

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

Matemaatika-loodusteaduskond

Meresüsteemide Instituut

HAPNIKUSISALDUSE DÜNAAMIKA LÄÄNEMERE
(SOOME LAHE) PÕHJALÄHEDASTES KIHITIDES

Bakalaureusetöö

Merit Kaal

Juhendaja: Urmas Lips, okeanograafia õppetool,
professor

Maa-teadused

Tallinn 2014

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.

Merit Kaal

allkiri ja kuupäev

Juhendaja: Urmas Lips

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

allkiri ja kuupäev

Kaitsmiskomisjoni esimees:

Lubatud kaitsmisele

.....

nimi, allkiri, kuupäev

ABSTRACT

Dynamics of oxygen content in the bottom layers of the Baltic Sea (Gulf of Finland)

Merit Kaal, BA study, Tallinn University of Technology

The main goal of this research is to analyze the content of oxygen in the deep layer of the Baltic Sea, and to understand how it changes and what causes oxygen depletion. The research has been carried out in the Gulf of Finland. The CTD (conductivity-temperature-depth) probe Idronaut OS320 with oxygen and chlorophyll a fluorescence sensors used in the TTÜ Marine Systems Institute and the VWR-OX4000 oxygen sensor on the ferry 'Salme' provided the measurements for the study conducted between 2012 and 2014. The data were processed and graphs were generated with Ocean Data View IV and show the horizontal and vertical sections of the Gulf of Finland where data on oxygen, chlorophyll, salinity and temperature are presented. Based on the found correlation between the deep layer oxygen content and vertical density difference between the near bottom and surface layer, it is concluded that the oxygen content in the benthic layer is correlated with the density gradient between the photic and benthic layers. Thus, the theory holds that, like salinity, oxygen levels below halocline changes rapidly. The results reveal that oxygen content in the photic layer is dependent on the spring algae bloom and higher summer temperatures because oxygen saturation in cold water is higher than in warm water. Finally, the research evaluated the reliability of the Idronaut CTD probe because its measurements of oxygen had not been used previously. Measurements of the two instruments listed above were compared and prove that the Idronaut CTD probe is accurate and can be used for future research.

SISUKORD

ABSTRACT	2
SISUKORD.....	3
SISSEJUHATUS	5
1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE	6
1.1 Läänemere topograafia	6
1.2 Veemasside vertikaalne jaotus	7
1.2.1 Soome lahe vertikaalne iseloomustus	9
1.3 Läänemere süvavee tsirkulatsioon.....	10
1.4 Läänemere sissevoolud.....	11
1.4.1 Suure sissevoolu mõju Soome lahele.....	12
1.4.2 1993 aasta suur sissevool.....	12
1.5 Hapniku ammendumine ja Läänemere eutrofeerumine	14
1.5.1 Soome lahe hapnikusisaldus ja eutrofeerumine.....	16
2. METOODIKA	18
2.1 Uuritav ala	18
2.2 Hapniku kontsentratsiooni määramine CTD sondiga	19
2.3 Hapnikusisalduse määramine laboris	21
2.4 Kasutatud andmed ja nende töötlus.....	22
3. TÖÖ TULEMUSED	23
3.1 Hapnikupilved	23
3.2 Hapniku muutus ajaliselt.....	25
3.3 Hapniku muutus ruumiliselt	27

3.4 Hapniku korrelatsioon soolsuse ja tihedusega.....	29
4. TULEMUSTE ARUTELU	31
KOKKUVÕTE.....	33
KASUTATUD KIRJANDUS	34
LISAD.....	37
Lisa 1 . Veetase suure sissevoolu kolmel perioodil.....	37
Lisa 2. Soome lahe fosforisisaldus 2014 aasta talvel	38

SISSEJUHATUS

Läänemere põhjakiht on maailma kõige suurema surnud tsooniga ökosüsteem, mida põhjustab püsiv hapnikuvaegus. See tekib peamiselt tugeva stratifikatsiooni ning vähese veevahetuse tagajärjel. (Diaz&Rosenberg 2008) Läänemeres esineb neid mõlemaid: nii aastaringset halokliini kui ka vähest läbivoolu läbi Taani väinade. Iga-aastased vooluhulgad ei ole piisavad, et vahetada välja Läänemere süvabasseinide vesi. Seetõttu on väga olulised suured sissevoolud, mille ajal lisandub piisavalt suur hulk soolast ja hapnikurikast vett. Sellised nähtused leiavad aset keskmiselt iga kümne aasta jooksul, mis aga ei ole piisav, et ära hoida süvabasseinide hapnikuvaegust. Selline hapniku ammendumine on üks Läänemere peamisi eutrofeerumise põhjuseid.

Töö eesmärgiks on analüüsida hapnikusisaldust Läänemere põhjakihtides: kuidas see muutub ning mis põhjustab hapniku ammendumist. Täpsemalt on uuringuid teostatud Soome lahe kohta, mille jaoks on kasutatud viimase kolme aasta (2012 - 2014 kevad) hapnikuandmeid. Välja on toodud hapniku muutused ruumiliselt piki ja risti lahte ning muutus ajaliselt jaamas AP5. Risti lahe graafikult 20. juuli 2012 aasta kohta, tuleb välja ka püsivatest läänetuultest tekkinud *daunvellingu* mõju Eesti rannikuvetele.

Töös on kasutatud teiste autorite uurimisi ning kirjanduslikke materjale, mis annavad ülevaate Läänemere topograafiast, üldisest veetsirkulatsioonist, hapnikusisaldusest ning seda muutvatest teguritest. Uuringu teostamiseks on läbi viidud hapniku mõõtmisi Soome lahes CTD sondi Idronaut hapnikuanduriga ning kasutatud TTÜ Meresüsteemide Instituudi uurimislaeva Salme laboris kolme aasta jooksul kogutud hapniku andmeid. Kuna varasemalt ei ole kasutatud eelnimetatud Idronaudi hapnikuanduriga saadud hapniku vertikaalseid profiile, siis uurib autor lisaks ka nende mõõtmistulemuste usaldusväärsust ning kokkulangevust laborimõõtmistega.

1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

1.1 Läänemere topograafia

Läänemeri on Musta mere järel maailma suuruselt teine riimveekogu (EE 2011 *sub* Läänemeri). Olenevalt sellest, kuhu tõmmata Läänemere ühenduse piir Põhjamerega, varieerub pindala umbes 5% ulatuses (Leppäranta&Myrberg 2009, 42), sõltuvalt kas arvestada Kattegat ja Taani väinasid või mitte. Ühes allikas, kuhu on Läänemere hulka loetud ka Kattegat (EE 2011 *sub* Läänemeri) on pindalaks 420 000km² ning teises allikas (Leppäranta&Myrberg, 2009, 42), mis ei arvesta Kattegati, on tema pindalaks 392 978km². Käesolevas uurimistöös toetutakse teisele allikale, kus loetakse Läänemere piiriks piirjoont Kattegati ja Taani väinade vahel. Taani väinad moodustavad Öresund ning Belti meri (Suur- ja Väike-Belt). Need on ka peamised läbipääsud, mille kaudu toimub Läänemere suhteliselt vähene veevahetus. Kuigi Öresund on kõige lühem ja otsene tee Läänemerre, toimub umbes 70% veevahetusest läbi Suure-Belti. Väike-Belt on oma väikse veemahu tõttu nende kõrval ebaoluline. (Krauss 2001)

Leppäranta&Myrbergi (2009) raamatu järgi jaotatakse Läänemeri 14 suuremaks basseiniks. Joonis 1 annab neist ülevaate ning on abiks hilisemate peatükkide mõistmiseks. Läänemeri on varieeruva sügavusega, mille keskmine sügavus jääb vaid 54 meetri juurde, samas kui sügavaim koht Lääne-Gotlandi basseinis, Stockholmi ja Gotlandi saare vahel, asuv Landsorti süvik on 459 meetrit. 12% Läänemere pindalast on sügavam kui 100 meetrit ning 2,7% sügavam kui 150 meetrit. Arvestatav topograafiline muutlikkus on ka põhjuseks Läänemere veetsirkulatsioon, mille tõttu saab vee horisontaalne liikumine toimuda ainult künnisteneni. (Leppäranta&Myrberg 2009, 42-43)



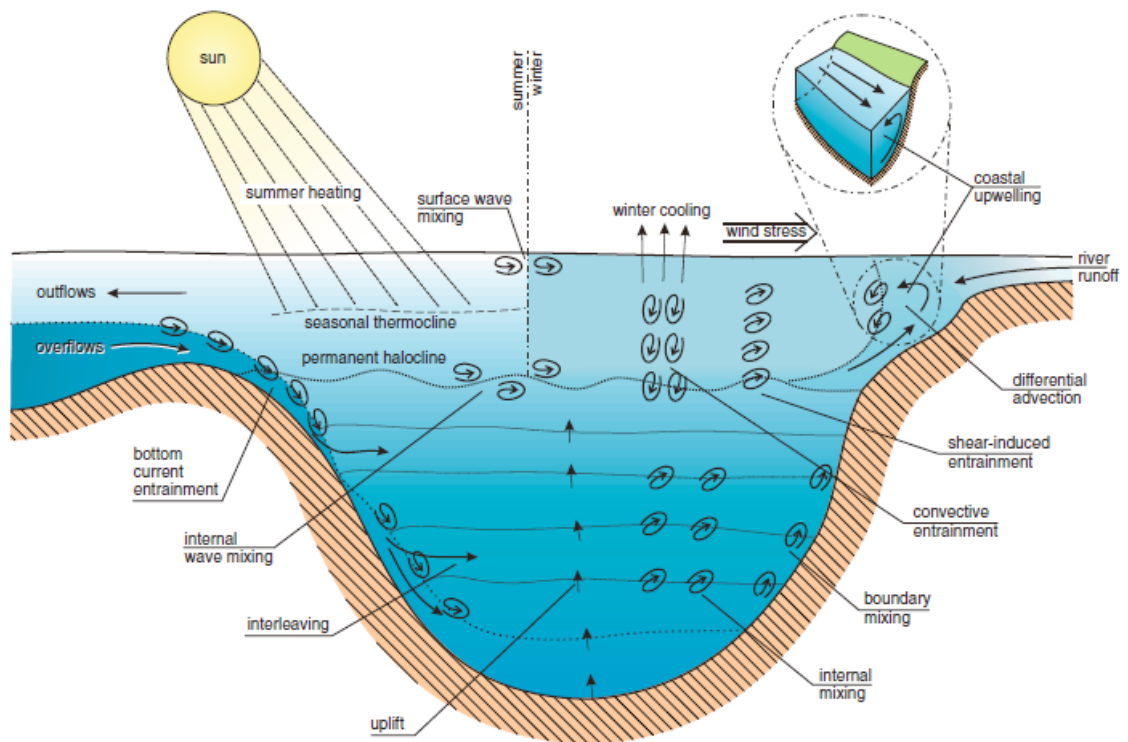
Joonis 1. Läänemere 14 suuremat basseini (Leppäranta&Myrberg 2009, 13) Käesolevas töös loetakse Läänemere piiriks piirjoont Kattegati ja Taani väinade vahel

