

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

Matemaatika-loodusteaduskond

Meresüsteemide Instituut

PÕHJALÄHEDASE VEEKIHI MUUTLIKKUS SOOME
LAHES

Magistritöö

Kristina Aleksejeva

Juhendaja: Taavi Liblik

Kaasjuhendaja: Irina Suhhova

Tallinn 2016

Autorideklaratsioon

Deklareerin, et käesolev magistritöö, mis on minu iseseisva töö tulemus, on esitatud Tallinna Tehnikaülikooli magistrikraadi taotlemiseks ja et selle alusel ei ole varem taotletud akadeemilist kraadi.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud või (avaldamata tööde korral) toodud autorlus välja põhitekstis.

Magistrikraadi taotleja: Kristina Aleksejeva

Kuupäev:

Allkiri:

Juhendaja: Taavi Liblik

Allkiri:

Kuupäev:

Kaitsmisele lubatud 2016. a.

Kaitsmiskomisjoni esimees:

Sisukord

Sissejuhatus	4
1. Soome laht	6
1.1.Topograafia ning vee- ja soolabilanss	6
1.2.Tsirkulatsioon	7
1.3.Stratifikatsioon	8
1.4.Põhjakiht.....	9
2. Andmed ja meetodika.....	10
2.1.Aparatuur	10
2.2.Mõõtmispiirkond ja andmed	13
3. Töö tulemused	15
3.1.Temperatuuri, soolsuse ja hapniku histogrammid ning keskmised	15
3.2.Korrelatsioon	18
3.3.Hoovuste domineerivad suunad.....	24
3.4.Järsud põhjakihi parameetrite muutused	27
4. Arutelu	31
Kokkuvõte	32
Summary.....	33
Tänuavaldused	34
Kasutatud kirjandus	35
LISAD	38
LISA 1. Põhjakihi parameetrite ajaline muutlikkus	38

Sissejuhatus

Läänemeri on maailmas üks suurimaid riimveelisi piirkondi. Meri koosneb mitmetest alambasseinidest, millede vahel toimub veevahetus ehk tsirkulatsioon. Vaatamata sellele, et Läänemeri on suhteliselt väike, siis selle alamvesikondi iseloomustavad üsna erinevad dünaamikad (Andrejev et al. 2004). Läänemeri on Põhjameriga ühendatud läbi Taani väinade, kus voolab magedam vesi merest välja ning soolane sisse. Sissetulev vesi on tavaliselt mõõduka soolsusega ning see ei jõua Läänemere süvikute põhjakihtidesse. Läänemerel on mitmeid keskkonnaprobleeme, nagu näiteks eutrofeerumine ning sellega kaasnevad toksiliste vetikate õitsengud (Lessin et al. 2014) ja hapnikuvaegus põhjakihtides (Conley et al. 2009).

Läänemere avaosa põhjalähedased kihid varustatakse hapnikuga ainult nendel perioodidel, kui toimuvad suured, soolased ja hapnikurikka vee sissevoolud Põhjamerest (nt. Mohrholz et al. 2015). Hapnikuvaese keskkonna ehk hüpoksia piiriks loetakse lahustunud hapniku sisaldust 2.9 mg l^{-1} . Ligikaudu 20% kogu Läänemere põhjast on kaetud hüpoksilise veega (Jäntti ja Heitanen, 2012). Suured sissevoolud Põhjamerest (nt. Mohrholz et al. 2015) võivad hüpoksilise veega kaetud ala ajutiselt (mõned aastad, Fonselius and Valderrama 2003) oluliselt vähendada. Soome lahe põhjakihtides esineb samuti hüpoksia. Olemasolevad vähesed hapniku mõõtmiste aegread näitavad, et Soome lahe põhjakihtide hapnik (aga ka temperatuur ja soolsus) on väga varieeruv (Liblik et al. 2013). Hüpoksiline kiht kaob Soome lahest (Liblik et al. 2013), kui toimub estuaarse tsirkulatsiooni ümberpöördumine (Elken et al. 2003).

Hapniku puudus mõjutab merepõhja elustikku ning toitainete sisaldust merevees. Näiteks kutsub hüpoksia esile fosfori vabanemise setetest (Jäntti ja Heitanen, 2012), mis omakorda võib soodustada toksiliste vetikate vohamist (Vahtera et al. 2007).

Käesoleva magistritöö eesmärgiks on uurida põhjalähedase kihi hapniku, soolsuse ja temperatuuri muutlikkust Soome lahe põhjakihtides ning selle põhjuseid. Uurimise all oleva muutlikkuse ajaline mastaap on päevad kuni nädalad. Põhjalähedase veekihi aegridu on Soome lahe piirkonnas allpool halokliini vähe mõõdetud ja publitseeritud. Magistritöös on kasutatud põhjalähedases kihis registreeritud vee parameetreid seitsme mõõdistusperioodi vältel, alates septembrist 2010 kuni maini 2014.

Töös ülesehitus on järgmine. Esmalt on kirjeldatud uurimispiirkonda, selle stratifikatsiooni, tsirkulatsiooni ja põhjakihi muutlikkust. Seejärel on kirjeldatud kasutatud aparatuuri ja metoodikat. Järgnevalt on esitatud töö tulemused: parameetrite (hapnik, soolsus, temperatuur) histogrammid ja keskmised väärtused; korrelatsioonianalüüs; hoovuste domineerivad suunad ning põhjakihi parameetrite järsud ajalised muutused. Töö lõpeb arutelu ja kokkuvõttega.

1. Soome laht

1.1. Topograafia ning vee- ja soolabilanss

Läänemeri on maailmamerega ühendatud kitsaste ja madalate Taani väinadega. Läänemere pindala on 365 000 km², koos Taani väinadega 386 000 km² ning koos Kattegatiga 420 000 km². Läänemere keskmiseks sügavuseks on 55 meetrit ja selle ruumala on ligikaudu 20 000 km³. Magistritöös uuritud Soome laht asub Läänemere kirdeosas (joonis 1).

Võrreldes teiste lahtedega (näiteks Botnia ja Liivi laht) toimub veevahetus Soome lahes Läänemere avaosaga takistamatult, kuna lahe suudmes puuduvad väinad ja künnised. Soome lahe pindala on ligikaudu 29 600 km² ja ruumala 1100 km³. Soome lahe pikkus on ligikaudu 400 km ning laius 48-135 km. Lahe keskmine sügavus on 38 m ja sügavaim koht on 124 m (Inkala ja Myrberg, 2001).



Joonis 1. Soome lahe asukoht Läänemeres. Allikas: Soome Transpordiagentuuri Hüdrograafiabüroo.

Soome lahe topograafia on suhteliselt keeruline, eriti rannikupiirkondades, kus madalikud, poolsaared ja saared jaotavad ranniku eraldi väikesteks lahtedeks. Soome lahes on kaks peamist veevahetuse allikat: magevee sissevool jõgedest ja soolase vee sissevool Läänemere avaosast. Arvestades seda, et suurim magevee sissevool tuleb Neeva jõest, lahe idapoolsest otsast ning seda, et ühendus Läänemere avaosaga on lahe lääneosas, võib Soome lahte vaadelda kui estuaari.

Veevahetuse intensiivsust kirjeldab vee viibeag. Soome lahe vee viibeag on kaks aastat, mis on märgatavalt väiksem, kui kogu Läänemerel tervikuna (24 aastat, Elken, 2006). Alenius et al. (1998) on hinnanud Läänemere avaosast Soome lahte sisenevaks vooluhulgaks 480 km^3 ja sealt väljuvaks vee hulgaks 600 km^3 aastas. Järele jäänud osa vee bilansis (väljavoolus) moodustab magevesi, mis põhiliselt tuleb jõgedest, aga ka sademete ja aurumise vahest.

1.2. Tsirkulatsioon

Peamine jõud, mis tekitab Soome lahes hoovuseid on tuulepinge. Hoovuseid mõjutavad ka veetaseme erinevused ja termohaliinsed mõjud. Sagedaseim tuule suund Soome lahe piirkonnas on SW ehk domineerib edelast puhuv tuul. Pikaajalises keskmises tsirkulatsioonis on oluline tiheduse erinevusest põhjustatud hoovus, mis tuleneb temperatuuri ja soolsuse gradientidest (Alenius et al. 1998).

Palmen (1930) ning hiljem ka mitmed modelleerimistööd (näiteks Lehmann et al. 2002 ja Andrejev et al. 2004) on pakkunud, et Soome lahes esineb ülemises kihis tsüklonaalne liikumine ehk vastupäeva keskmine tsirkulatsioon. Soome lahes on hoovused suhteliselt madala stabiilsusega. See näitab tuule mõju olulisust. On hinnatud, et hoovuste püsivus piki lahe põhjarannikut on nõrgem kui piki lõunarannikut (Alenius et al. 1998).

Tüüpiliselt positiivse mageda vee sissekandega estuaarile esineb Soome lahes pikaajalise keskmisena alumises kihis sissevool ja ülemises kihis väljavool. Elken et al. (2003) on näidanud, et tugevad edelatuuled pööravad estuaarse tsirkulatsiooni ringi.

Mõõtmiste ja mudeltulemuste põhjal on näidatud, et hoovuste vertikaalne struktuur Soome lahes on suuresti sõltuv stratifikatsiooni tingimustest. Suhhova et al. (2015) on lahe lõunanõlval tehtud mõõtmistega näidanud, et hilistalvel ja varakevadel nõrga termilise

stratifikatsiooni tingimustes on voolamine kvaasi-barotroopne ning suvel areneb kahekihiline (barokliinne) vertikaalne stratifikatsioon. Sügavamates piirkondades, kus esineb halokliin, võib esineda ka kolmekihilist voolamist (Liblik ja Lips, 2012).

Soome lahe hoovusandmetes on näha mitmesuguse perioodiga (poolest ööpäevast kuni 1.5 ööpäevani) võnkumisi, nagu inertsvõnkumised ja seišid (nt. Lilover et al. 2011). Käesolevas töös vaatleme võnkumise perioodidest pikemaid ajamastaape, mistõttu ei ole neid selles töös käsitletud.

1.3. Stratifikatsioon

Riimveelisuse tõttu on Läänemeri püsivalt kihistunud ehk stratifitseeritud. Mageda ja soolase vee allikate paiknemine Läänemere erinevates otstes põhjustab estuaarile tüüpilise suuremastaabilise veevahetuse dünaamika ning vastavad soolsuse ja ökosüsteemi olekumuutujate gradiendid. Läänemeres esineb püsiv halokliin ehk kiht, kus soolsus hüppeliselt muutub. Arkona basseinis asub see sügavusel ca 40 m ning Läänemere avaosas ja Soome lahes sügavustel 50–80 m (Alenius et al. 1998; Elken, 2006; Liblik ja Lips, 2011).

