Andmeid töödeldi ODV ja selles paikneva DIVA-ga ja graafikud koostati ODV-s ja MS Excelis. Töö käigus uuriti hüpoksilise kihi sügavust, ruumilist paiknemist ja hüpoksilise kihi sügavuse ja pikkuskraadi vahelist korrelatsiooni.

Soome lahest kogutud profiilide analüüsimisel on töös jõutud järeldusele, et Soome lahe põhjalähedase hüpoksilise kihi alguse sügavus ei ole seoses pikkuskraadiga, ja kalle, mida ei saa väikese korrelatsiooni tõttu oluliseks seoseks lugeda, on pigem põhjustatud tsirkulatsioonist. Antud perioodil domineerisid igal aastal põhiliselt lääne- ja edelatuuled, 2014-ndal aastal ka kirdetuuled, mis põhjustasid kolme aasta jooksul hüpoksilise ala kõikumisi.

ABSTRACT

The oxygen deficient area and its dynamics in the Gulf of Finland

This thesis focuses on the oxygen content in the deep layer of the Gulf of Finland in 2014 to 2016, to analyze its area and dynamics. Analysis was carried out with 352 profiles collected from the research ship Salme and also with wind data collected from Vaindloo coastal station. The data were processed with Ocean Data View and Data-Interpolating Variational Analysis and graphs were made in Ocean Data View and MS Excel. Throughout the research depth, spatial position and the correlation between depth and longitude was studied.

With the analysis of data that was collected from the Gulf of Finland, it is concluded that there is no relevant correlation between longitude and the depth of the hypoxic layer, and the small incline the data shows is rather the result of the circulation. At the given period westerly and south-westerly winds were dominant, also north-easterly during 2015, that all determined the circulation of the Gulf of Finland at the time, and with it its oxygen conditions in the deep layers.

Tänuavaldused

Käesoleva töö autor avaldab tänu juhendajale Stella-Theresa Stoicescule ja professor Urmas Lipsule juhendamise ja väärtuslike kommentaaride eest töö käigus. Töös kasutatud tuule vaatlusandmete eest avaldab autor tänu Keskkonnaagentuurile ja töös kasutatud jaamade andmete eest avaldab autor tänu Meresüsteemide instituudile.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- Alenius, P., Myrberg, K. & Nekrasov, S., 1998. The physical oceanography of the Gulf of Finland: a review. *Boreal Environment Research*, 3(January), pp.97–125.
- Andrejev, O. et al., 2004. Mean circulation and water exchange in the Gulf of Finland - a study based on three-dimensional modelling. *Bor. Env. Res.*, 9, pp.1–16.
- Andrejev, O. et al., 2011. The role of spatial resolution of a three-dimensional hydrodynamic model for marine transport risk assessment. *Oceanologia*, 53 (1-TI), pp.309–334.
- Andrejev, O. et al., 2010. The use of high-resolution bathymetry for circulation modelling in the Gulf of Finland. *Estonian Journal of Engineering*, 16(3), pp.187–210.
- Carstensen, J. et al., 2014. Deoxygenation of the Baltic Sea during the last century. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(15), pp.5628–33. [WWW] <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=3992700&tool=pmc-entrez&rendertype=abstract>. (01.03.2017)
- Dauvin, J.C. et al., 2007. The ecological quality status of the Bay of Seine and the Seine estuary: Use of biotic indices. *Marine Pollution Bulletin*, 55(1–6), pp.241–257.
- Hansson, M. & Andersson, L., 2015. Oxygen_timeseries_1960_2015. , (53).

- Helcom, 2009. Eutrophication in the Baltic Sea – An integrated thematic assessment of the effects of nutrient enrichment and eutrophication in the Baltic Sea region. Balt. Sea Environ. Proc. No. 115B. *Baltic Sea Environment Proceedings No. 115B.*, p.152.
- HELCOM, 2005. Airborne nitrogen loads to the Baltic Sea. , pp.1–23.
- HELCOM, 2016. Determination of dissolved oxygen in seawater Monitoring methods Monitoring features. , pp.7–11.
- HELCOM, 2017a. EUTROPHICATION. [WWW]
<http://www.helcom.fi/baltic-sea-trends/eutrophication>. (17.02.2017)
- HELCOM, 2017b. EUTROPHICATION CORE INDICATORS. [WWW]
<http://www.helcom.fi/baltic-sea-trends/eutrophication/indicators/>. 10.02.2017)
- HELCOM, 2014. Eutrophication status of the Baltic Sea 2007-2011. *Baltic Sea Environment Proceedings*, (143), p.41.
- HELCOM, 2013. *Final report of the HELCOM CORESET project*,
- HELCOM, 2017c. HELCOM Indicators. [WWW]
<http://www.helcom.fi/baltic-sea-trends/indicators/core-indicators>. (05.03.2017)
- HELCOM, 2017d. MONITORING AND ASSESSMENT. [WWW]
<http://www.helcom.fi/action-areas/monitoring-and-assessment>. (01.03.2017)
- Johansson, J., 2017. TOTAL AND REGIONAL RUNOFF TO THE BALTIC SEA. [WWW] <http://www.helcom.fi/baltic-sea-trends/environment-fact-sheets/>. (23.02.2017)
- Liblik, T. et al., 2013. Estuarine circulation reversals and related rapid changes in winter near-Bottom oxygen conditions in the Gulf of Finland, Baltic Sea. *Ocean*

- Science*, 9(5), pp.917–930.
- Mohrholz, V. et al., 2015. Fresh oxygen for the Baltic Sea - An exceptional saline inflow after a decade of stagnation. *Journal of Marine Systems*, 148, pp.152–166.
- Pyhälä, M. et al., 2014. *Oxygen debt - HELCOM Core Indicator Report*, [WWW] <http://www.helcom.fi/baltic-sea-trends/indicators/oxygen/>. (15.03.2017)
- Raateoja, M., Setälä, O. & (eds), 2016. *The Gulf of Finland assessment*,
- Rabalais, N.N. et al., 2009. Global change and eutrophication of coastal waters. *ICES Journal of Marine Science*, 66(7).
- Schlitzer, R., 2017. Ocean Data View.
- Steele, J.H., Turekian, K.K. & Thorpe, S.A., 2009. *Encyclopedia of Ocean Sciences* Vol. 1.,
- Tallinna Tehnikaülikool Meresüsteemide instituut, Labori tööjuhend 12 - Lahustunud hapniku määramine.
- Vaquer-Sunyer, R. & Duarte, C.M., 2008. Thresholds of hypoxia for marine biodiversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105, pp.15452–15457.
- Viktorsson, L., 2016. *Investigating possibilities for a new oxygen indicator*,
- Wesslander, K., Eilola, K. & Wåhlström, I., 2015. *Development of oxygen consumption indicator*,