1.2 Veemasside vertikaalne jaotus

Riimveelisuse tõttu on Läänemeri püsivalt kihistunud. Kahte erineva tiheduse ning soolsusega kihti eraldab omavahel halokliin - kiht, kus soolsuse gradient hüppeliselt muutub. Ülakihis jääb soolsus 6-8g/kg juurde, samas kui allpool halokliini võib soolsus Bornholmi nõos ulatuda kuni 18g/kg lähedale. (Report to the Nordic Council's..., 1989, 150) Halokliini sügavus on varieeruv, sõltudes adveksioonist, tuulest, konvektiivsest segunemisest ning künniste sügavusest. See esineb tavaliselt 40-80 meetri sügavusel, kuid madalamates basseinides võib olla pinnale lähemal. Üldiselt on halokliin püsiva iseloomuga, kuid kohtades, kus vertikaalne kihistumine

on nõrk, võib halokliin teatud oludes ka kaduda. Seda võib esineda näiteks Soome lahe lääneosas, kui tugevate edela tuulte tõttu mõjutatakse Läänemere üldiselt veetsirkulatsiooni vastupidiselt, puhudes suurel hulgal magedat pinnavett lahte sisse ning tõstes hüdrostaatilist rõhku, mis võib viia põhjakihtides oleva soolase vee lahest välja. Erinevalt Soome lahest on Läänemere avaosas, eelkõige edela osas, halokliin väga tugeva iseloomuga. See on tingitud Taani väinadest sisenevast soolasest ja tihedamast veest, mis sukeldub põhja, ning Läänemerest tulevast magedamast veest, mis jääb pinnale, voolates nii Läänemerest välja. (Leppäranta&Myrberg 2009, 64-66) Samade autorite allikas on välja toodud, et halokliini paksus on 10-20 meetrit. Nii paks kiht, mis eristab selgelt põhjakihtid ning pinnaveed, on põhjuseks Läänemere põhjakihtide hapnikupuudusele. Tuule poolt tekitatud vee vertikaalne segunemine pole piisav, et pinnakihtides olev hapnikurikas vesi jõuaks süvakihtidesse. Seega ainus viis hapniku pääsemiseks põhjakihtidesse on horisontaalne sissevool läbi Taani väinade.

Reissmanni jt (2009) autorite artiklis on skeem (joonis 2), mis kirjeldab Läänemere vertikaalset segunemist ja veetransporti. Joonisel on välja toodud halokliin, millest allapoole jääb soolane ning ülespoole magedam veekiht. Jooniselt on ka näha, et lainete poolt tekitatud vertikaalne segunemine ulatub ainult halokliini kihini, kuid mitte allapoole. Rannikulähedal toimub põhjakihtide vee transportimine pinnakihtidesse, mida nimetatakse *apvellinguks*. Selle tagajärjel jõuavad hapnikuvaene vesi ning põhjasetetest vabanenud fosfor pinnakihtidesse. Halokliini kihi peal on sesoonne termokliin, mis takistab samuti vertikaalset segunemist. Termokliin eraldab vertikaalselt kahte veemassi: ülespoole jääb soojem ning allapoole külmem veekiht. Talve perioodidel termokliin kaob ning vesi seguneb ühtlaselt läbi kuni halokliinini.



Joonis 2. Läänemere vertikaalne segunemine ja veetransport (Reissmann jt, 2009)

1.2.1 Soome lahe vertikaalne iseloomustus

Soomes lahes esinev halokliin on lääne- ning keskosas umbes 60-80 meetri sügavusel. Kui läänepoolsemas otsas on soolsus põhjakihtides umbes 7-9g/kg, siis Läänemere kõige suurema veemahuga jõe – Neva – tõttu jääb idapoolses otsas soolsus põhjakihtides 0-3g/kg juurde. (Leppäranta&Myrberg 2009, 75-76) Eelnevas peatükis mainitud Soome lahe muutlikule halokliini kihile annab kinnitust ka HELCOM Läänemere atlas (HELCOM 2010), kus on samuti tähele pandud Soome lahes esinevat hooajalist halokliini. Seda näitavad uuringud, et Soome lahes allpool 70 meetrit esineb hooajaliselt hapnikuvaegust.

1.3 Läänemere süvavee tsirkulatsioon

Keskmine vooluhulk Läänemerre läbi Kattegati on $38\ 100\text{m}^3/\text{s}$, mille soolsus on umbes $20\text{--}30\text{g}/\text{kg}$, suurte sissevoolude ajal suurem ning muidu vähem. Vesi liigub edasi Läänemere avaossa ja lahtedesse mööda kanaleid ning üle künniste. Esimeseks basseiniks on Kattegat, mis on üleminekualaks Põhjamerelt Läänemerele. Selles basseinis toimub Põhjamerest tulev soolase vee, mis liigub oma tiheduse tõttu põhja lähedal, ning Läänemerest tuleva magedama vee, mis on veesamba ülemistes kihtides, vertikaalne segunemine. Läänest ida poole liikudes järgneb Taani väinadele Arkona bassein, mille maksimaalne sügavus on 53 meetrit. Mööda Hamrare väinas asuvat Bornholmi kanalit liigub vesi edasi Bornholmi basseini, mille keskmine sügavus on $60\text{--}80$ meetrit ning maksimaalne sügavus 105 meetrit. Kõige sügavam kanal, mida mööda liigub vesi edasi kaugemale Läänemerre, on Stolpe kanal, mis on ühenduseks Ida-Gotlandi basseini. (Leppäranta&Myrberg 2009, 42-43)

Ida-Gotlandi basseinist edasi liikumiseks on kolm põhilist suunda: lõunas Gdanski laht, idas Riia laht ning põhjas Põhja-Gotlandi bassein, mis on neist kõige suurem ning ühenduslüli Soome lahe, Bothnia lahe ning Läänemere avaosa vahel. Künnise puudumise tõttu on Soome laht hüdrogeograafilises mõttes jätk Põhja-Gotlandi basseinile. Topograafilises mõttes annab neid siiski aga eristada: kui esimese puhul jääb keskmine sügavus kõigest 35 meetri juurde, siis teisel neist esineb suuri alasid, mille sügavus on enam kui 150 meetrit. (*Ibid.*, 46-51)

Kogu Läänemere veetsirkulatsioon toimub vastupäeva, mistõttu Läänemerelt Põhjamerre tagasi voolav vesi liigub mööda Gotlandi saare läänekülge läbides Lääne-Gotlandi basseini, kus paikneb ka eelnimetatud Läänemere sügavaim süvik: Landsorti süvik (459 m) (*Ibid.*, 49). Madalate ja kitsaste väinade poolt takistatud veevahetuse tõttu on Läänemere vee viibeaeg $20\text{--}30$ aastat, mis muudab ta väga tundlikuks keskkonnaprobleemidele (EE 2011 *sub* Läänemeri).

1.4 Läänemere sissevoolud

Põhjamerest tulev soolane vesi tekitab Läänemeres tugeva vertikaalse kihistumise, olles väga oluliseks hapnikusisalduse määrajaks põhjakihtides. Igapäevaselt sissevoolav vesi pole piisava tihedusega, et mõjutada hapniku kontsentratsiooni sügavamates basseinis, seetõttu on eriti olulised suured sissevoolud ehk *Major Inflow*. Ainult need on võimelised uuendama süvakihtide vett, tuues sinna soolast ning hapnikurikast vett. Ajaperioodi, mis jääb suurte sissevoolude vahele, kutsutakse stagnatsiooniperioodiks. Sel ajal langeb hapnikutase põhjalähedastes kihtides kriitilisele tasemele. (Leppäranta&Myrberg 2009, 158-159) Orgaanilise aine lagundamise tõttu langeb neil perioodidel hapnikukogus ning anaeroobse protsessi tulemusel moodustub H_2S (Scneider jt, 2002). Stagnatsioon kestab kuni järgmise suure sissevooluni, mis on piisava veehulgaga, et vahetada süvikutes olev hapnikuvaene vesi hapnikurikkaga.

Läänemere suured sissevoolud leiavad aset keskmiselt iga 10 aasta tagant. Nende harva esinevate sündmuste jaoks on vaja spetsiifilisi ning kindlaid tingimusi. Üheks põhiliseks teguriks on tugevad tuuled, mis kõigepealt puhuksid idast ning seejärel pöörduksid läände. Umbes 60% suurtest sissevooludest on aset leidnud novembrist jaanuarini, mil esinevad sobilikud tingimused. (Leppäranta&Myrberg 2009, 159-160)

Suured sissevoolud koosnevad kolmest põhilisest perioodist: eelperiood (*precursory period*), põhi-sissevoolu periood (*main inflow period*) ning järel-periood (*post-period*). Nende kolme perioodi jooksul võib merevee tase varieeruda -60cm kuni +70cm. Eelperioodi ajal on valdavaks idatuuled, mille tõttu puhutakse magedad pinnaveed Läänemeres välja ning sel perioodil langeb veetase miinimumini, mis kestab kuni põhi-sissevooluni. Meteoroloogilised tingimused selle perioodi lõpus on eriti olulised, kuna sissevool saab toimuda siis, kui tuuled pöörduvad selliselt, et vesi puhutakse Läänemeres idapoole ning veetase Taani väinades jääb madalaks.