Soome lahe vertikaalses struktuuris on suvel kolm kihti ja talvel kaks kihti. Suvel esineb 5–20 m sügavusel (vahel ka kuni 40 m) paksune soe ja mage ülemine segunenud kiht. Edasi tuleb vahekiht (ca 40–50 m sügavusel), mis on eraldatud ülemisest kihist termokliiniga ning on külmem ja soolasem kui ülemine kiht. Viimane kiht on vahekihist halokliiniga eraldatud süvakiht (ligikaudu >70 m), mis on soolasem ja soojem kui vahekiht. Talvel esineb segunenud külm ja magedam ülemine kiht, mis on kuni 70 m paksune ning soojem ja soolasem süvakiht. Need kihid on omavahel halokliiniga eraldatud (Alenius et al. 1998, Liblik ja Lips, 2011).

Estuaarse tsirkulatsiooni ümberpöördumine nõrgendab vertikaalset stratifikatsiooni (Elken et al. 2003). Liblik et al. (2013) on näidanud, et tugevate edelatuulte poolt tekitatud estuaarse tsirkulatsiooni ümberpöördumise käigus võib Soome lahes stratifikatsioon talvel ajutiselt kaduda, mis parandab oluliselt põhjakihi hapniku tingimusi.

1.4. Põhjakiht

Soome lahe põhjakihi temperatuuri-, sooluse- ja hapnikutingimusi mõjutab ühendus Läänemere avaosaga. Avaosast Soome lahte piki merepõhja voolav vesi on hapnikuvaene ja soolane. Seega tuuled, mis soodustavad estuaarset tsirkulatsiooni (kirdetuuled, Elken et al. 2003) toovad Soome lahte rohkem hüpoksilist vett (Liblik et al. 2013). Samuti tekitab soolakiilu Soome lahte tungimine tugevamat stratifikatsiooni, mis omakorda pärsib vertikaalset segunemist (Conley et al. 2009). Edelatuuled vastupidiselt tekitavad soolakeele taandumist (Elken et al. 2003). Liblik et al. (2013) on näidanud, et Soome lahe lääneosas, kus toimub Läänemere avaosaga vaba sissepääs lahte, toimub hapnikuga küllastunud tingimustest hüpoksiale üleminek väga kiiresti. Lisaks mõjutab lokaalselt hapnikutingimusi orgaanilise aine lagundamine bakterite poolt. Orgaaniline aine vajub merepõhja ning seda hakkavad lagundama bakterid. Lagundamise käigus kasutatakse hapniku. Kui selle protsessi käigus on hapniku kadu suurem kui advektiivse ja vertikaalse segunemisega saabuv hapniku transport, siis hapniku kontsentratsioon väheneb, mis võib viia hapniku puudumiseni (Gray et al. 2002). Läänemere sügavamates osades on lateraalne ja vertikaalne hapniku transport väga piiratud, mistõttu hapnikuvaegus on siin tavaline ning sageli esineb ka vesiniksulfiid (H_2S). Hapnikuvaeguse korral bentilised organismid kaovad (Uscinowicz, 2014). Anaeroobsed (hapnikuta) tingimused põhjustavad fosfaatide ja silikaatide vabanemist setetest veesambasse. Vertikaalse segunemise abil võivad need ained jõuda pinnakihti ja footilisse tsooni. See võib omakorda soodustada tsüanobakterite vohamist (HELCOM, 2013).

2. Andmed ja meetodika

2.1. Aparatuur

Uuringu teostamiseks on kasutatud hoovuse profileerijat ehk ADCP-d (Acoustic Doppler Current Profiler) ja CTD (*Conductivity*- elektrijuhtivus, *Temperature*-temperatuur, *Depth*-sügavus/rõhk) sondi. ADCP on hoovuste mõõtja, mis mõõdab läbi veesamba hoovuste kiirust ja suunda. ADCP *Sentinel* 307.2 kHz on nelja-kiireline (20° kiire nurgaga) instrument, mis on varustatud temperatuuri anduriga, akustilise signaali vastuvõtjaga/saatjaga ja rõhu anduriga (joonis 2). Akustiline Doppleri hoovuste profileerija registreeris andmeid 10-minutilise ajasammuga ja vertikaalse lahutusega (bin) 2 m.



Joonis 2. ADCP Sentinel näide koos selgitusega andurite paiknemisest.

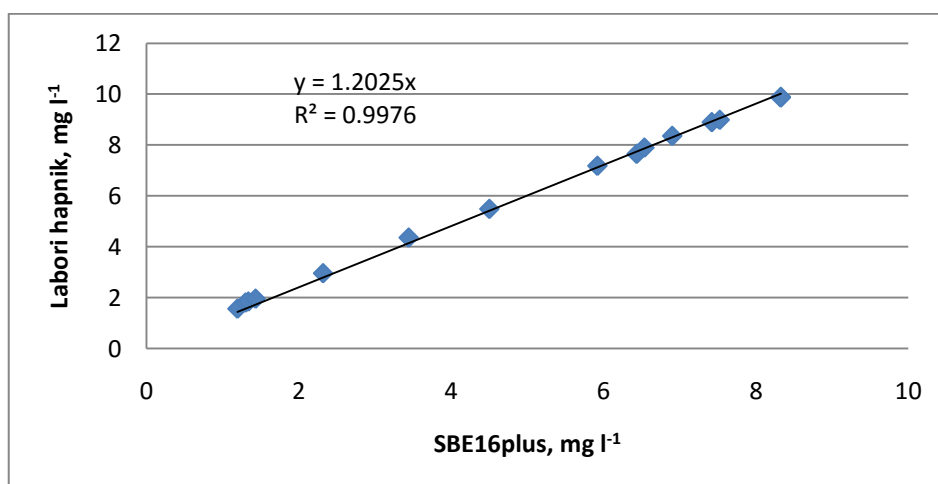
ADCP oli paigaldatud merepõhja traalimiskindlale platvormile Barnacle 60P. Hoovusmõõtmiste sügavusvahemik varieerus erinevates asukohtades. ADCP andmete kvaliteedi kontrolliti kasutades Book et al. (2007) analüüsi. Vee parameetrid (temperatuur, elektrijuhtivus soolsuse määramiseks, lahustunud hapnik) põhjalähedases kihis registreeriti CTD sondi SBE16*plus* (joonis 3) abil.

CTD sond oli ühendatud ujuki ja ankruga, mille abil installeeriti sond ca 5 m kõrgusele põhjast. Töös kasutati kolme parameetrit: temperatuur, soolsus ja hapnik. ADCP platvorm oli ühendatud CTD ankuriga ligikaudu 80 m otsa abil.



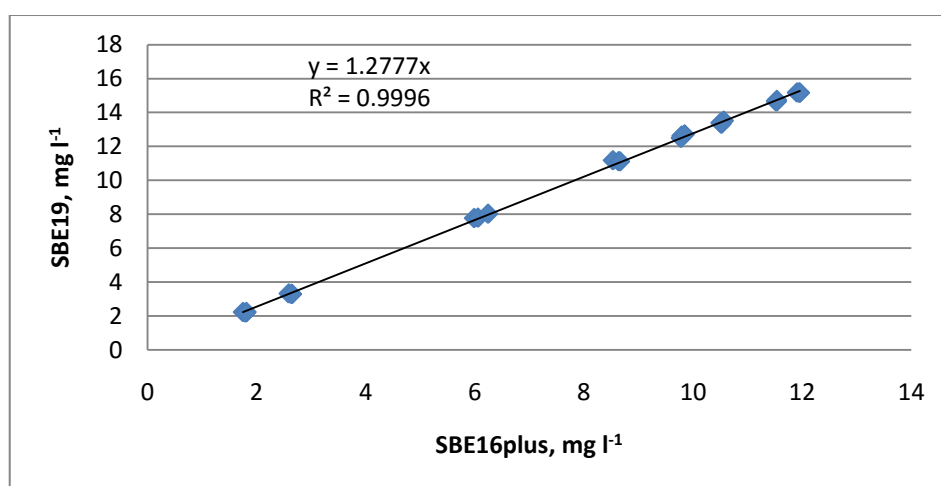
Joonis 3. Veeparameetrite mõõtja CTD sond SBE16plus (Sea-Bird Electronics: www.seabird.com/sbe16plusv2-seacat-ctd)

Hapnikuandmete usaldusväärsuse näitamiseks lahustunud hapniku sensor (SBE43) kalibreeriti analüüsitud vee proovide võrdluses. Joonisel 4 on välja toodud labori mõõtmiste ja sondeerimiste vaheline seos: vertikaalteljel asuvad vee proovide tulemused ja horisontaalteljel SBE16plus tulemused. Kokku kasutati veebruaris 2013 15 andmete paari parima lineaarse seose leidmiseks lahustunud hapniku (DO) ja SBE16plus mõõtmiste vahel (DOSBE16): $DO = DOSBE16 \times 1.203$ ($R = 0.99$).



Joonis 4. Lahustunud hapniku labori mõõtmise ja sondeerimise omavaheline seos.

Märtsis 2016 tehti sarnane võrdlus kahe sondi SBE 19plus ja SBE 16plus hapniku sensorite vahel. SBE 19plus valiti sellepärast, et selle hapniku andur SBE43 oli äsja tulnud tehase kalibreerimiselt. Alljärgnev joonis 5 näitab SBE 19plus (vertikaaltelg) ja SBE 16plus (horisontaaltelg) registreeritud andmete omavahelist seost. Kokku kasutati parima lineaarse seose leidmiseks kahe sondi vahel 26 andmete paari: $DOSBE19 = DOSBE16 \times 1.278$ ($R = 0.99$).



Joonis 5. SBE16plus ja SBE19plus lahustunud hapniku omavaheline seos.

Edaspidi eeldati, et hapniku andur triivis ajas lineaarselt ning nii arvutati igale mõõtmisperioodile oma parand, millega mõõdetud hapnikuandmed läbi korrutati (tabel 1).

Jaam	Kuupäev	Parandid
ADCP1	30.09.2010	1.048
ADCP2	1.11.2010	1.054
ADCP3	1.12.2010	1.059
ADCP4	13.07.2011	1.098
ADCP5	21.12.2011	1.126
ADCP6	28.05.2012	1.154
ADCP7	9.12.2013	1.226

Tabel 1. Hapniku andmete parandid iga mõõtmisjaama puhul.

Tuule pinge u ja v komponend olid arvatud Hellerman (1965) valemi järgi:

$$\bar{\tau} = \rho_a c_{aw}^d |\bar{U}_{10}| \bar{U}_{10},$$

Kus ρ_a - atmosfääri tihedus merepinnast (1.25 kg m^{-3}), c_{aw}^d - õhutakistuse koefitsient ($0.8+0.065$), \bar{U}_{10} - tuule kiirus 10 m merepinnast.