Tugevaid läänetuuli suure sissevoolu ajal on vaja seni, kuni põhjalähedane vesi on jõudnud vähemalt Bornholmi basseini. Suure sissevoolu järelperiood hakkab siis, kui tuuled nõrgenevad ning veehulk, mis tuleb läbi Taani väinade, hakkab vähenema. Sel perioodil hakkab jälle merevee tase Läänemeres alanema (lisa 1). (Leppäranta&Myrberg 2009, 159-160)

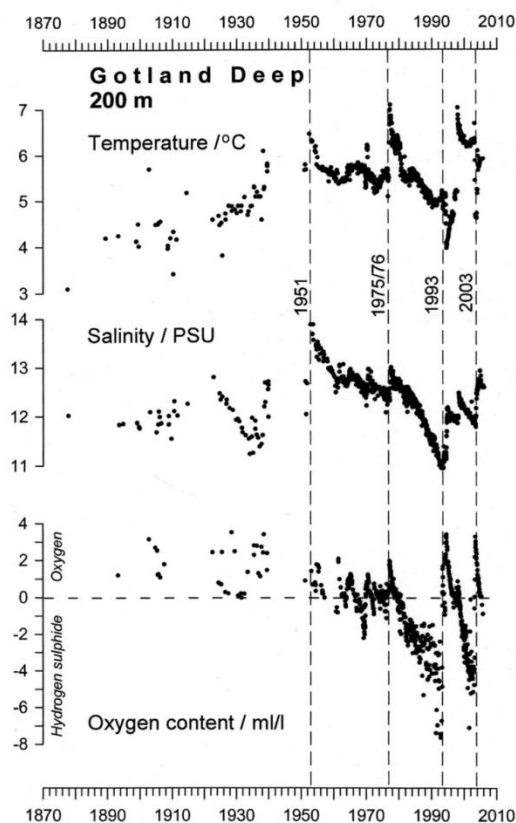
1.4.1 Suure sissevoolu mõju Soome lahele

Kui Läänemere avaosa basseinidele on suured sissevoolud hapnikusalduse suurendavaks teguriks, siis Soome lahes on mõju vastupidine. Hapnikutingimused võivad suurte sissevoolude ajal pigem halveneda, kuna vana ja hapnikuvaene vesi Gotlandi süvikust lükatakse edasi Soome lahte. Pika stagnatsiooniperioodi vältel võib Soome lahe halokliin kaduda ning põhjalähedasi kihte toidetakse atmosfäärist tuleva hapnikuga, mis jõuab sinna tänu vertikaalsele segunemisele. Sellele aitavad kaasa ka tugevad sügis- ja talvetormid. (*Ibid.*, 306)

1.4.2 1993 aasta suur sissevool

Kirjeldamiseks paremini, kuidas mõjutavad suured sissevoolud Läänemere süvakihte, toob käesoleva töö autor Matthäusi aruande abil näite 1993 aasta suurest sissevoolust (Joonis 3), mis on üks suurimaid aastatel 1880 – 2005. 1993 aasta suur sissevool leidis aset 17 aastat pärast Gotlandi basseinis valitsenud stagnatsiooniperioodi. Vooluhulk, mis sel ajal Läänemere voolas oli umbes 310km³ vett. Suure hulga soolase vee tõttu tõusis Arkona basseinis olev halokliin 38 meetri pealt 10 meetri peale. Suur sissevool mõjutas nõrgalt ka Põhja-Gotlandi basseini ning seeläbi ka Soome lahte. (*Ibid.*, 169)

Joonisel 3 on märgitud Gotlandi süvikus 300 meetri pealt mõõdetud temperatuuri, soolsuse ja hapniku pikaajalised variatsioonid. Sealt on näha, kuidas temperatuur suure sissevoolu ajal langes ning seejärel stagnatsiooniperioodil jälle tõusis. Erinevalt temperatuurist oli soolsusel ja hapnikul positiivne tõus, vastavalt 11g/kg enne sissevoolu ja 12-13g/kg pärast sissevoolu ning negatiivsest hapniku kontsentratsioonist 4ml/l juurde. Kuid sissevoolule järgneva stagnatsiooniperioodi kohaselt langes vees nii soolsus kui ka hapnikusisaldus. Sissevoolanud vee hapnikutase langeb kiiresti, kuna vees olev hapnik tarbitakse organismide poolt ära (Lips&Lips 2013) ning suurest soolsusest tekkinud stratifikatsiooni tõttu ei pääse pinnakihtide hapnikurikas vesi põhjakihtidesse.



Joonis 3. Gotlandi süviku 300 meetri sügavuselt mõõdetud temperatuuri, soolsuse ja hapnikukontsentratsiooni pikaajalised variatsioonid (Matthäus 2006, 55)

1.5 Hapniku ammendumine ja Läänemere eutrofeerumine

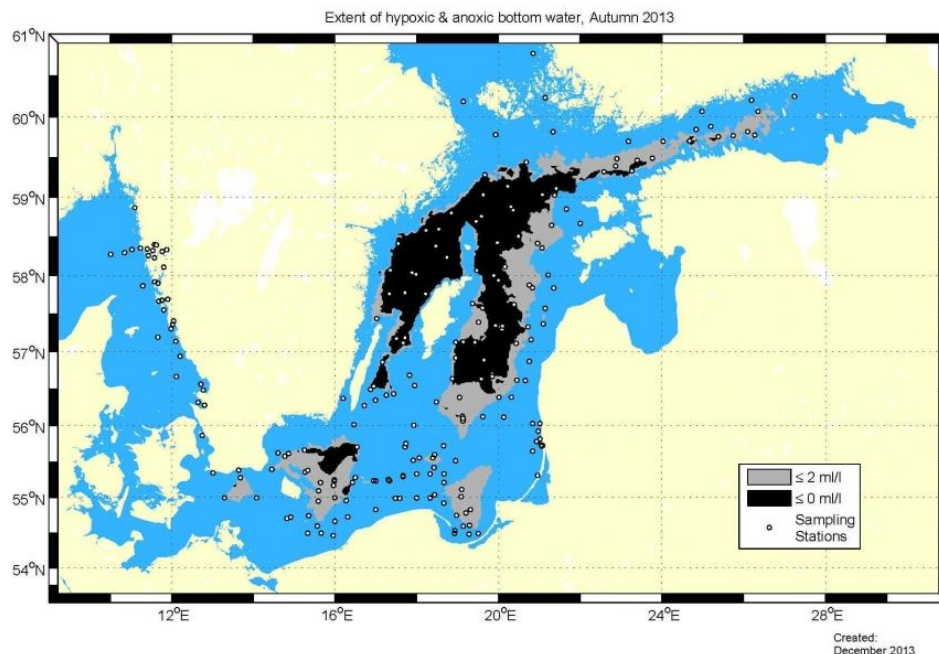
Hapnik on vees raskesti lahustuv ja hapniku küllastuse kontsentratsioon on sõltuv kolmest parameetrist: temperatuur, õhurõhk ja lahustunud tahked ained. Lahustunud hapniku olemasolu määrab ära, kas jääkained lagundatakse ära aeroobse (hapnikuga) või anaeroobse (ilma hapnikuta) protsessiga. Kui aeroobne protsess kasutab reaktsiooni käigus hapnikku ning toodab suhteliselt kahjutu lõpptoote, siis anaeroobne protsess on veekogu jaoks kahjulik nähtus. (Maidment 1999)

Anaeroobsed protsessid on üheks hapniku ammendumise märgiks. Hapnik hakkab ammendumas piirkondades, mis jäävad allapoole halokliini, sest seal olev vesi on olnud pikka aega isoleeritud ülemistest hapnikurikastest veekihtidest. Selle tagajärjeks võib olla hüpoksia ehk hapnikuvaegus (hapnikusisaldus $<2\text{ml/l}$) või anoksia ehk hapnikupuudus (hapniku täielik puudumine, vees esineb väävelvesinik) (SMHI 2014). Hapnikuvaene keskkond mõjutab kogu merekeskkonna ökosüsteemi. Anaeroobses keskkonnas toimuvate protsesside käigus produtseeritud väävelvesinik on mürgine kõikidele suurematele organismidele, mille tulemusel sureb suurem osa merepõhja elustikku (SMHI 2014). Tekivad nn „ökoloogilised kõrbed“ (Zillen jt, 2008).

Kõige madalam hapniku kontsentratsioon esineb suve lõpus, augusti ja oktoobri vahel, kui pinnaveses toimunud bioloogilise aktiivsuse tagajärjel tekkinud orgaaniline aine settib põhjakihtidesse, kus bakterid hakkavad seda lagundama. See protsess on aeroobne ning bakterid kasutavad selleks vees olevat hapnikku. Hapniku kontsentratsiooni langemisel alla 1ml/l muutub protsess anaeroobseks, mille tulemusel toodetakse väävelvesinikku. Viimane on aga mürgine ning selle ilmumine vette on märk sellest, et vees olev lahustunud hapnik on ära kasutatud. (Axe 2010) Sellised sündmused võivad olla kas episoodilised, sõltuvalt aastaajast (suvi/sügis) või püsivad. Pikaajaline negatiivne hapniku kontsentratsioon esineb sügavamates Läänemere avaosa basseinides: Bornholm bassein, Gdanski süvik, Ida – ja Lääne-

Gotlandi süvikud ja Läänemere avaosa põhja osas. Soome ja Riia lahes on hapnikuvaegus hooajaline. Bothnia lahes ei ole tähele pandud kumbagi hapnikuvaeguse esinemist: ei hooajalist ega ka pikaajalist. (Brusendorff jt, 2010)

Alljärgnev joonis 4 annab ülevaate Läänemere avaosa ja Soome lahe piirkondadest, kus esineb hüpoksiat (hapnikusisaldus $<2\text{ml/l}$) ning anoksiat (hapnikusisaldus on negatiivne ja vees esineb väävelvesinikku). Joonis on kokku pandud 2013.aasta sügisel kogutud mõõtmisandmete põhjal. Nii laialdase hapnikupuuduse põhjuseks on suurte sissevoolude puudumine. Viimane suurem sissevool toimus 2003-2004 talvel, enne seda 1993.aastal (Hansson&Andersson 2013). Sama autor on väitnud ka, et 2011 aasta lõpus ja 2012 aasta jooksul toimunud tavapärasest suuremad sissevoolud olid küll piisavad, et parandada hapnikutingimusi Arkona, Bornholmi basseinis ja Ida-Gotlandi lõunaosas, kuid mitte sügavamates Läänemere avaosa basseinides.



Joonis 4. 2013 aasta sügisel mõõdetud andmete põhjal piirkonnad Läänemeres, kus esineb hapnikuvaegust (hall) ning hapnikupuudust (must) (Hansson&Andersson 2013)

1960.aastast alates on hapnikuvaeste piirkondade pindala Läänemeres kasvanud umbes neli korda. Hetkel katab see 41 000 km² suurust ala. Selle probleemi suurenemise põhjuseks peetakse toitainete, eelkõige inimtegevuse tagajärjel merre sattuvate lämmastiku ja fosfori, koguse suurenemist. (Zillen jt, 2008) Näiteks 2000.aastal sattus Läänemerre 100 970 tonni lämmastikku, mis 75% ulatuses tuli vee (eelkõige jõgedes) kaudu ning 25% õhu kaudu, ja 34 599 tonni fosforit, mis enamasti on pärit jõgedest. Mõlemad toitained satuvad merre enamasti põllumajanduse tagajärjel. (Leppeäranta&Myrberg 2009, 310)