2.2. Mõõtmispiirkond ja andmed

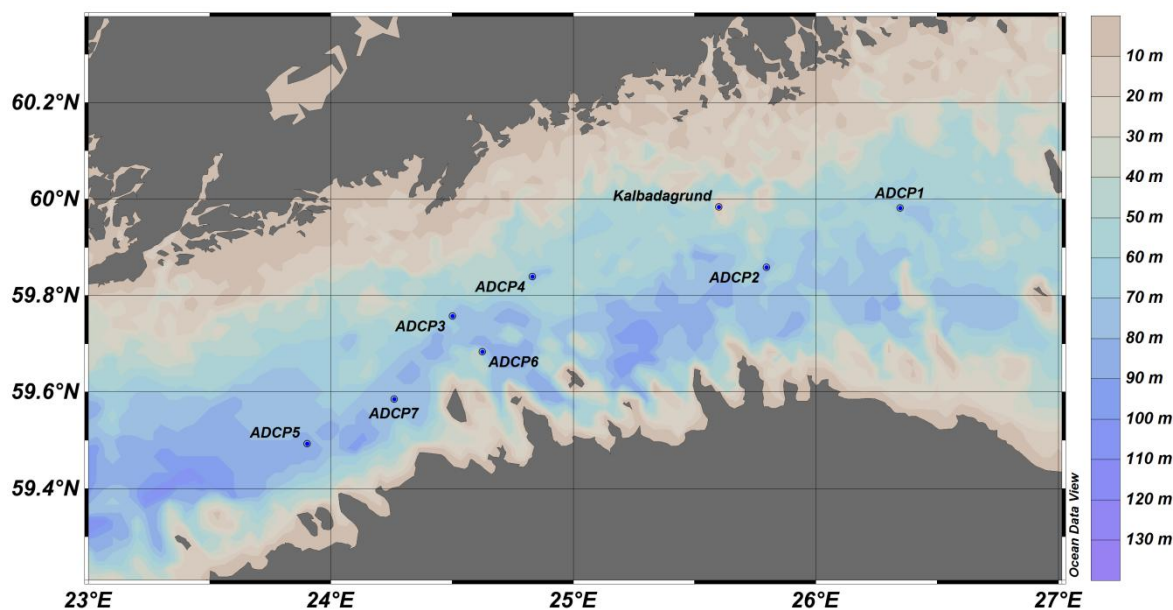
Töös kasutatud mõõtmised toimusid peamiselt Soome lahe lääneosas. Kokku tehti seitse mõõtmist erinevates asukohtades (joonis 6). CTD mõõtmised tehti põhjalähedases kihis ca 5-6 m kõrgusel merepõhjast (Tabel 2). Tuule andmed saadi Kalbadagrund meteojaamast, mille koordinaadid on $59^\circ 59'N$ ja $25^\circ 36' E$ (joonis 6).

Tabel 2. Mõõtmispiirkonna asukoha koordinaadid ja sügavused.

Jaam	Algus	Lõpp	Pikkus (E)	Laius (N)	ADCP sügavuste vahemik (m)	CTD sondi sügavus põhjast (m)
ADCP1	30.09.2010	27.10.2010	$26^\circ 20'.8$	$59^\circ 58'.9$	8-62	5
ADCP2	01.11.2010	17.11.2010	$25^\circ 47'.8$	$59^\circ 51'.5$	8-80	6
ADCP3	01.12.2010	18.01.2011	$24^\circ 30.1$	$59^\circ 45'.5$	8-70	6
ADCP4	13.07.2011	05.09.2011	$24^\circ 49'.9$	$59^\circ 50'.3$	9-73	6
ADCP5	21.12.2011	09.05.2012	$23^\circ 54'.1$	$59^\circ 29'.6$	8-86	5
ADCP6	28.05.2012	09.10.2012	$24^\circ 37'.5$	$59^\circ 41'.0$	8-80	5
ADCP7	09.12.2013	06.05.2014	$24^\circ 15'.6$	$59^\circ 35'.1$	8-82	5

Mõõtmisi teostati alates septembrist 2010 kuni maini 2014. Üks mõõdistusperiood kestis vähemalt 2 nädalat. ADCP andmed olid saadavad alates 5 m sügavuselt põhjast, bini (vertikaalne mõõtmisaken) suuruseks valiti 2 m.

Andmete analüüsimiseks valiti esialgu kolm sügavat bini. Analüüsis on kasutatud 10 min keskmiseid hoovusvektoreid iga täistunnil ning 10 minuti keskmisi tuulevektoreid igal kolmandal tunnil.



Joonis 6. Mõõtmispiirkonna kaart koos ADCP ja Kalbadagrundi meteojaama asukohtadega.

Hoovuste ja tuule kiiruse jaotamise kirjeldamiseks jaotati andmed 5 m s^{-1} vahedega – ≤ 5 , $5-10$, $>10-15$, $>15 \text{ m s}^{-1}$. Hoovuse ja tuule suunad sorteeriti sektorite kaupa 22.5° jaotusega. Selleks, et saaks tuule- ja hoovuse andmeid võrrelda, pöörati tuule suunda 180° võrra. Kalbadagrundi meteojaamast saadud tuule kiirused olid korrutatud koefitsiendiga 0.91 (Launiainen ja Laurila, 1984).

Soolsuse väärtused on esitatud Absoluutse Soolsuse skaalas ning need olid arvutatud (McDougall, 2012) järgmise valemi abil:

$$Sa = \frac{S_{so} - \delta Sa}{35} * Sp + \delta Sa,$$

kus $S_{so}=35.16504$ on ookeani standardne soolsus; δSa - absoluutse soolsuse anomaalia; Sp - soolsus Praktilise Soolsuse skaalas (Fofonoff and Millard Jr., 1983).

3. Töö tulemused

3.1. Temperatuuri, soolsuse ja hapniku histogrammid ning keskmised

Tabelis 3 on toodud seitsme mõõdistusperioodi temperatuuri (T), soolsuse (S) ja hapniku (O₂) keskmised väärtused koos standardhälbe ja hüpoksia (O₂ <2.9 mg l⁻¹) esinemise osakaal (%) mõõdistusperioodide vältel.

Tabel 3. Temperatuuri, soolsuse ja hapniku sisalduse keskmised väärtused ning hüpoksia esinemine mõõdistusperioodidel.

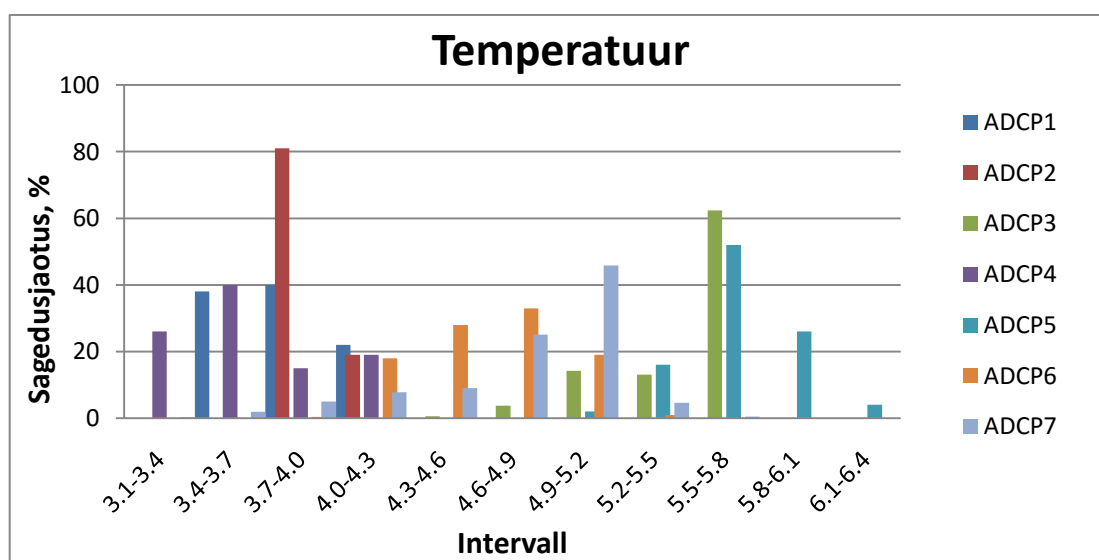
Jaam	Temperatuur, °C	Soolsus, g kg ⁻¹	Hapnik, mg l ⁻¹	Hüpoksia, < 2.9 mg l ⁻¹ (%)
ADCP1	3.8 ± 0.2	7.9 ± 0.3	2.2 ± 0.4	99.2
ADCP2	4.0 ± 0.1	8.1 ± 0.2	1.7 ± 0.5	100.0
ADCP3	5.5 ± 0.3	9.1 ± 0.7	3.6 ± 2.1	36.0
ADCP4	3.6 ± 0.3	8.6 ± 0.3	2.2 ± 1.0	75.9
ADCP5	5.7 ± 0.3	9.4 ± 1.3	2.8 ± 5.0	74.5
ADCP6	4.6 ± 0.3	8.8 ± 0.6	1.5 ± 1.2	87.0
ADCP7	4.6 ± 0.4	8.5 ± 1.2	4.0 ± 4.1	51.1

Standardhälve kirjeldab aegrealt varieeruvust selle keskmisest. Näiteks, on näha (tabel 3), et ADCP5 ja ADCP7 puhul oli hapniku standardhälve vastavalt 5.0 ja 4.1 mg l⁻¹. Sellest järeldub, et nendel perioodidel esines mõõtmispunktis väga erineva hapnikusisaldusega vett. Samadel perioodidel olid ka suurimad soolsuse varieeruvused.

Tabelist 3 on näha, et kõige kõrgem keskmine temperatuur põhjakihis esines mõõdistusperioodil ADCP5, samal perioodil registreeriti ka suurimad keskmise soolsuse väärtused. Asukohas ADCP3 registreeriti samuti kõrge keskmine temperatuur ning

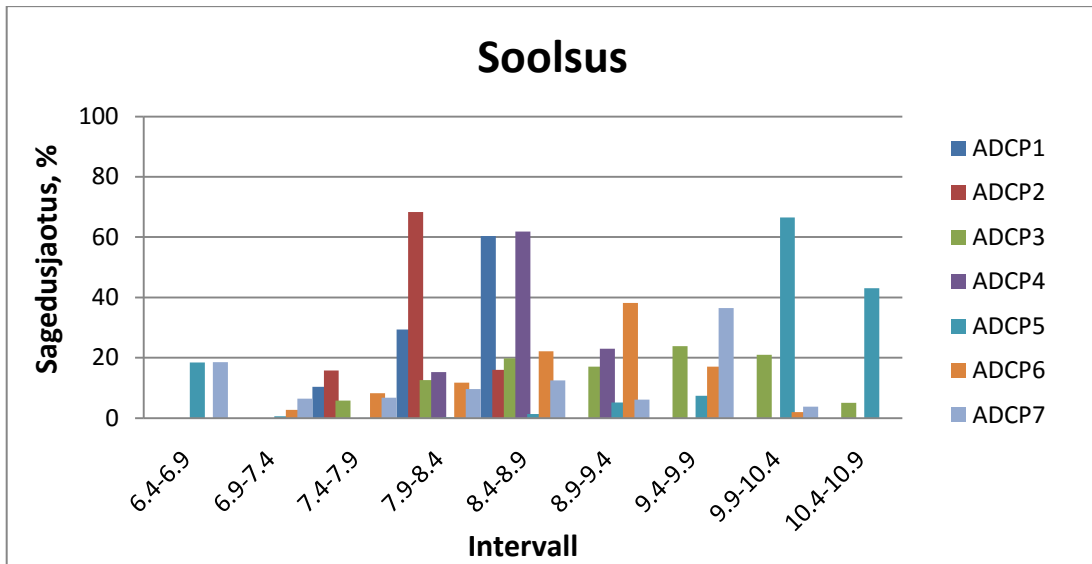
soolsus. Kõrgeim keskmine hapniku sisaldus (4.0 mg l^{-1}) esines talvel 2013/2014. Kõige väiksem keskmine hapniku sisaldus põhjalähedases kihis oli perioodidel ADCP2 ja ADCP6, vastavalt 1.7 mg l^{-1} ja 1.5 mg l^{-1} . Hüüpoksia olukord oli valdav perioodidel ADCP1 ja ADCP2. Samas hüüpoksiat esines kõigil mõõtmisperioodidel ning ainult ühel perioodil oli see (ADCP3) alla 50 %.