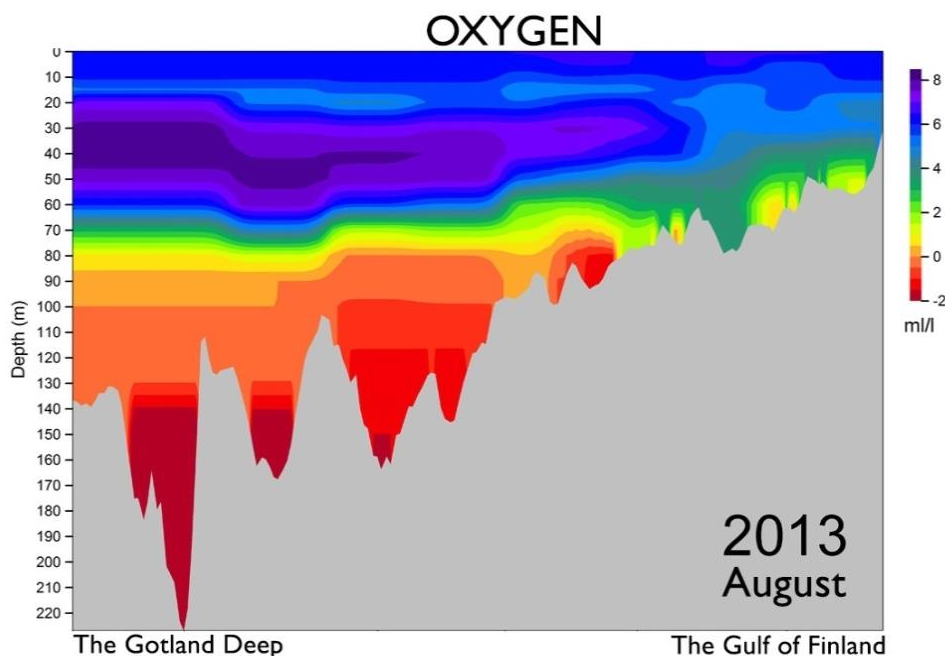
Toitainete suurenenud kogused koos halokliini ning suure vee viibeajaga on Läänemere eutrofeerumise põhjuseks. Suur toitainete kogus aitab kaasa veeõitsengule ja orgaanilise aine ületootmisele. See omakorda suurendab hapniku tarbimist ning selle tulemusena langeb hapnikusisaldus vees, eriti sügavamates basseinides, kus on tugev vertikaalne kihistumine, mille tõttu ei saa toimuda hapnikurikka vee segunemist põhjakihtide ja pindmiste kihtide vahel. Lisaks merekeskkonna suremisele, põhjustab hapniku ammendumine ka sisekoormuse suurenemist ehk fosfori- (Leppeäranta&Myrberg 2009, 311-312) ja räniühendite vabanemist põhjasetetest (Hansson&Andersson 2013). Samade autorite töös on kirjutatud ka, et vertikaalse segunemise tõttu jõuavad need pindmistesse valgusega kihtidesse, kus kõrge fosfaatide kontsentratsioon on hea keskkond fütoplanktoni vohamiseks, eriti tsüanobakterile suveperioodidel. Seega võib öelda, et hapniku ammendumine on üks märgiks veekogu eutrofeerumisele.

1.5.1 Soome lahe hapnikusisaldus ja eutrofeerumine

Soome Keskkonnainstituudi andmetel on viimaste aastate jooksul Soome lahes hapniku tingimused halvenenud (Finnish Environment Institute 2013). Sama uuringute tulemustel saab väita, et lahes on tugevnenud ka soolsuse stratifikatsioon, mis ei lase ülemisel hapnikurikkal ning alumisel hapnikuvaesel veekihil omavahel

seguneda. Mõõtmiste tulemused näitavad, et hapnikutingimused on halvemad just Eesti rannikul, kus põhjakihtides esineb ka väävelvesinikku. Eelmises peatükis välja toodud fosfori vabanemise põhjused põhjasetetest peavad paika ka Soome lahe kohta. Neis piirkondades, kus esineb hapnikuvaegust, on tähele pandud fosforisisalduse kasvu. Kuigi võrreldes eelmise aastakümne algusega on fosforisisaldus üldiselt madalam, siis viimastel aastatel on see näidanud jälle tõusutrendi. (Finnish Environment Institute 2013) Tänu halbadele hapnikutingimustele, Läänemere suurima jõe sissevoolule ning tihedalt asustatud valgalale, on Soome laht Läänemere kõige eutrofeerunud basseini (Laine jt, 2007). Samade autorite töös on välja toodud, et Soome lahes esineb suur toitainete ida-suunaline gradient, mille põhjustab eelkõige Neva jõgi, mille vooluhulk on 25% kogu Läänemerre suubuvast mageveest. (Lisa 2).

Joonisel 5 on näidatud Läänemere hapnikusisaldus (ml/l) 2013 aasta augustis. Joonise paremal pool on Soome lahe hapniku kontsentratsioon, millelt on näha hüpoksia (lahustunud hapnik <2ml/l) esinemist allpool 50 meetrit.



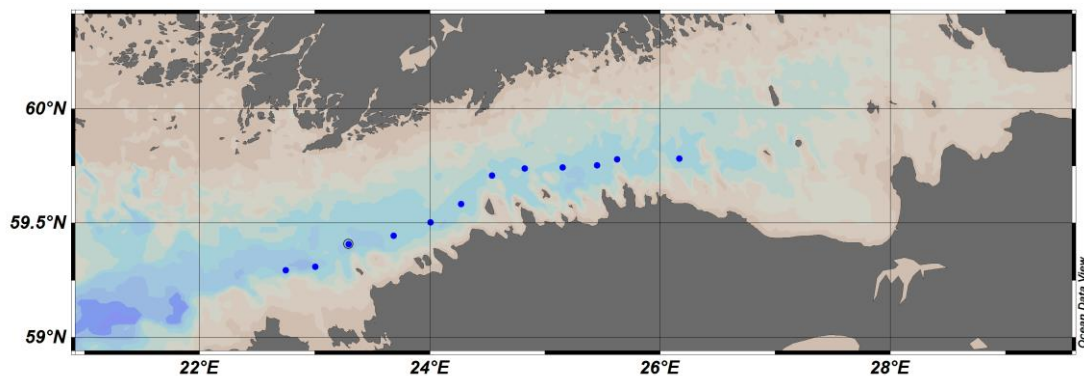
Joonis 5. Läänemere hapnikusisaldus ml/l 2013.august (Finnish Environment Institute 2013)

2. METOODIKA

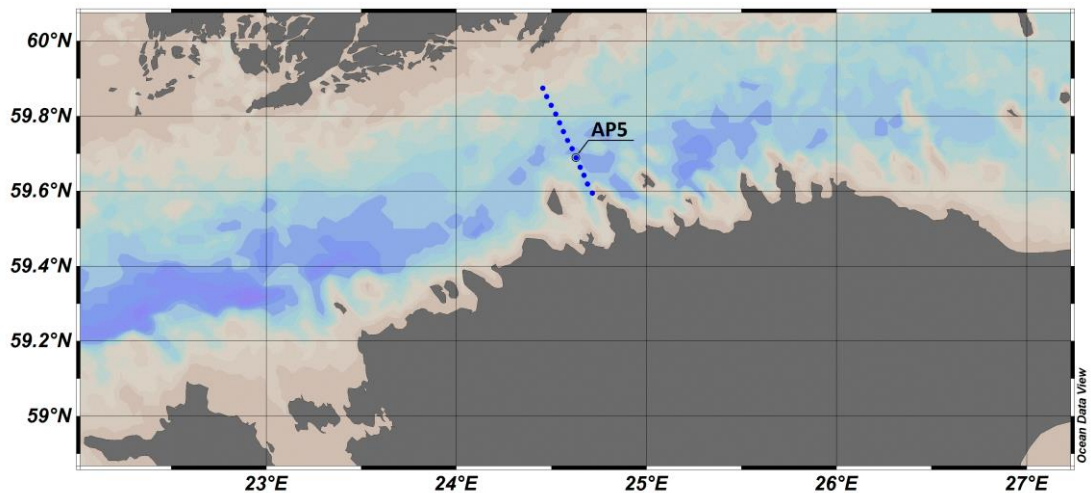
2.1 Uuritav ala

Uuritavaks alaks on Läänemere kirdeosas asuv Soome laht. Soome laht on Läänemere kõige idapoolsem bassein, mis on ümbritsetud Soome, Venemaa ja Eestiga. Soome laht on oma kujult väljavenitatud ning kitsas, mille veevahetus Läänemerega toimub vabalt ilma künnisteta. Kõige sügavam, Paldiski sügavik 123 meetrit, jääb Eesti ranniku lähedale, mis on võrreldes Soome lahe põhjarannikuga, kus esineb palju fjarde ning keskmine sügavus jääb 20-40 meetri juurde, palju sügavam ning ühtlasema rannikuga. Samuti muutub Soome laht madalamaks ka liikudes idasuunas. (Leppäranta&Myrberg 2009, 52-53)

Käesolevas töös on vaadeldud kokku 25 jaama, millest 12 on piki lahte (joonis 6) ning 13 risti lahte (joonis 7). Piki lahte olevate jaamade nimetused algavad vasakult A1 kuni paremale lõppedes A12. Risti olev lõik on jaamadega AP1 kuni AP13 alates Aegnast ning lõppedes Porkkalas. Ristlõikele jääb ka jaam AP5, mille kohta on tehtud eraldi uuringuid.



Joonis 6. 12 jaama piki lahte



Joonis 7. 13 jaama risti lahte

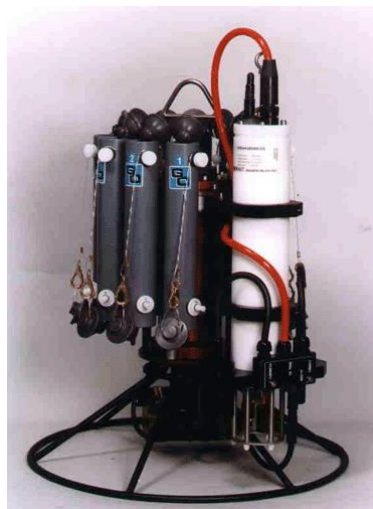
2.2 Hapniku kontsentratsiooni määramine CTD sondiga

CTD-sond mõõdab elektrijuhtivust (*conductivity*), temperatuuri (*temperature*) ja sügavust (*depth*). Hoolimata nimes esinevast sügavusest, mõõdab CTD sond selle asemel tegelikult rõhku. Seos nende kahe parameetri vahel on määratud vee tihedusest ja kokkusurutavusest ning kohalikust gravitatsioonivälja tugevusest. CTD sondi abil saab arvutada soolsust, tihedust, helikiirust ja palju muudki. Tänapäeval on CTD sondid varustatud mitmete täiendavate anduritega, millega registreeritakse ka näiteks lahustunud hapniku sisaldust, pH, hägusust, klorofüll a fluorestsentsi ja teisi parameetreid. CTD sonde kasutatakse tavaliselt koos veeproovide kogujaga, mis võimaldab võtta veeproove erinevatelt sügavustelt nende hilisemaks analüüsiks laboris. (Seabird)

Tallinna Tehnikaülikooli Meresüsteemide Instituudi CTD sondidel on kasutuses kahte tüüpi hapnikuandurit: Seabird ja Idronaut. Käesoleva töö uurimus on tehtud

Idronaudi hapnikuanduri poolt mõõdetud tulemuste põhjal, mis koosneb kahest elektroodist: anood ja katood. Sõltuvalt membraani valikust, mis katab elektroode, varieerub Idronaudi hapnikuanduri reageerimisaeg 1 sekundist kuni 3 sekundini. Membraani peale asetatakse gaase läbilaskev anum membraaniga, mis on täidetud spetsiaalse elektrolüüdiga, mis võimaldab mõõta voolu anoodi ja katoodi vahel (Idronaut). Anduri töö põhimõtteks on mõõta ühe sekundi jooksul membraani läbinud hapniku molekulist vabanenud elektrone. Viimased tekivad katoodil, kus iga moodustunud hüdroksüülioon (OH-) annab iga reaktsiooni käigus ühe molekuli kohta neli elektroni. Teisel elektroodil – katood – vabanevad tekkinud hõbekloriidist lahusesse hõbeioonid (Ag⁺). Selline pidev keemilise koostise muutus ümber elektrolüütide muudab hapniku mõõtmise aeglaseks ning tekitab mõõdetud andmetes ajalise triivi. See on kiirendatud suurte hapniku kontsentratsioonide juures ning langeb nulli hapnikuvaeguse korral. (Seabird, 2013) Seetõttu tuleb esmase töötluse juures arvestada anduri inertsiga ning teostada samaaegselt mõõtmisi ka laboris.