Temperatuuri, soolsuse ja hapniku sagedusjaotuse uurimiseks tehti histogrammid. Temperatuuri histogrammist (joonis 7) on näha, et temperatuur esines vahemikus $3.1-6.6 \text{ }^\circ\text{C}$. Jaamas ADCP 2 esines temperatuur kõige sagedamini vahemikus $3.7-4.0 \text{ }^\circ\text{C}$ (80%). Talvel 2010/2011 oli kõige sagedasem temperatuuri vahemik $4.6-5.8 \text{ }^\circ\text{C}$. Kõige kõrgemad temperatuuri väärtused olid registreeritud ADCP5 asukohas, kus mõõtmised tehti detsembrist 2011 kuni mai 2012. Kõige külmem vesi registreeriti suvel 2011, mil 26% mõõtmistest olid vahemikus $3.1-3.4 \text{ }^\circ\text{C}$.

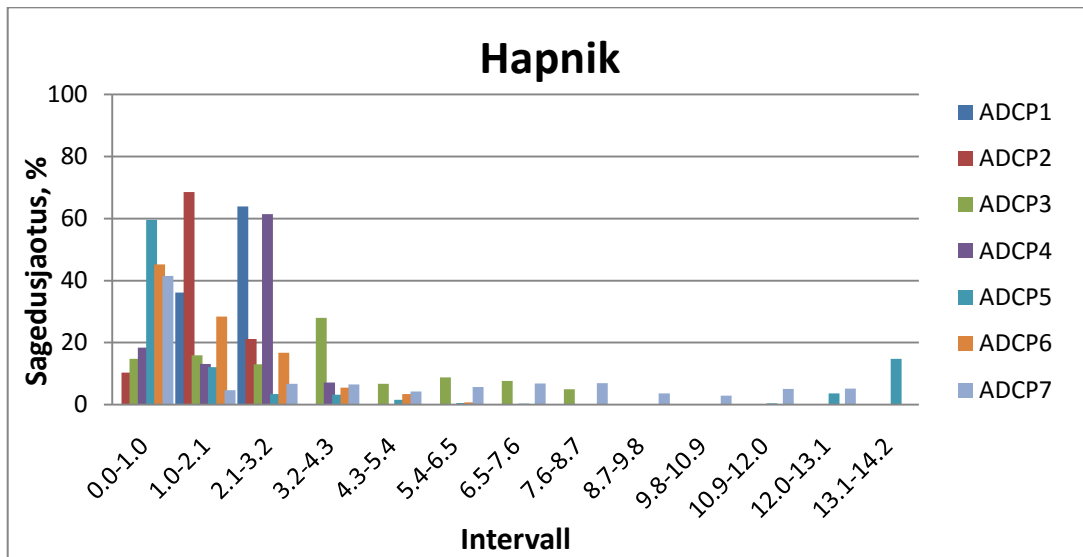


Joonis 7. Temperatuuri sagedusjaotus (%) iga mõõdistusjaama jaoks.

Joonisel 8 on toodud soolsuse sagedusjaotus iga mõõtmisperioodi jaoks. Soolsuse väärtused varieerusid vahemikus $6.6-10.7 \text{ g kg}^{-1}$. Hapniku histogrammist (joonis 9) on näha, et kõige rohkem esinesid hapniku kontsentratsioonid vahemikus $0-3.2 \text{ mg l}^{-1}$. Jaamas ADCP2 mõõdeti kõige sagedamini hapniku väärtuseid $1.0-2.1 \text{ mg l}^{-1}$ vahemikus. Kõige kõrgemad hapniku kontsentratsioonid registreeriti talvel 2011/2012 (ADCP5).



Joonis 8. Soolsuse sagedusjaotus (%) iga mõõdistusjaama jaoks.



Joonis 9 Hapniku sisalduse sagedusjaotus (%) iga mõõdistusjaama jaoks.

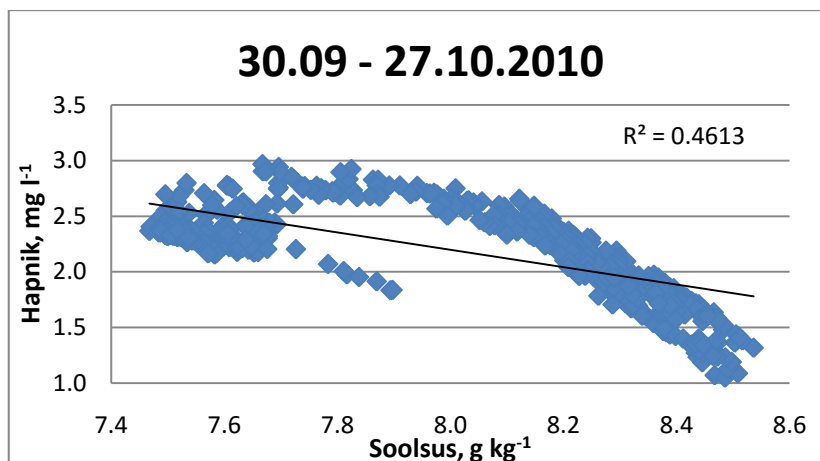
Mõõdetud parameetrite sagedusjaotusest ja keskmistest selgus, et kõrgeimad sooluse sisaldused registreeriti kevadeti ja suviti, samal ajal olid hapniku kontsentratsioonid kõige madalamad. Samuti tuli välja, et kõigi perioodide vältel registreeriti hüpoksiaat ning kuuel perioodil seitsmest oli hüpoksia kestus üle 50 %.

3.2. Korrelatsioon

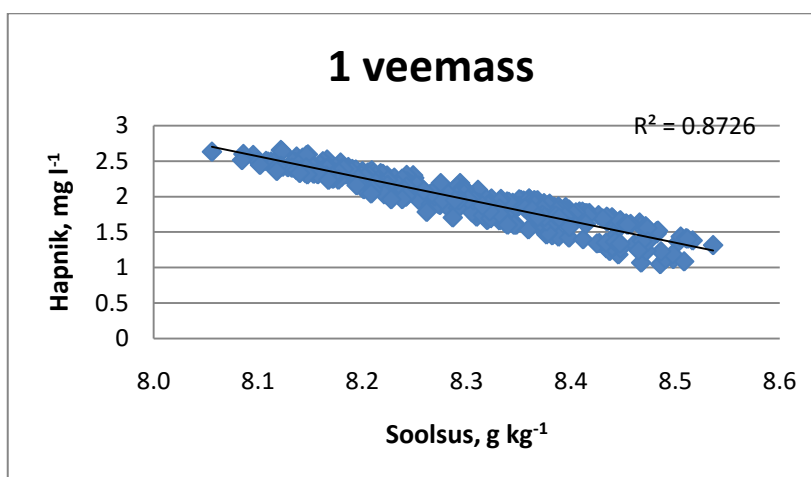
Järgnevalt uurime aegridade soolsuse ja hapniku omavahelisi seoseid. Seose tugevust hindame korrelatsiooniarvutusega. Korrelatsiooni tugevust aitab määrata determinatsioonikordaja R^2 . Mida suurem on determinatsioonikordaja, seda parem on korrelatsioon. Kui $R^2=0$, siis korrelatsioon puudub, $R^2=0,5$ – keskmine korrelatsioon ehk väga kindlat seost ei ole ning $R^2=1$ näitab 100% kindlat omavahelist seost.

Positiivne korrelatsioon näitab, et ühe suuruse kasvades teine suurus samuti kasvab. Negatiivne korrelatsioon näitab, et ühe suuruse kasvades teine kahaneb (www.sauga.pri.ee/audentes/ps_konspekt lk43_53.pdf).

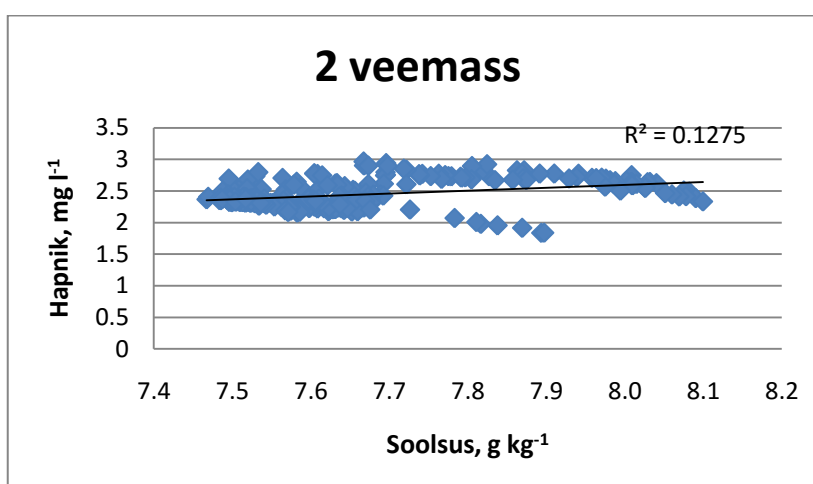
Järgmisena on toodud ja kirjeldatud soolsuse- ja hapnikuvaheline korrelatsioon kõikide mõõdistusperioodide kohta. ADCP1 (30.09-27.10.2010) näitab keskmist ($R^2 = 0,46$) negatiivset soolsuse- ja hapnikuvahelist seost (joonis 10). Joonisel 10 on näha, et tegemist oli kahe erineva veemassiga. Selleks, et milline oli seos kahes erinevas veemassis, uurisime mõlema olukorra korrelatsiooni eraldi. Mõõtmisperiood jagati kaheks ning hapniku-soolsuse seos on näha vastavalt joonistelt 11 ja 12. Soolasema vee ja hapniku omavaheline seos näitab tugevat negatiivset korrelatsiooni, determinatsioonikordajaga 0,87. Magedama veemassi ja hapniku vahel korrelatsioon praktiliselt puudub, sest kordaja on 0,1.



Joonis 10. ADCP1 soolsuse ja hapniku omavaheline korrelatsioon.