Joonis 8 annab illustreeriva ülevaate Idronaut CTD sondist, kuhu on lisaks sondile ühendatud ka karusell-proovikoguja. Valgem suurem silinder on CTD sond, ning hallid pudelid on lahtised proovikogujad.



Joonis 8. CTD sond koos karusell-proovikogujaga. (Alliance for Coastal Technologies)

2.3 Hapnikusisalduse määramine laboris

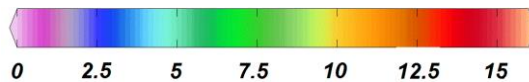
Kõrvaldamaks CTD sondiga tekkinud kalibreerimise viga, tuleb sellele lisaks teostada mõõtmisi ka laboris. Hapnikusisalduse määramiseks on TTÜ Meresüsteemide Instituudi uurimislaeva laboris aparaat VWR-OX4000. Proovid selle jaoks kogutakse karusell-proovikogujaga, mis on kinnitatud CTD sondi külge. Sellist mõõtekompleksi nimetatakse rosetiks. Rosett lastakse vette kaabeltrossi abil, mis on roseti juhtimiseks ühendatud pardal oleva arvutiga. Seadet vette lastes avatakse kõik proovivõtu pudelid ning niimoodi lastakse rosett põhjale võimalikult lähedale. Vältimaks roseti laskmist vastu põhja, tuleb kajaloodilt võtta sügavus ning vahetult enne põhja vints seisma jätta. Selle juures tuleb arvestada laineid ning nihet, mis tekib pardal trossi seisma jätmisega kuni roseti stabiliseerumiseni. Proovid kogutakse seadme liikumisel alt üles ning pudelid suletakse soovitud sügavustel roseti seisma jätmisega. Seejuures tuleb samuti arvestada lainete ning nihkega, mistõttu on kohustuslik enne pudeli sulgemist oodata 1 – 2 minutit. Kui rosett pardale tagasi tõstetakse võetakse esimesena hapniku proovid, et võimalikult vähe satuks veeproovidesse õhus olevat hapnikku. Hapnikukontsentratsioon laboris määratakse juba eespool mainitud aparaadiga VWR-OX4000. Proove tuleb hoida otsese päiksekiirguse eest, kuna vastasel juhul hakkavad toimuma bioloogilised tegevused ning vees olev hapniku kontsentratsioon muutub. Seetõttu on oluline alustada ka kõige sügavamalt võetud proovist. Hapnikusisalduse määramiseks asetatakse proovipudeli sisse magnetkuul, mis ajab vett ringi tagades vee segunemise. Hapnikusisalduse proovis mõõdab elektrood, mis annab hapniku kontsentratsiooni nii protsentuaalselt kui ka mg/l. Tulemus kirjutatakse üles, kui näit on stabiliseerunud.

2.4 Kasutatud andmed ja nende töötlus

Käesoleva töö hapniku andmed on mõõdetud Idronaudi hapnikuanduriga ning uurimislaev Salme pardal laboris viimase kolme aasta jooksul. Hapniku määramiseks ruumiliselt on kasutatud andmeid piki ja risti lahte, vastavalt jaamadest A1-A13 ning AP1-AP13. Hapnikusisaldus ajaliselt on määratud AP5 jaama andmetega mai-august 2012 ja 2013. Samuti on kasutatud AP5 jaama labori andmeid, et hinnata hapnikusisalduse muutuste korrelatsiooni soolsuse ja tiheduse muutustega.

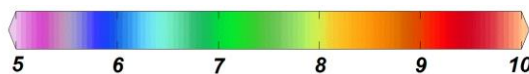
Esmase töötamise käigus on arvestatud hapniku anduri inertsiga 10–15 sekundit. Edasiselt on andmeid töödeldud peamiselt Ocean Data View 4'ga (ODV) ja Microsoft Exeliga. ODV graafikute joonistamisel on interpoleerimise võrgustikuks kasutatud *DIVA griddingut* ning veeparameetrite väärtuste vahemikud graafikutel on valitud järgmiselt:

- hapnik ja klorofüll 0-16, ühikutega vastavalt mg/l ja mikrogrammi/l (joonis 9)



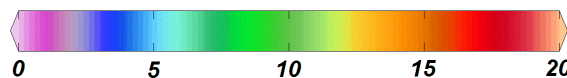
Joonis 9. Hapniku ja klorofülliga graafikutel kasutatud väärtuste vahemik

- soolsus 5–10 PSU, mis antud töös võib võrdseks lugeda eelpool kasutatud ühikuga g/kg (joonis 10)



Joonis 10. Soolsuse graafikutel kasutatud väärtuste vahemik

- temperatuur 0–20 (joonis 11)



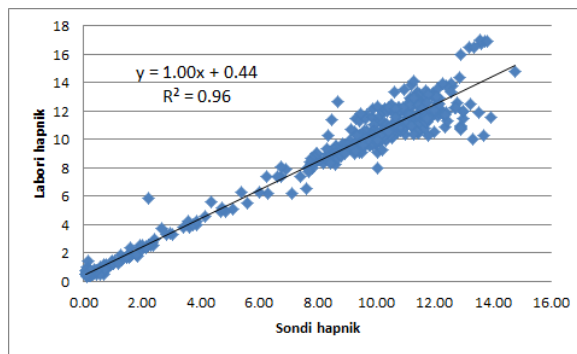
Joonis 11. Temperatuuri graafikutel kasutatud väärtuste vahemik

3. TÖÖ TULEMUSED

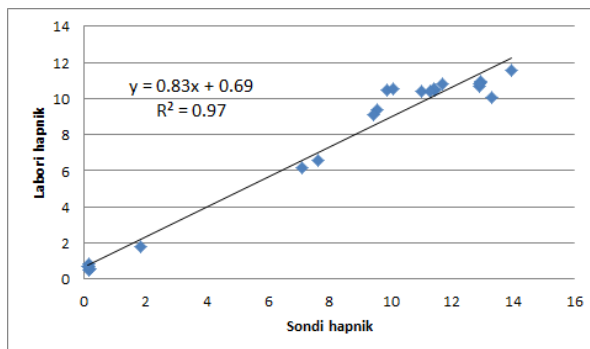
3.1 Hapnikupilved

Hapnikuandmete usaldusväarsuse näitamiseks on tehtud hapnikupilved, mille jaoks on kasutatud TTÜ Meresüsteemide Instituudi 25 hapniku protokollide kolme aasta jooksul (2012-2014). Alljärgnevad joonised näitavad laboris mõõdetud (vertikaaltelg) ja sondeeritud (horisontaaltelg) andmete kokkulangevust. Joonisel 12 on välja toodud kõigi 25 reisi protokollide labori mõõtmiste ja sondeerimiste vaheline seos. Sellel joonisel on regressioonisirge esimene liige 1 lähedal, mis näitab üldist head mõõtmistulemuste kokkulangevust labori ja sondeerimise tulemuste vahel. Kuid esineb ka üksikuid mõõtmisi, kus kokkulangevus pole hea ja andmed pole usaldusväärsed ning enne andmete kasutamist tuleb neid töödelda. Näideteks on välja toodud 2.07.2013 ja 21.06.2013 reise hapnikumõõtmised, vastavalt joonis 13 ja joonis 14. Selline nähtus võib olla tingitud mitmest asjaolust. Ühest küljest võib tekkida viga Idronaudi hapnikuandurist, mis pole korralikult kalibreeritud ning on aeglane. Samuti väga vaikse ilma puhul, mil ei teki olulist lainetust, ei liigu vesi andurist piisava kiirusega mööda ning andur mõõdab vale tulemuse. Teisest küljest võib olla viga tekkinud laborimõõtmistes. Seda kinnitab regressioonisirge vabaliige, mis on kõigil kolmel joonisel positiivne, näidates laboriandmete suuremat tulemust kui sondeerimisel. Selline erinevus võib tekkida hapnikuproovi võtmisest batomeetrist kuni hapnikusisalduse fikseerimiseni laboris. Esimese puhul tekib viga, kui vett ei lasta pudelist piisavalt välja voolata, nii et pudelisse jääb atmosfääris oleva hapnikuga segunenud vesi. Proovi mõõtmise lõppfaasis on paratamatu, et hapnikutingimused on muutunud, kuna proov on vahepeal kokku puutunud valgusega, mille tagajärjel hakkavad toimuma erinevad bioloogilised tegevused, ning mingil määral pääseb proovi ka õhus sisalduv hapnik, muutes põhjakihtide proovi hapnikurikkamaks ning pinnakihtide proovi hapnikuvaesemaks. Seetõttu tuleb

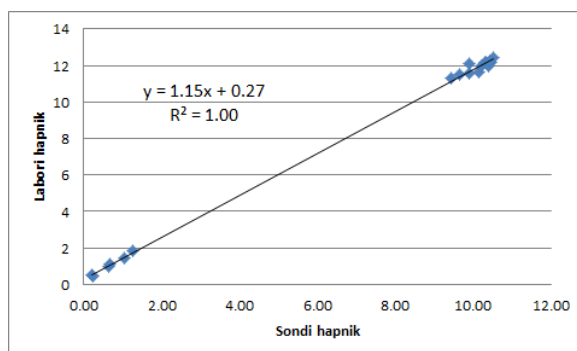
laboris teostada esmajärjekorras süvakihtide proovid ning seejärel pinnakihtide, et niigi väiksest hapnikusisaldust ei mõjutaks atmosfääritingimused.



Joonis 12. Sondiga ja laboris mõõdetud hapniku sisalduse andmete kokkulangevus 25 protokollil põhjal 2012-2014



Joonis 13. 2.07.2013 hapniku protokollil labori ja sondeerimise andmete kokkulangevus.



Joonis 14. 21.06.2012 hapniku protokollil labori ja sondeerimise andmete kokkulangevus.