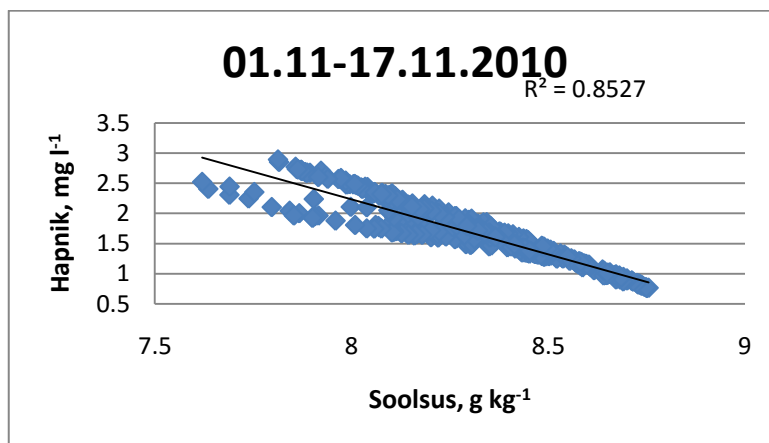


Joonis 11. ADCP1 soolasema veemassi korrelatsioon.

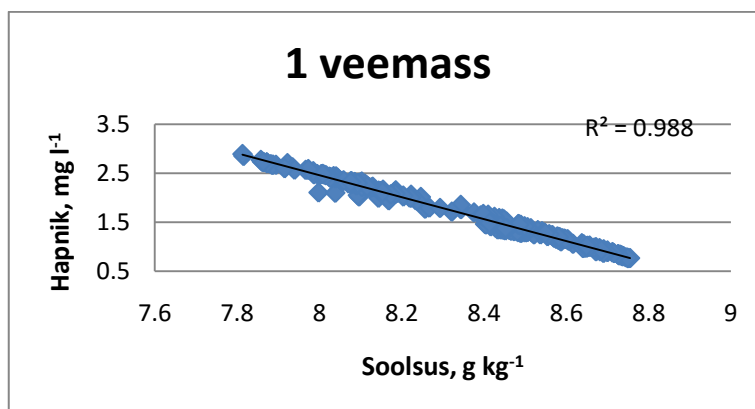


Joonis 12. ADCP1 magedama veemassi korrelatsioon.

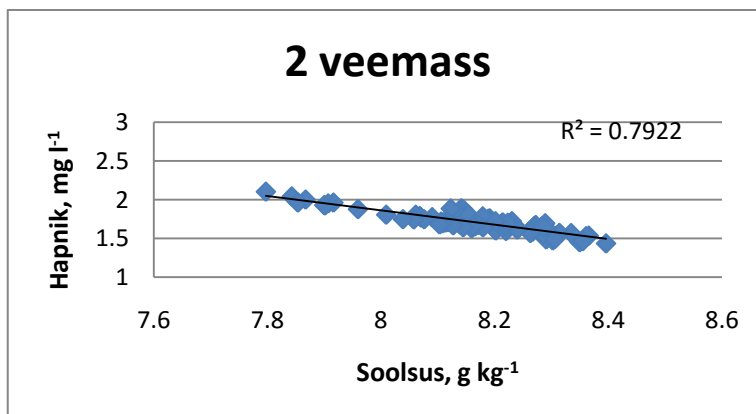
Joonisel 13 on toodud teise mõõdistusperioodi soolsuse ja hapniku omavaheline seos. ADCP2 determinatsioonikordaja oli 0.85, mis näitab küllalt tugevat omavahelist seost. Sellel mõõdistusperioodis on samuti näha kahe veemassi liikumist. Eraldatud veemasside seos on näha joonistel 14 ja 15.



Joonis 13. ADCP2 soolsuse ja hapniku omavaheline korrelatsioon.

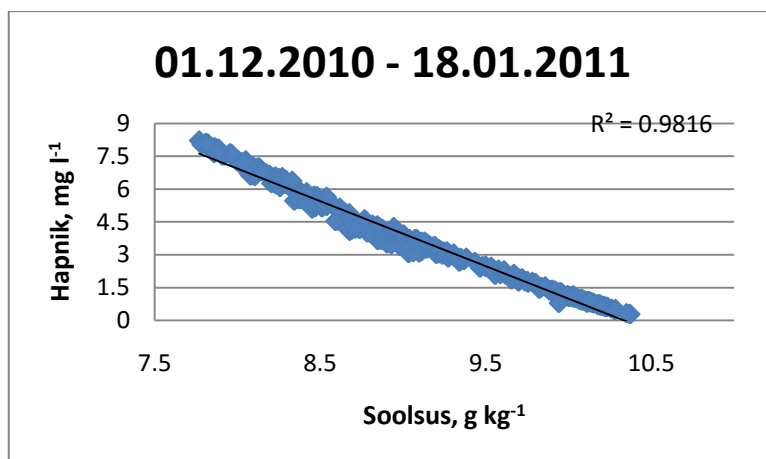


Joonis 14. ADCP2 esimese veemassi korrelatsioon.



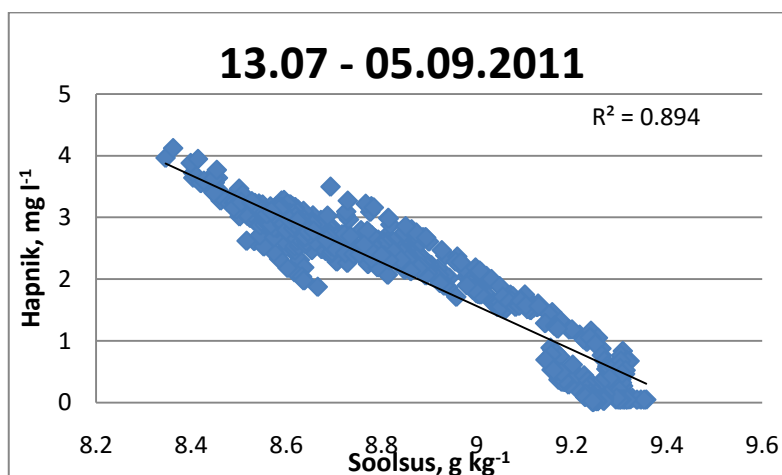
Joonis 15. ADCP2 teise veemassi korrelatsioon.

Joonisel 16 on näha et perioodil 1.12.2010 kuni 18.01.2011 esines väga tugev negatiivne korrelatsioon uuritavate vee parameetrite vahel determinatsioonikordajaga $R^2 = 0,98$.

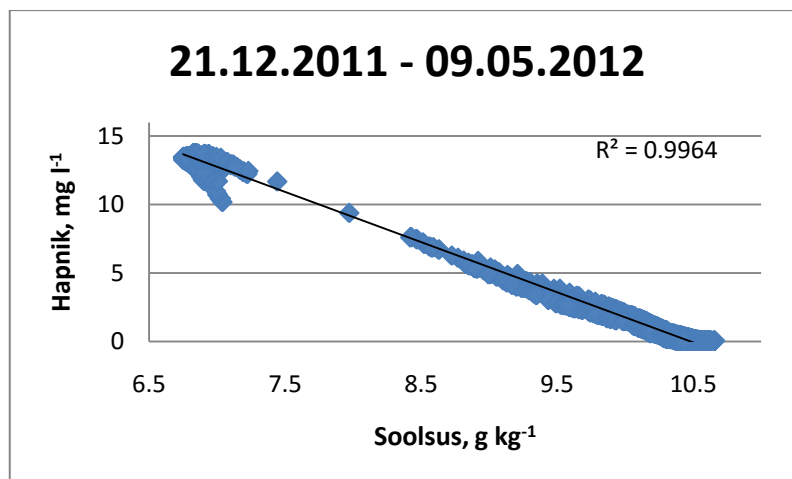


Joonis 16. ADCP3 soolsuse ja hapniku omavaheline korrelatsioon.

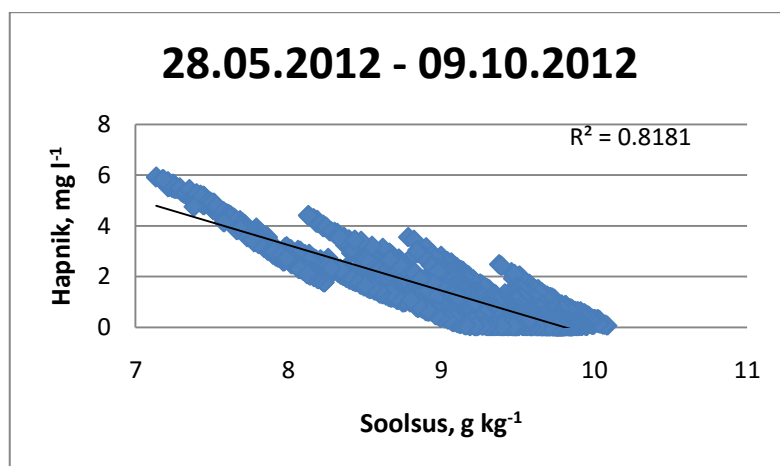
Suvel 2011 (joonis 17) ja talvel/kevadel 2011/12 (joonis 18) esines tugev negatiivne korrelatsioon soolsuse ja hapniku vahel. Determinatsioonikordajad olid vastavalt 0,89 ja 0,99.



Joonis 17. ADCP4 soolsuse ja hapniku omavaheline korrelatsioon.

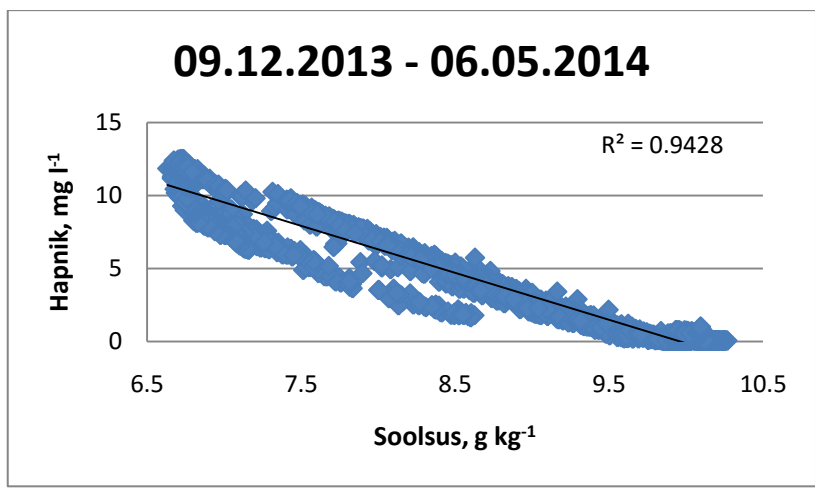


Joonis 18. ADCP5 soolsuse ja hapniku omavaheline korrelatsioon.

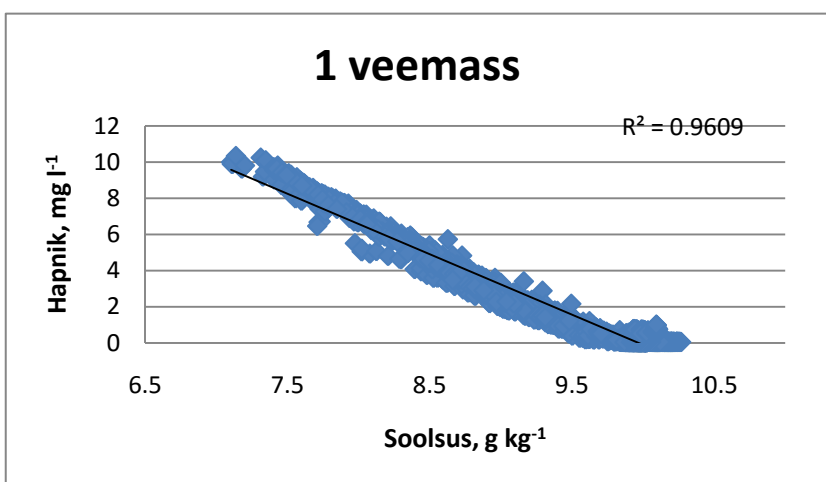


Joonis 19. ADCP6 soolsuse ja hapniku omavaheline korrelatsioon.

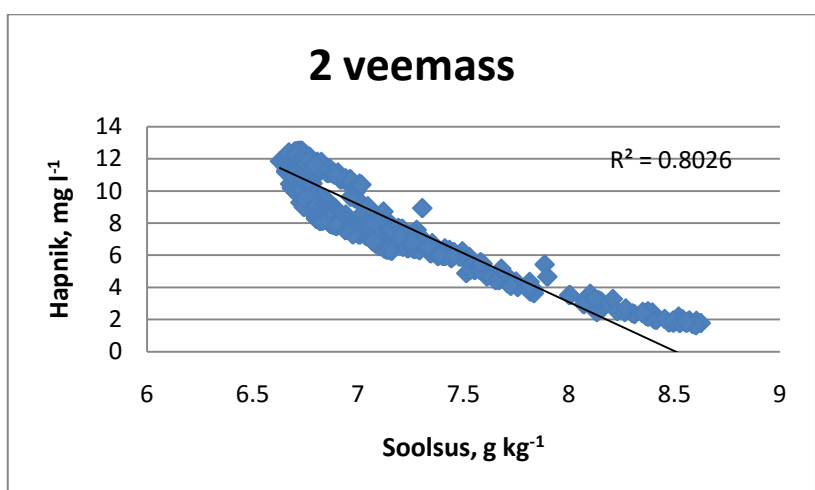
ADCP6 korrelatsioon oli negatiivse seosega (joonis 19), determinatsioonikordajaga 0,81. Viimasel perioodil (ADCP7) oli soolsuse ja hapniku vahel samuti tugev negatiivne korrelatsioon (joonis 20). ADCP7 perioodi jaoks oli samuti tehtud 2 veemasside eraldamine, mis on näha joonistel 21 ja 22. Joonistel 21 ja 22 on näha, et nii esimese kui teise veemassi ja hapniku omavaheline korrelatsioon on hea: vastavalt 0,98 ja 0,8.



Joonis 20. ADCP7 soolsuse ja hapniku omavaheline korrelatsioon.



Joonis 21. ADCP7 esimese veemassi korrelatsioon.



Joonis 22. ADCP7 teise veemassi korrelatsioon.

Kokkuvõtteks võib teha järelduse, et ainult esimese mõõdistusperioodi korral oli korrelatsioon keskmise tugevusega. See võis olla seotud kahe erineva veemassi esinemisega, mis omasid erinevat hapniku- ja soolsusevahelist seost. Ülejäänud perioodidel oli seos tugev. Negatiivsest korrelatsioonist võib järeldada, et soolsuse suurenemisega hapniku keskmine kontsentratsioon väheneb ja vastupidi. Ühtlasi viitab tugev korrelatsioon sellele, et vee parameetrite muutlikkus on seotud vee(masside) vaheldumisega. Vaheldumiseks võib-olla kaks põhjust: horisontaalne advektsioon või halokliini üles-alla kõikumine.

3.3. *Hoovuste domineerivad suunad*

Peatükis 3.2 tehtud andmete analüüsist tegime järelduse, et hapniku ja soolsuse muutused olid ilmselt seotud veemasside liikumisega ja/või halokliini kerkimise/langemisega. Selles peatükis on kirjeldatud, millised olid domineerivad hoovused erinevatel perioodidel põhjalähedases kihis. Varasematest uuringutest on teada, et põhjalähedased hoovused on tihti väga kitsa suunavahemikuga. See tuleb sellest, et hoovuseid suunab lokaalne topograafia. Viimast kinnitavad ka antud töös käsitletud mõõtmised.

Hoovuste iseloomustamiseks põhjalähedastes kihtides kasutati 1-tunnise lahutusega aegridu. Igal perioodil analüüsiti esialgu kolme põhjalähedast bini. Joonisel 23 on toodud iga mõõtmise perioodi kohta hoovuste polaarhistogrammid. Igale perioodile vastab 3 hoovuste roosi. Hoovuste roosidest on näha, et vee voolamine kolmes sügavamal bini ulatuses (sügavamad 6 m) ei erine oluliselt üksteisest. Sellepärast edaspidi uurime ainult kõige põhjalähedasemat kihti ehk kõige sügavamal bini (joonis 23a, vasakpoolsed paneelid).

ADCP1 tehtud mõõtmised näitasid (joonis 23 ADCP1a), et põhjalähedased hoovused esinesid peamiselt ida- ja edela suunas. Selle mõõtmispiirkonna analüüsitud bini sügavus oli 62 m. Suurem osa (62%) hoovuste kiirustest jäid vahemikku 0-5 cm s⁻¹.

Novembris 2010 (ADCP2), 80 m sügavusel mõõdetud tulemused näitasid, et peamiselt esinesid kiirused 0-5 cm s⁻¹ ja 5-10 cm s⁻¹ (66%). Sellel perioodil vaheldusid põhjalähedases veekihis põhja- ja lõunasuunaline voolamine.

ADCP3 hoovuste roosilt (joonis 23 ADCP3a) on näha, et põhjalähedases (70 m) kihis esinesid peamiselt ida- ja läänesuunaline voolamine. Kahe kuu vältel esinesid kõige sagedamini hoovused kiirusega 0-5 cm s⁻¹ ja 5-10 cm s⁻¹.

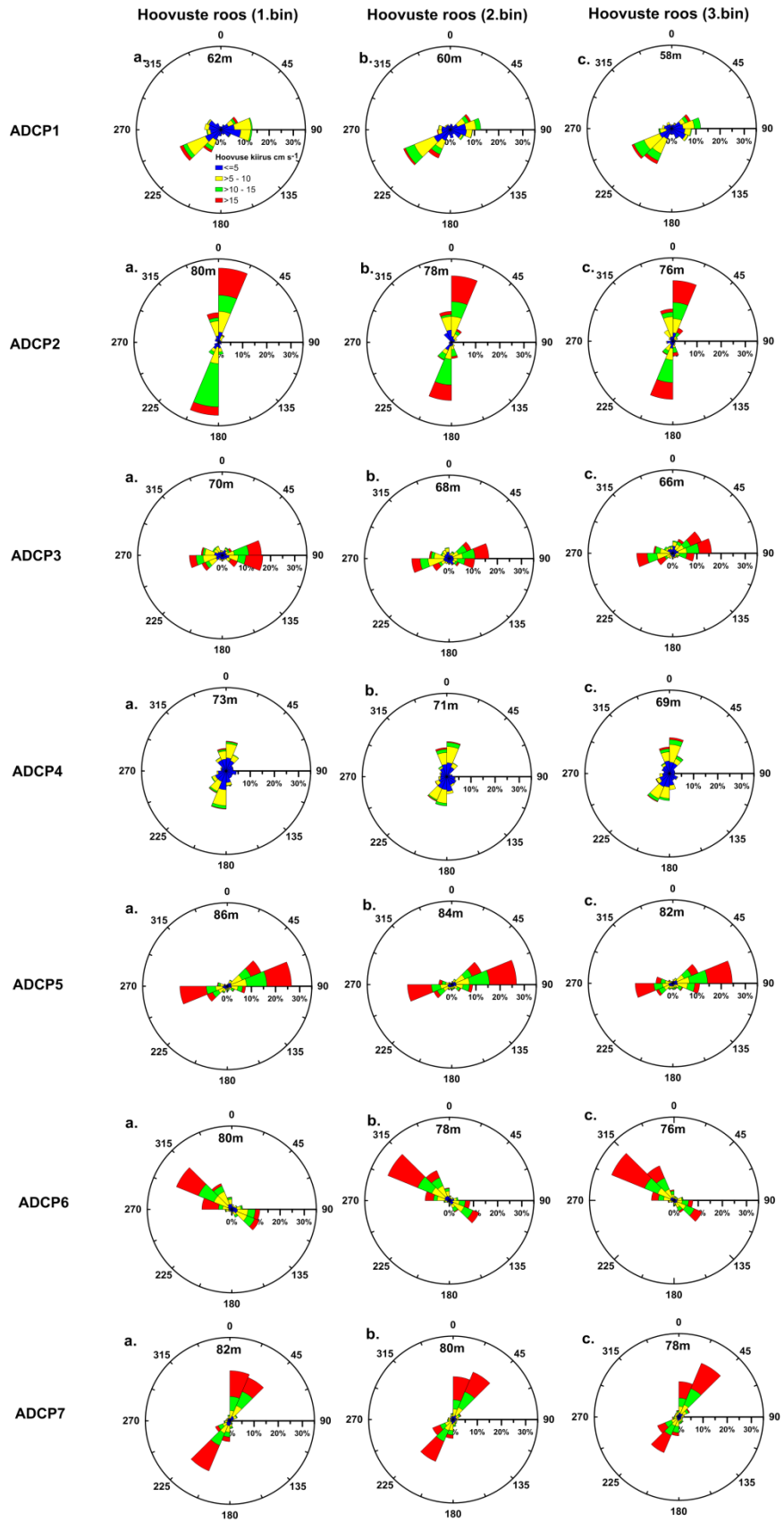
Suvel ja hilissügisel 2011 (ADCP4), 73 m sügavusel veekihis mõõdetud hoovuste reas vaheldusid peamiselt põhja- ja lõunasuunaline voolamine (joonis 23 ADCP4a). Kiiruste suurem osakaal oli nõrgematel hoovustel (0-5 cm s⁻¹), 66% kogu mõõtmistest. Suurem osa tugevate hoovuste kiirustest (üle 15 cm s⁻¹) oli registreeritud põhjasuunas, kus esines 58% kogu tugeva hoovuste kiiruste mõõtmisest.

ADCP5 asukohas teostati mõõtmisi poole aasta jooksul. Antud vaatlusperioodi mõõtmised tehti kõige sügavamas asukohas, sügavaim mõõdetud bin oli seal 86 m. Jooniselt 23 on näha (ADCP5a), et põhjalähedases kihis vaheldusid peamiselt ida- ja läänesuunalised hoovused.