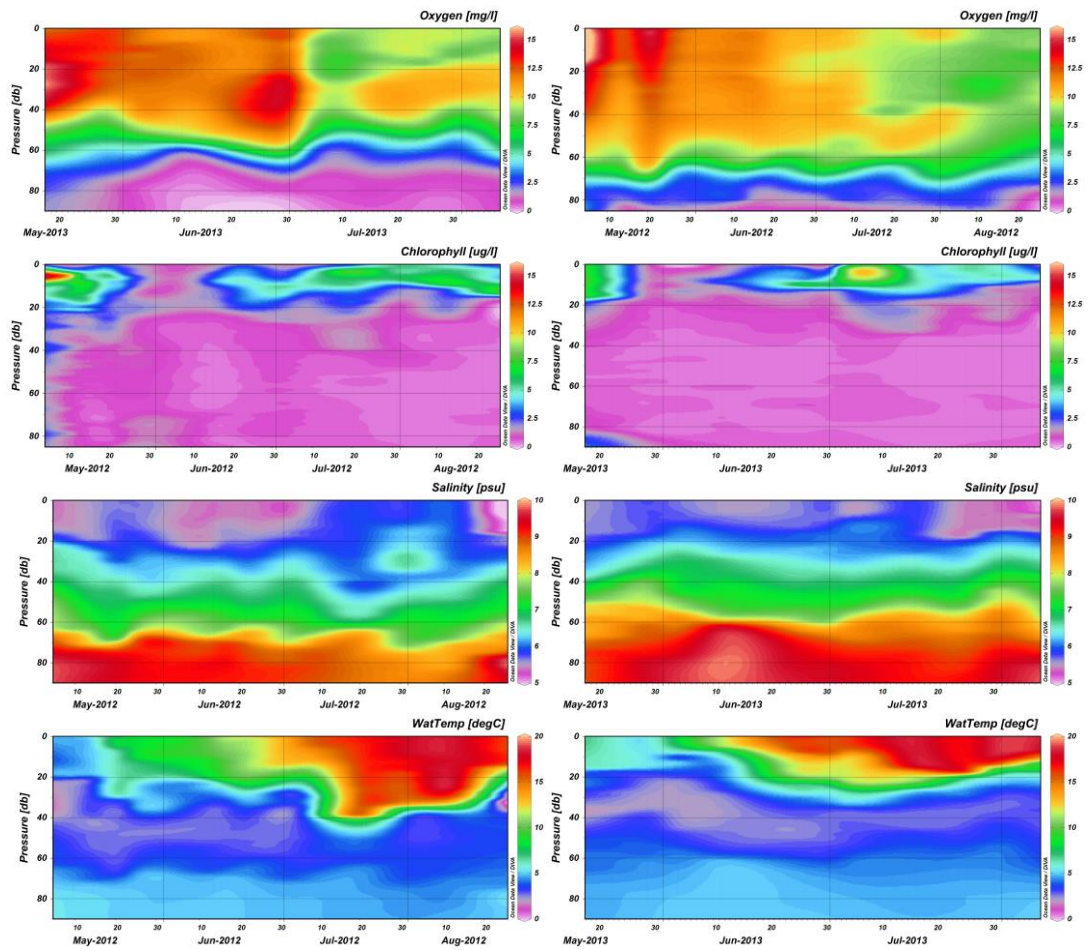
3.2 Hapniku muutus ajaliselt

Hapnikusisalduse muutus ajaliselt, koos teiste veeparameetritega (klorofüll, soolsus, veetemperatuur), on kirjeldatud 2012 ja 2013 aasta vahemikus mai-august jaamast AP5 (Joonis 15). Joonistelt on näha tüüpilist sesoonset hapniku muutust: kevadel on hapniku tingimused paremad ning suvel hapnikusisaldus langeb. See on tingitud peamiselt kahest asjaolust: kevadine õitseng ja veetemperatuur. Kevadise õitsengu ajal suureneb oluliselt pinnakihtides bioproduksioon, mida näitavad ka klorofülliga graafikud. Selle tagajärjel vabaneb vette hapnikku. Sarnaselt kevadel aset leidnud suurene õitsenguga, suureneb klorofüllis sisaldus vees uuesti juuli algusest, kuid hapniku tingimused ei parane. Selle põhjustajaks on veetemperatuur, mida seletab gaaside üldine lahustuvuse seadus: temperatuuri tõus ja hapniku lahustuvus on omavahel mittelineaarses seoses ehk külmas vees on hapniku küllastus suurem kui soojas vees. Seda seost on hästi näha 2013 aasta graafikutel, kui juuli alguses on klorofüllis väärtused suuremad kui mai lõpus, kuid tänu kõrgemale veetemperatuurile on hapniku küllastus väiksem ning üldised hapnikutingimused halvemad.

2012 aasta hapnikugraafikult on näha, et pinnakihis on hapnikusisaldus umbes 10mg/l, siis väheneb ja umbes 40 meetri peal paraneb jälle ning seejärel pärast halokliini läheb järsult alla. Vahepealset hapniku miinimumi kihti kutsutakse termokliini miinimumiks, mida põhjustab bioproduktiooni jääk, mis sinna kihti settides püsima jääb. Lagundamise käigus seotakse vees olevat hapnikku ning selle tagajärjel väheneb ka hapnikusisaldus selles kihis.

Soolsuse- ja hapnikugraafikuid omavahel võrreldes peab paika kirjandusülevaates seletatud teooria, et halokliinist allapoole halvenevad oluliselt ka hapnikutingimused. 2012 aastal asus halokliin keskmiselt 65 meetri peal ning hapniku graafikult on näha samuti, et hapnikvaene keskkond, kus hapnikusisaldus vees jääb alla 2mg/l, on allpool 65 meetrit. 2013 aastal olid põhjakihtide hapnikutingimused veelgi halvemad,

mil halokliini on märgata kohati juba 55 meetri pealt ning hapnikuvaegust keskmiselt 60 meetri peal.

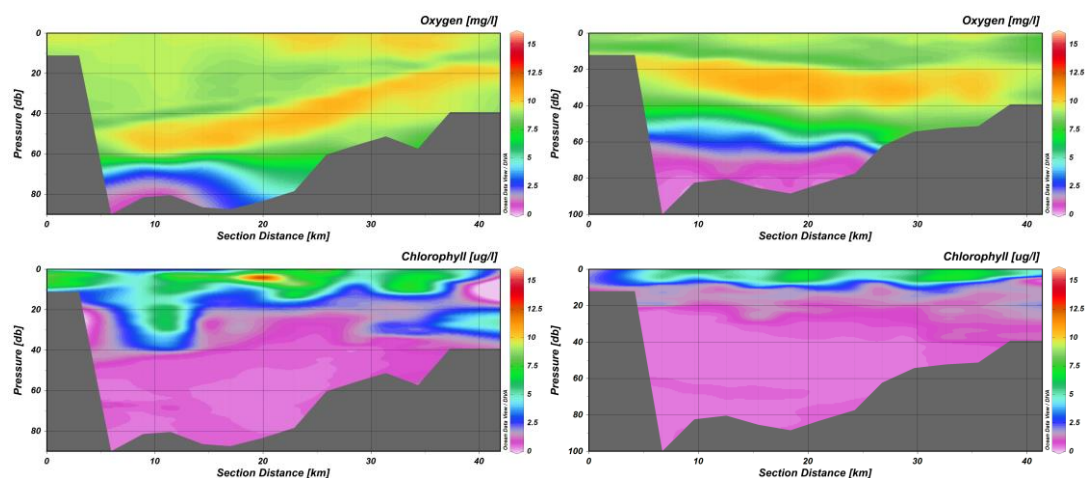


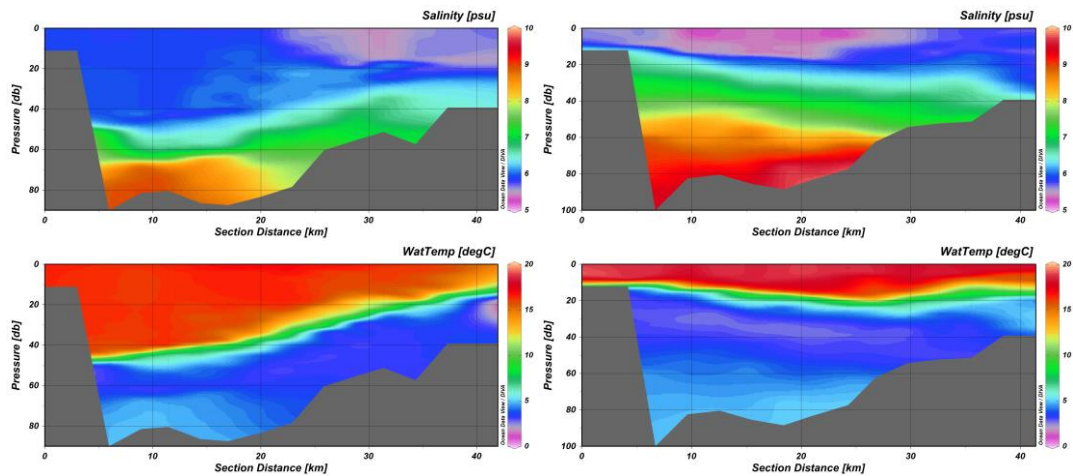
Joonis 15. AP5 jaama veeparameetrite ajaline muutus mõõdetuna mai-august 2012 (vasakpoolne tulp) ja 2013 (parempoolne tulp)

3.3 Hapniku muutus ruumiliselt

Käesolevas peatükis on omavahel võrreldud 2012 ja 2013 aasta juuli lõpu hapnikusisaldust, koos teiste veeparameetritega (klorofüll, soolsus, veetemperatuur), risti Soome lahte ning 2014 aasta aprillikuu veeparameetreid (hapnik, klorofüll, soolsus, veetemperatuur) piki Soome lahte.

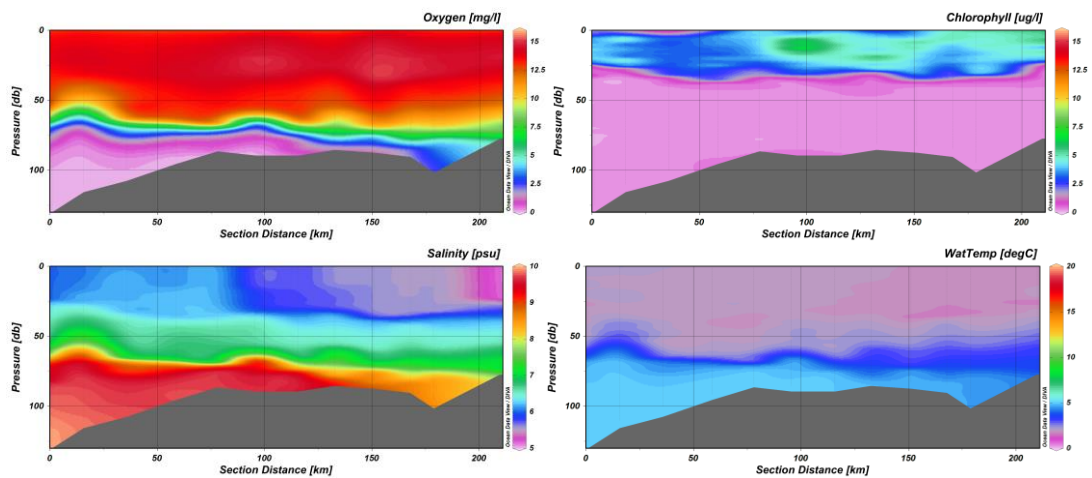
Joonisel 16 on välja toodud veeparameetrite muutus risti Soome lahega, kusjuures horisontaaltelje nullpunkt on Aegna ning lõpp-punkt Porkkala. 2012 aasta jooniselt on selgelt näha Eesti aladel pindmiste vete sukeldumist ehk daunvellingut, mille on põhjustanud tugevad läänetuuled. EMHI andmetel puhus viie päeva jooksul lääne tuul keskmiselt 6m/s ning 16.juulil 2012 oli Soome lahe Eesti rannikul pagid keskmiselt 16m/s. Daunvellingut kinnitavad hapniku ja temperatuuri graafikud, mille kohaselt asub nii termokliin kui ka hapniku miinumkiht Eesti ranniku lähedal sügavamal ning Soome rannikul kõrgemal. Samu tulemusi on näha ka soolsuse graafikult, kus halokliin 2012.aastal hakkab umbes 60-65 meetri juurest ning 2013.aastal juba 50-55 meetri juures. Daunvellingu tagajärjel on ka termokliin nihkunud allapoole ja seeläbi ka suvine termokliini miinum hapniku graafikul, mida on Eesti aladel märgata 40 meetri sügavusel.





Joonis 16. Soome lahe veeparameetrite muutus risti lahte, mõõdetuna 20.07.2012 ja 30.07.2013

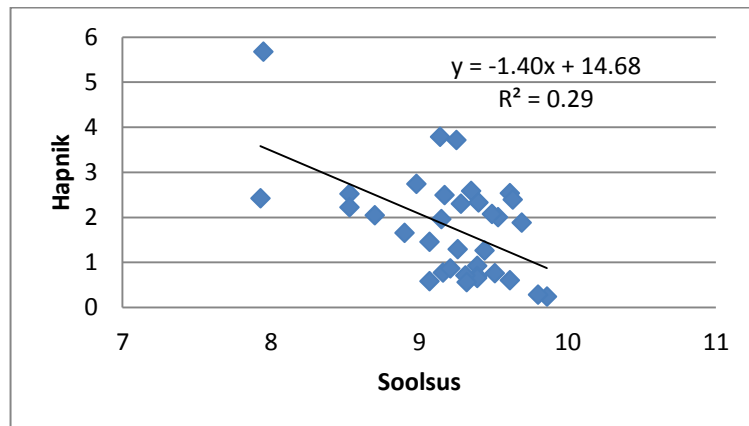
Joonisel 17 on kujutatud hapniku graafikut koos teiste veeparameetritega (klorofüll, soolsus, veetemperatuur) piki Soome lahte 3.04.2014. Joonised on tüüpilised Soome lahe kevadele. Soolsuse ja hapniku graafikut on näha eeltoodud seaduspära, et soolasem ja hapnikuvaesem põhjakihtide vesi asub lahe sügavamas läänepoolses osas, olles mõjutatud Läänemere süvabasseinidest, samas kui idapoolset lahe osa mõjutab Läänemere suurim jõgi – Neva. Soolsuse graafikul on halokliini märgata umbes 60 meetri sügavusel ning sellega sarnaselt muutuvad ka hapnikutingimused hüppeliselt halvemaks. Veetemperatuuri graafikult on näha, et põhjakihtide vesi on soojem kui pinnakihtide, mis on iseloomulik talvele ja kevadele, kui pinnakiht pole veel läbi soojenenud. Klorofülliga graafikult on märgata mõningast suurenenud klorofüllilahe kesk- ja idaosas, mis võib tähendada kevadise õitsengu algust.



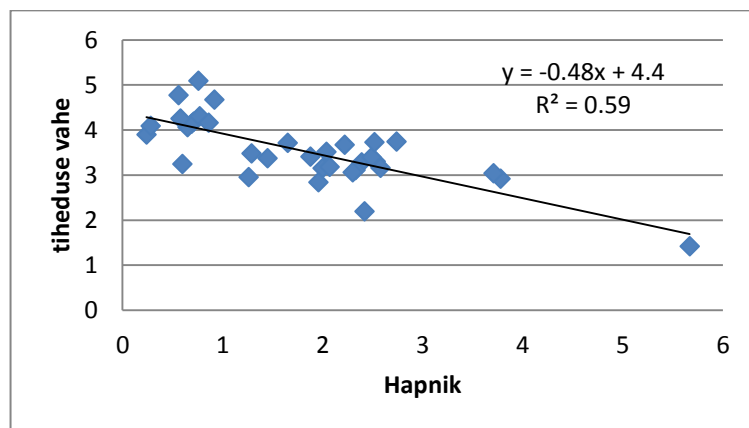
Joonis 17. Soome lahe veeparameetrite muutus piki lahte, mõõdetuna 4.03.2014

3.4 Hapniku korrelatsioon soolsuse ja tihedusega

Hapniku korraltsiooni leidmiseks soolsuse ja tihedusega on tehtud alljärgnevad joonised (joonis 18, joonis 19). Joonisel 18 on kujutatud hapniku korrelatsiooni soolsusega ning joonisel 19 hapniku korrelatsioon tihedusega vahega, kusjuures tiheduse vahe on arvatud 80 meetri ja 5 meetri vahena. Regressioonisirge determinatsioonikordaja väärtusest võib välja lugeda, et hapniku ja tiheduse vaheline seos on suurem kui seos hapniku ja soolsuse vahel. Selle järgi võib väita, et põhjakihtide hapnikuvaegus on tingitud pigem tugevast stratifikatsioonist kui soolasest veest, mis tuleb Läänemere avaosast Soome lahte.



Joonis 18. Hapniku ja soolsuse vaheline korralatsioon 80 meetri sügavusel jaamas AP5



Joonis 19. Hapniku ja tiheduse vahe vaheline korrelatsioon jaamas AP5. Hapniku väärtused on võetud 80 meetri sügavuselt ja tiheduse vahe arvutatud 80 meetri ja 5 meetri vahena.

4. TULEMUSTE ARUTELU

Eelnevalt on Soome lahe hapnikutingimusi aastatel 2011 detsember – 2012 mai uurinud Taavi Liblik jt. (2013). Erinevalt käesoleva töö autorist on nende mõõtmiste käigus kasutatud Seabirdi hapnikuandurit SBE 19*Plus*. Sarnaselt käesoleva tööga, jõudis Liblik oma artiklis järeldusele, et lahustunud hapniku kontsentratsioon on Soome lahes ida suunaliselt positiivse kasvuga. Nad on oma töös välja toonud, et 15–16.märtsil 2012 jääb läänepoolsetes jaamades hapnikusisaldus põhjalähedastes kihtides vahemikku 0–3mg/l ning idapoolsetes jaamades 5–8mg/l. Käesoleva töö graafikutelt tuleb välja sama seaduspära: läänepoolses osas on põhjalähedastes kihtides hapnikuvaegus, mil hapniku kontsentratsioon jääb 2mg/l juurde, samas kui idapoolsetes jaamades tõuseb hapnikusisaldus põhjalähedastes kihtides kuni 8mg/l.

Käesoleva töö autor jõudis oma töös tõdemuseni, et põhjalähedaste kihtide hapnik on tugevas korrelatsioonis tiheduse vahega pinna- ja põhjakihtide vahel. Selle tulemuse saamiseks võrreldi 2012 ja 2013 aasta veeparameetreid jaamas AP5. Sama järelduse püstitasid ka Liblik jt. (20013): mida tugevam on stratifikatsioon, seda halvemad on hapnikutingimused põhjakihtides. Sellest tulenevalt võib väita, et Soome lahe hapnikuvaegus on tingitud vertikaalsest kihistumisest ning Läänemere avaosast tulev soolane vesi on hapnikutingimuste määramisel väiksema kaaluga. Käesolevas töös on samas jaamas uuritud ka pinnakihtide hapnikusisaldust. Sellest järeldub, et kevadeti sõltub pinnakihtide hapniku kontsentratsioon kevadisest õitsengust ning suvel veetemperatuurist. Seda asjaolu põhjendab seaduspära, et temperatuur ja gaaside lahustuvus on omavahel mittelineaarses seoses ehk hapniku küllastus on külmas vees suurem kui soojas.

Risti Soome lahte teostatud graafikutest tuleb välja daunvelling, mida põhjustasid pikalt puhunud läänekaarte tuuled. Püsinud läänetuuled toovad lahte sisse pindmised hapnikurikkad veed, tekitades Eesti rannikul daunvellingu, ning surudes seeläbi põhjakihtide hapnikuvaese vee lahest välja. Selline veeliikumine on vastu Soome

lahe üldisele veetsirkulatsioonile, kuid aitab kaasa paremale vertikaalsele segunemisele. Daunvellingu tagajärjel sukeldub pindmine soojem magedam ja hapnikurikkam vesi sügavamatesse põhjakihtidesse, alandades halokliini ja parandades muuhulgas ka põhjakihtide hapnikutingimusi. Samadele järeldustele jõudsid oma töös ka Liblik jt. (2013).

Kuna varasemalt pole Idronaudi hapnikuanduriga mõõdetud hapniku andmeid kasutatud, siis uuris käesoleva töö autor lisaks hapnikusisalduse dünaamikale ka kasutatud andmete usaldusväärsust. Selle jaoks võrreldi omavahel viimase kolme aasta Idronaudi hapnikuandmeid ning uurimislaevalt Salmelt võetud proove. Teostatud uuringute põhjal võib väita, et andmed langevad hästi kokku ning on piisavalt kvaliteetsed, et neid kasutada uurimis- ja teadustöodes. Esineb mõningaid erandeid, mille puhul kokkulangevus pole hea, kuid sellisel juhul tuleks pigem usaldada laboriandmeid ning sondeerimisandmeid enne kasutamist töödelda. Kuigi labori mõõtmistes on sees viga, mille järgi tuleb põhjakihtide hapnikusisaldus tegelikkusest suurem ning pinnakihtide hapniku kontsentratsioon madalam, siis see viga on väiksem kui Idronaudi hapnikuanduri halvasti kalibreerimisest ning inertsist tekkinud andmete nihe.

KOKKUVÕTE

Käesolevas töös on esitatud ülevaade hapnikusisalduse dünaamikast Läänemere (Soome lahe) põhjakihtides. Töö eesmärgiks oli analüüsida Läänemere hapniku kontsentratsiooni, selle muutusi ning nende muutuste põhjuseid. Eelkõige oli töö rõhk suunatud Soome lahele, kus on teostatud mõõtmisi nii CTD sondiga Idronaut kui ka uurimisolaev Salme laboris. Hapniku muutust ruumiliselt uuriti kokku 25 jaamast, millest 13 asub piki ning 12 risti lahte. Eraldi on välja võetud AP5 jaama andmed, mille põhjal võrreldi omavahel hapniku muutust ajaliselt ning hapniku ja soolsuse ning hapniku ja tiheduse vahe omavahelist korrelatsiooni.