Järgmine mõõtmisperiood (ADCP6) näitas loode- ja kagusuunaliste hoovuste vaheldumist (joonis 23 ADCP6a). Uuritud bin oli 80 m sügavusel. Suurem osa hoovuste kiirustest olid üle 10 cm s⁻¹.

Viimase jaama ADCP7 põhjalähedases veekihis (82 m) valdasid peamiselt kirde- ja edelasuunalised hoovused. Kõige tugevamad hoovuste kiirused esinesid N-NE suunas, peamiselt kiirusega üle 15 cm s⁻¹. Kõige väiksem osakaal oli nõrkadel hoovuse kiirustel, kuni 10 cm s⁻¹. Sellel perioodil registreeriti kõige tugevam hoovuse kiirus kõigist mõõtmisperioodidest. Maksimaalne hoovuse kiirus (58 cm s⁻¹) esines 12. detsembril SW suunas.

Hoovuste rooside abil leidsime hoovusvektorite peamised suunad. Suhteliselt kitsad hoovusteroosid näitavad, et hoovuste suund põhjalähedases kihis oli topograafia poolt kontrollitud. Analüüsi edaspidiseks lihtsustamiseks arvutame hoovuskomponendi piki domineerivaid suundasid. Edasiseks analüüsiks (peatükk 3.4 ja lisa 1) valiti järgnevad hoovuskomponendid: 1. periood- 225°, 2. periood- 0°, 3. periood- 90°, 4. periood- 0°, 5. periood- 180°, 6. periood- 68° ja 7. periood- 22.5°.



Joonis 23. Hoovuste polaarihogrammide eri sügavustel (a, b, c).

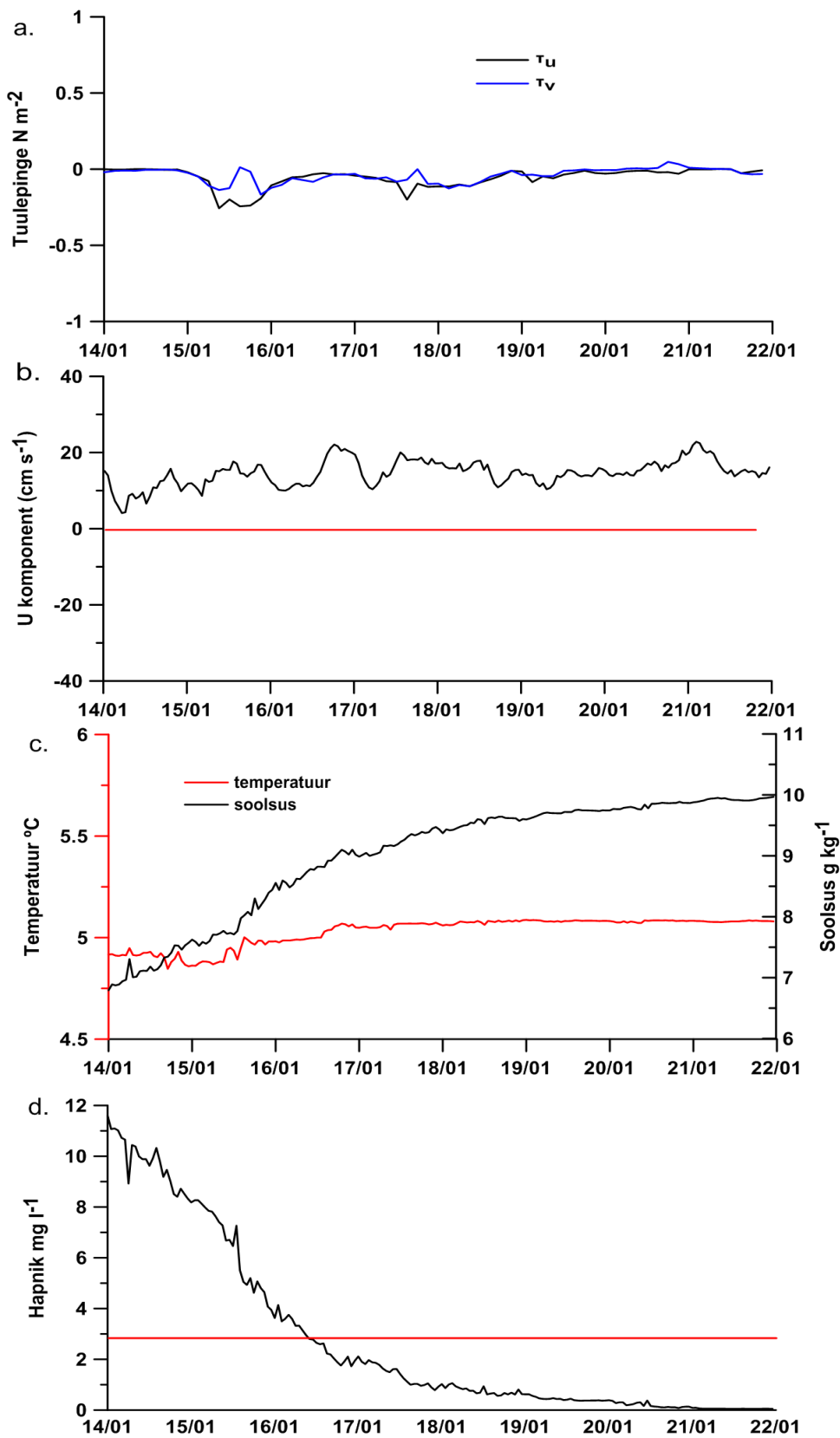
3.4. Järsud põhjakihi parameetrite muutused

Järgnevalt vaatleme temperatuuri-, soolsuse ja hapniku ajalisi muutuseid ning seostame neid hoovuse ja tuulega. Mõõdistusperioodide jooksul toimunud ajaline muutlikkus on kirjeldatud lisas 1. Selle peatükki eesmärgiks on analüüsida perioode, kus toimusid suurimad muutused uuritavates parameetrites. Järsud põhjakihi parameetrite muutuste kirjeldamiseks valiti kolm perioodi. Esimesel juhul toimus järsk hapniku sisalduse vähenemine; teisel ja kolmandal juhul suurenemine.

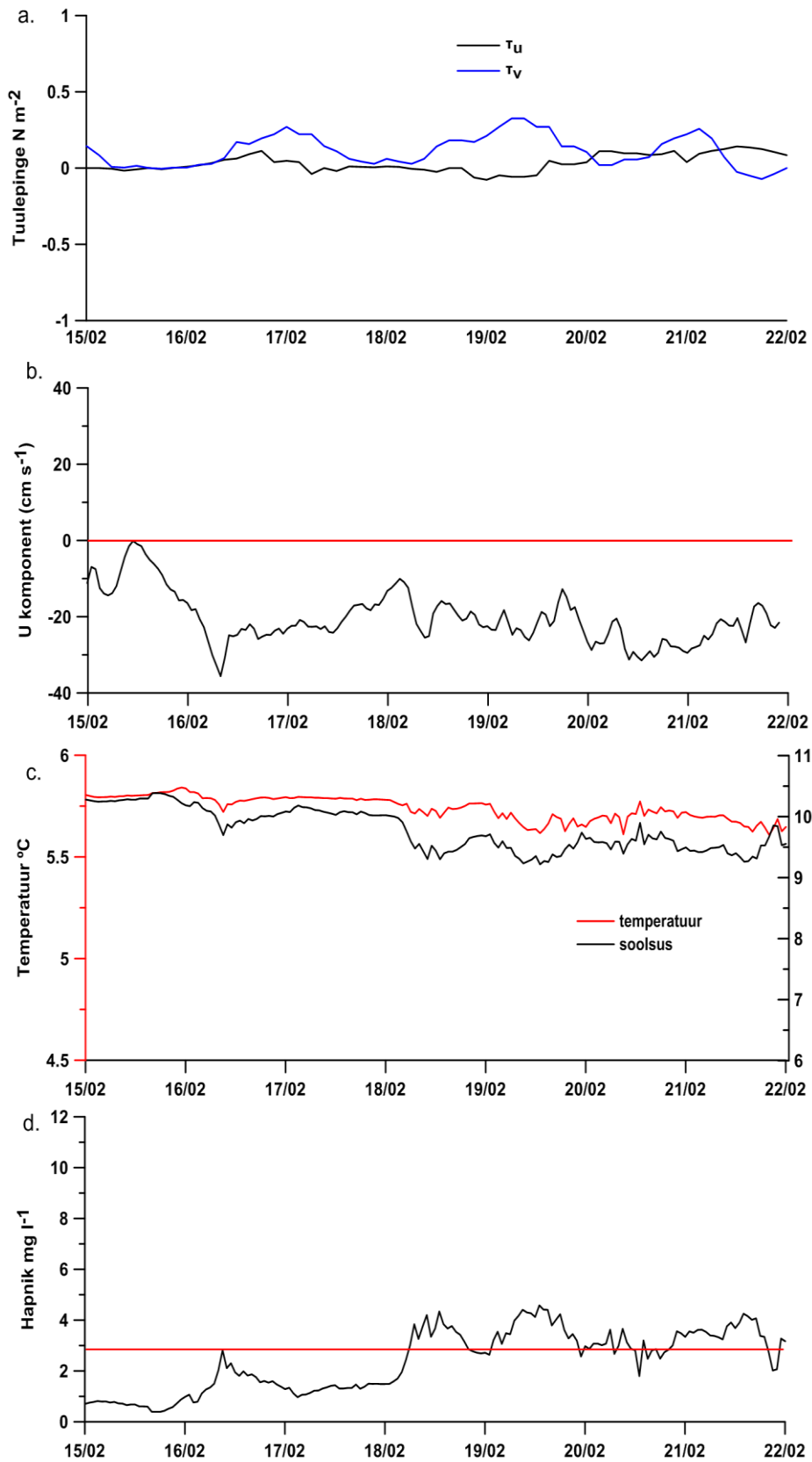
Esimene analüüsitud sündmus oli seitsmendast mõõdistusperioodist. Sellest on välja toodud vahemik 14-22 jaanuar 2014 (joonis 24). Kogu perioodi vältel domineeris põhjalähedases kihis lahte sissevool. Kõige tugevam tuul sellel ajavahemikul registreeriti 15. jaanuaril. Tuul oli SW suunas (kirdetuul), samal ajal tõusis lahte sissevoolu kiirus 10.0 cm s^{-1} -st kuni 15.8 cm s^{-1} -ni. Ajavahemikul 14.-17. jaanuar hapniku sisaldus langes 12.1 mg l^{-1} -st kuni 1.0 mg l^{-1} -ni. Samal ajal registreeriti temperatuuri väike tõus $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ ning soolsus tõusis 6.8 g kg^{-1} -st 9.4 g kg^{-1} -ni. Eelnev viitab selgelt nn. hüpoksilise soolakeele jõudmisele mõõtmisjaama. Seega antud juhul tekitas järsu hapniku vähenemise advektsioon.