Töös on jõutud järeldusele, et põhjakihtide hapnikusisaldus on korrelatsioonis vertikaalse kihistumisega, samas kui pinnakihid on kevadeti sõltuvuses kevadisest õitsengust ja suvel veetemperatuurist. Risti lahte teostatud uuringute põhjal järeldas autor, et pikaajalised läänekaarte tuuled põhjustavad Läänemere avaosa pindmiste vete sissevoolamise Soome lahte, mis omakorda surub hapnikuvaese vee lahest välja. Selline veeliikumine tekitab Eesti rannikul daunvellingu, mida on näha nii hapniku kui ka temperatuuri graafikutelt. Lisaks hapnikusisalduse dünaamika uurimisele võib töös teha järeldus, et varem kasutamata Idronaudi hapnikuanduri tulemused on piisavalt usaldusväärsed, et neid kasutada edaspidistes uurimis- ja teadustöodes.

KASUTATUD KIRJANDUS

Alliance for Coastal Technologies. MK 320Plus WOCE CTD probe [WWW] <http://www.act-us.info/sensordetail.php?ID=11542&cat=CTD&type>

(10.02.2014)

Axe, P. (2010). Hydrography and oxygen in the deep basins – *Baltic Sea Environment Fact Sheet* [WWW] <http://helcom.fi/baltic-sea-trends/environment-fact-sheets/hydrography/hydrography-and-oxygen-in-the-deep-basins>

(13.02.2014)

Diaz, R.,J., Rosenberg, R. (2008). Spreading Dead Zones and Consequences for Marine Ecosystems – Review , 321, 926 – 929 [Online] Science (29.05.2014)

Finnish Environment Institute (2013). No significant changes in the status of the Gulf of Finland's coastal waters compared to last years; oxygen situation on deep open-sea floors has deteriorated [WWW] [http://www.syke.fi/en-US/Research_Development/Baltic_Sea_inland_waters_and_water_resource_management/No_significant_changes_in_the_status_of_\(26159\)](http://www.syke.fi/en-US/Research_Development/Baltic_Sea_inland_waters_and_water_resource_management/No_significant_changes_in_the_status_of_(26159)) (28.02.2014)

Finnish Environment Institute and Ministry of the Environment (2014). Gulf of Finland Year co-operation launched – a record number of observation points at the Russian territorial waters [WWW] [http://www.syke.fi/en-US/Research_Development/Baltic_Sea_inland_waters_and_water_resource_management/Gulf_of_Finland_Year_cooperation_launched\(28025\)](http://www.syke.fi/en-US/Research_Development/Baltic_Sea_inland_waters_and_water_resource_management/Gulf_of_Finland_Year_cooperation_launched(28025)) (28.02.2014)

Hansson, M., Andersson, L. (2013). Oxygen Survey in the Baltic Sea 2013 – Extent of Anoxia and Hypoxia, 1960-2013 [WWW] http://www.smhi.se/polopoly_fs/1.35317!Oxygen_timeseries_1960_2013_final.pdf (10.02.2014)

HELCOM. (2010). HELCOM Atlas of the Baltic Sea. Finland: HELCOM

Idronaut. Dissolved Oxygen [WWW] <http://www.idronaut.it/products-dissolved-oxygen-sensors> (27.05.2014)

Idronaut. Dissolved Oxygen Sensor [WWW] <http://www.idronaut.it/dissolved-oxygen-sensors> (27.05.2014)

Krauss, W. (2001). Baltic Sea Circulation – *Encyclopedia of Ocean Sciences*, 236-244 [Online] ScienceDirect (31.01.2014)

Laine, A.O., Andersin, A.B., Leiniö, S., Zuur, A.F. (2007). Stratification-induced hypoxia as a structuring factor of macrozoobenthos in the open Gulf of Finland (Baltic Sea) – *Journal of Sea Research*, 57, 65-77 [Online] Sciencedirect (28.02.2014)

Leppäranta, M., Myrberg, K. (2009). Physical Oceanography of the Baltic Sea. Suurbritannia: Praxis

Liblik, T., Laanemets, J., Raudsepp U., Elken, J., Suhhova, I. (2013). Estuarine circulation reversals and related rapid changes in winter near-bottom oxygen conditions in the Gulf of Finland, Baltic Sea – *Ocean Science*, 9, 917-930 [WWW] <http://www.ocean-sci.net/9/917/2013/os-9-917-2013.html> (01.06.2014)

Lips I., Lips U. (2013). BalticSeadNow.info Mereteadus. Tallinn

Läänemere hüdroloogiline iseloomustus – *Eesti Entsüklopeedia 2011* [WWW] http://entsyklopeedia.ee/artikkel/1%C3%A4%C3%A4nemere_h%C3%BCdroloogiline_iseloomustus (03.02.2014)

Maidment, D.R. (1999). Handbook of Hydrology, charapter eleven, 11.48

Matthäus, W. (2006) The history of investigation of salt water inflows into the Baltic Sea - from the early beginning to recent results – *Marine Science Reports* [WWW] <http://www.io->

warnemuende.de/tl_files/forschung/meereswissenschaftliche-berichte/mebe65_2006.pdf (02.06.2014)

Reissmann, J.H., Burchard, H., Feistel, R., Hagen, E., Lass, H.U, Mohrholz, V., Nausch, G., Umlauf, L., Wiczorek, G. (2009). Vertical mixing in the Baltic Sea and consequences for eutrophication - A review – *Progress in Oceanography*, 82, 47-80 [Online] ScienceDirect (10.02.2014)

Report to the Nordic Council's International Conference on the Pollution of the Seas. (1989). Northern Europe's seas. Northern Europe's environment

Sneider, B., Nausch, G., Kubsch, H., Petersohn, I. (2002). Accumulation of total CO₂ during stagnation in the Baltic Sea deep water and its relationship to nutrient and oxygen concentrations – *Marine Chemistry*, 77, 277-291 [Online] ScienceDirect (07.02.2014)

Seabird. (2013). SBE 43 Dissolved oxygen sensor – Background information, deployment recommendations, and cleaning and storage [WWW] http://www.seabird.com/application_notes/AN64.htm (01.06.2014)

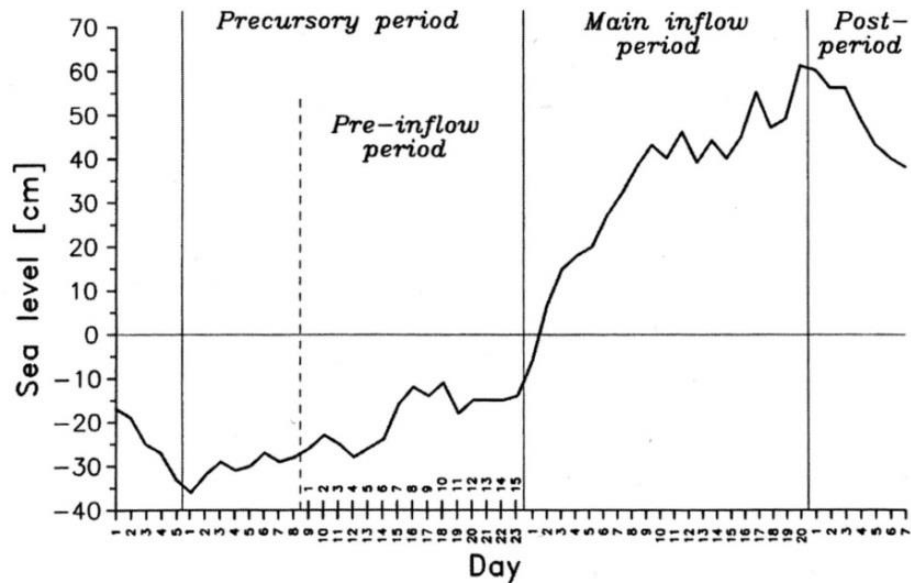
Seabird. CTD (Sonde) Profiling Instruments [WWW] <http://www.seabird.com/products/CTDprofilers.htm> (27.05.2014)

SMHI. (2014). Oxygen in the sea [WWW] <http://www.smhi.se/en/theme/oxygen-in-the-sea-1.11274> (10.02.2014)

Zillen, L., Conley, D.J., Andren, T., Andren, E., Björck, S. (2008). Past occurrences of hypoxia in the Baltic Sea and the role of climate variability, environmental change and human impact – *Earth-Science Reviews*, 91, 77-92 [Online] Sciencedirect (10.02.2014)

LISAD

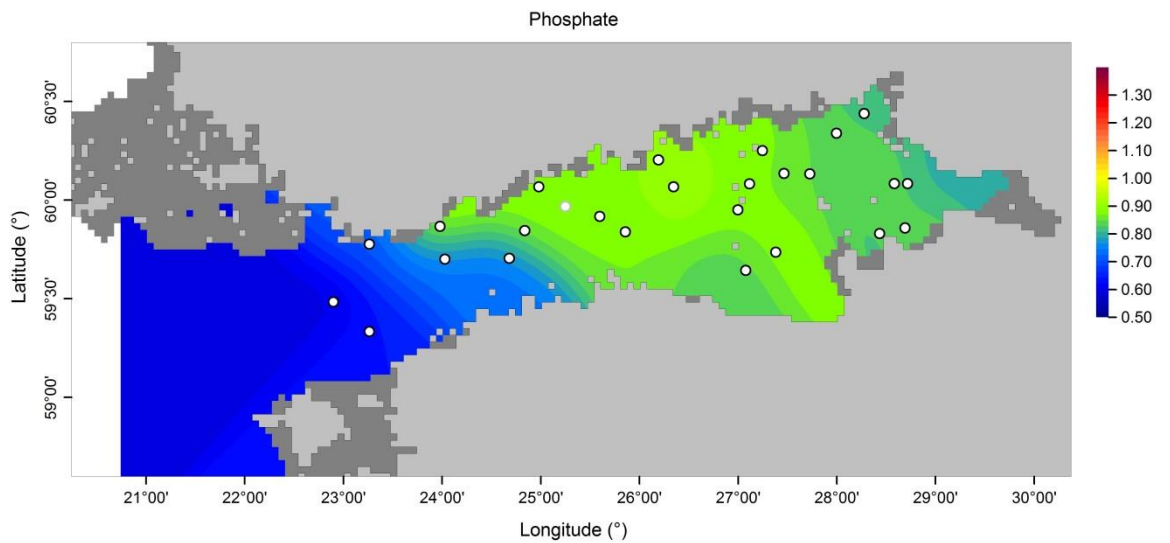
Lisa 1 . Veetase suure sissevoolu kolmel perioodil



(Leppäranta&Myrberg 2009, 160: viidatud Matthäus, Schinke 1994)

Lisa 2. Soome lahe fosforisisaldus 2014 aasta talvel

Lisa 2 jooniselt on näha Soome lahe tugevat fosforisisalduse tugevat ida-suunalist gradienti, mida põhjustab Läänemere suurima jõe, Neva, sissevool.



(Finnish Environment Institute..., 2014)