Teine sündmus valiti viiendast mõõdistusperioodist. Vahemikus 15-22 veebruar 2012 toimus hapniku sisalduse suurenemine lahes (joonis 25) ning samal ajal soolsus langes. Kogu perioodi jooksul esines põhjalähedases kihis lahest väljavool. Seega võib eeldada, et hapniku kontsentratsiooni tõusu tingis põhjalähedase kihi väljavool.

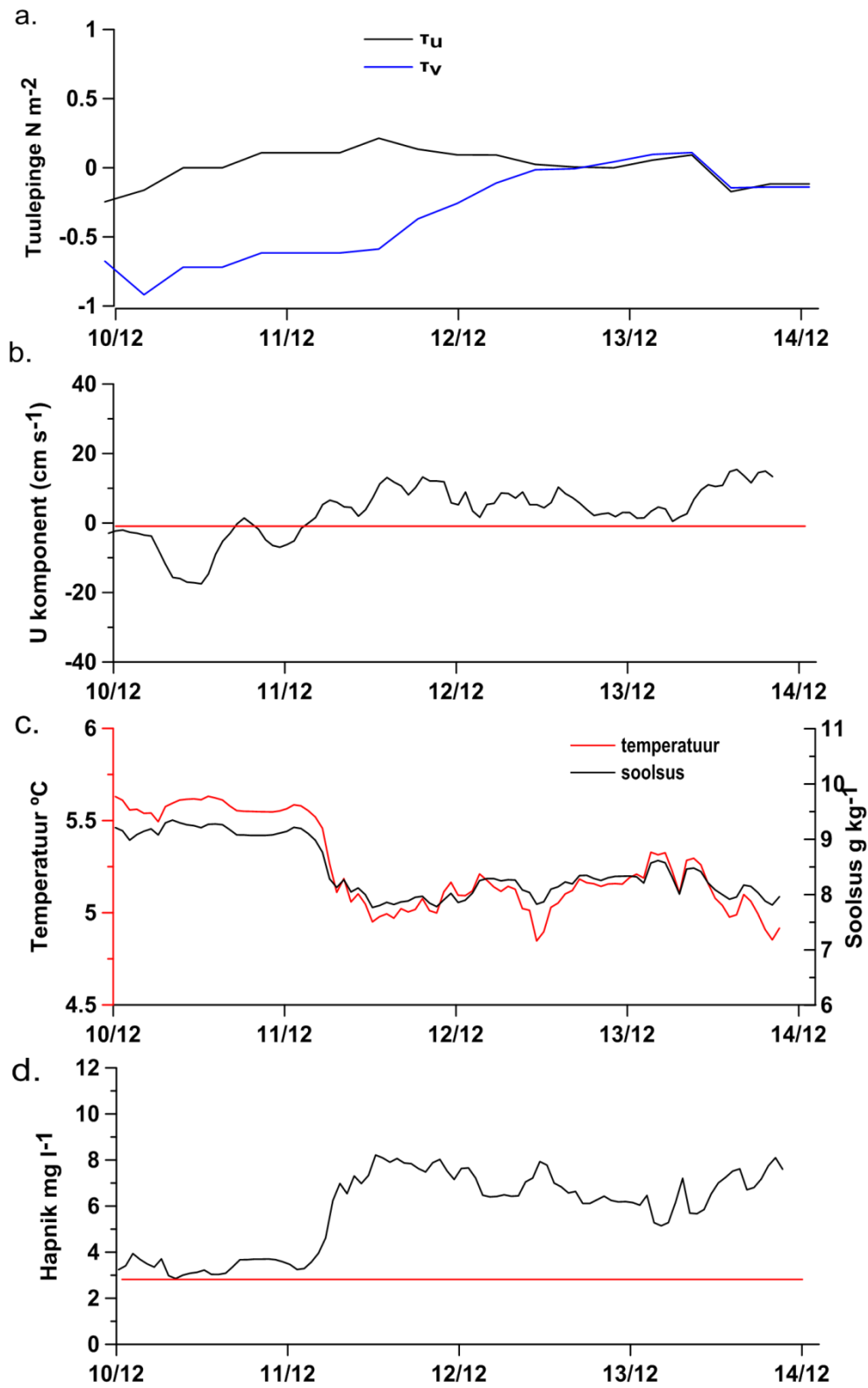
Kolmas sündmus valiti kolmandast mõõdistusperioodist (joonis 26). Ajavahemikul 10.-14. detsember 2010 toimus hapniku sisalduse suurenemine mõõdistusjaamas. Samal ajal temperatuur ning soolsus langesid, kuid hoovusandmed näitasid sissevoolu. Seega alati ei kaasne lahte sissevoolava hoovusega hapniku vähenemist. Selliste sündmuste iseloomu peavad selgitama järgmised uurimistööd.



Joonis 24. Esimene sündmus: 14-22.01.2014



Joonis 25. Teine sündmus: 15.-22.02.2012.



Joonis 26. Kolmas sündmus: 10.-14.12.2010.

4. Arutelu

Käesoleva töös jõuti järeldusele, et Soome lahe halokliinis ning sellest allpool esineb arvestatav vee parameetrite muutlikkus. Hapniku muutlikkus korreleerus hästi soolsuse muutlikkusega. See viitab sellele, et lühemas mastaabis (päevad, nädalad) on põhjakihi parameetrid tugevas sõltuvuses hoovustest. Varem on põhjakihi mõõtmiste põhjal Soome lahe suudmeosas näidatud (Liblik et al. 2013), et sellised muutused on tingitud estuaarse tsirkulatsiooni modifitseerimisest tuule poolt (Elken et al. 2003). Käesolevas töös on vaadatud ka mitmeid lahe keskosasse jäävaid andmeridu. Korrelatsioon soolsuse ja hapniku vahel oli tugev kõigis jaamades, v.a. kõige idapoolsemas jaamas. See võib viidata, et seal ei ole Läänemere avaosast tuleva hüpoksilise soolakeele mõju nii suur. Tuleb märkida, et selle jaama asukoht oli kõige madalam (temperatuuri, soolsuse ja hapniku mõõtmised toimusid 62 m sügavusel). Sellest võib aga järelduda, et hüpoksilise soolakeele (mis on tugevas sõltuvuses tuulest) mõju ulatub kõikjale Soome lahe sisemusse, kus on piisavalt sügavust, st. kuhu halokliinialune vesi saab tungida. Teisalt ei saa unustada, et tugeva korrelatsiooni soolsuse ja hapniku vahel annab ka halokliini üles-alla liikumine. Seega ei pea vaadeldud muutlikkuse taga olema ilmingimata advektsioon.

Läänemere süvakihtide hüpoksia on tõsine keskkonnaprobleem (Conley et al. 2009). Seitsmest perioodist kuue vältel oli vee hapniku sisaldus allpool hüpoksia piiri (2.9 mg l^{-1}) üle 50 % ajast. Vaid kolmandal perioodil jäi see näitaja 36 % juurde. Seega, erinevalt Läänemere avaosast, on Soome lahes hüpoksia esinemine/mitte esinemine väga varieeruv ja sõltuvuses tuuleoludest.

Ilmselt tingib tuule sesoonsus (Keevallik ja Soomere, 2010) ka hüpoksilise vee esinemise sesoonsuse Soome lahes. See tähendab, et talvekuudel, kui edelatuuled on tugevamad on hüpoksia esinemise tõenäosus väiksem.

Pikaajaliselt mängivad Soome lahe põhjakihi soolsuse (Liblik ja Lips, 2011) ja hapnikusisalduse (Laine et al. 2007) juures rolli ka halokliini kõrgus ja tugevus Läänemere avaosas, mis omakorda sõltub nn. suurte Põhjamere vee sissevoolude toimumisest. Antud töös ei ole neid mõjusid analüüsitud, kuid viimastel aastatel on veevahetus Põhjamere vahel intensiivistunud (nt. Mohrholz et al. 2015) ning on esinenud mitmeid suuri sissevoole. See võib viia tugevama halokliinini Läänemere avaosas ja hüpoksia süvenemiseni Soome lahes.

Kokkuvõte

Käesoleva töös on esitatud põhjalähedase veekihi parameetrite (temperatuur, soolsus, tihedus) muutlikkuse uurimus Soome lahes.

Töö lähtematerjaliks olid seitse põhjalähedase kihi temperatuuri, soolsuse, hapniku ja hoovuse aegrida, mis olid kogutud Soome lahe erinevatest osadest.

Töös leiti, et hapniku, soolsuse ja temperatuuri muutlikkus on seotud suures osas horisontaalse adveksiooniga ja/või halokliini üles-alla liikumisega. Hoovusteroosid näitasid, et lokaalselt suunab hoovuseid põhjakihis topograafia.

Soolsuse- ja hapnikuvaheline korrelatsiooniarvutus näitas, et tugevam on nende kahe parameetri vaheline seos lahe lääneosas. Kõige nõrgem korrelatsioon oli idapoolseimas jaamas, mis oli ka kõige madalam mõõtmispunkt (62 m). Sellest võib järeldada, et hüpoksilise soolakeele mõju ulatub kõikjale üle kogu Soome lahe, kus halokliinialuse vee jaoks on piisavalt sügavust.

Kõikide perioodide vältel registreeriti hüpoksiat, seejuures hüpoksia olukord oli valdav sügisel 2010. Seevastu detsembris-jaanuaris 2010/2011 esines hüpoksia vaid 36% kogu mõõtmistest. Ülejäänud aegridades esines hüpoksia üle 50 % ajast.

Summary

Variability of sea water parameters (temperature, salinity, oxygen) in the near bottom layer of the Gulf of Finland was studied and presented in the present thesis.

The study was based on seven time-series measurements that were collected from different parts of the Gulf of Finland at the near-bottom layer.

It was found that oxygen, salinity and temperature variability is largely related to the horizontal advection and/or vertical movement of the halocline. The current-rose diagrams showed that bottom topography locally direct the currents in the near-bottom layer.

The salinity and oxygen correlation was stronger in the western part of the Gulf of Finland. The weakest correlation was found at the easternmost station, which was also the shallowest location (62 m) of measurements. It might be inferred that the hypoxic salt wedge influence extends all over the Gulf of Finland, where the sea is deep enough.

Hypoxia appeared in all seven time series and it dominated in the autumn of 2010. In contrast, in December-January 2010/2011 hypoxia was present only in 36% of measurements. In the rest of the time-series hypoxia occurred more than 50% of the time.

Tänuavaldused

Kõigepealt soovin tänada oma kaasjuhendajat, Tallinna Tehnikaülikooli Meresüsteemide Instituudi nooremteadur Irina Suhhovat, kes on teinud ära suure töö käesoleva magistritöö valmimiseks. Lisaks tänan oma juhendajat, Tallinna Tehnikaülikooli Meresüsteemide Instituudi vanemteadur Taavi Liblikut, kes on aidanud viia magistritöö õiges suunas.

Tänan veel professor Sirje Keevallikut, kes kutsus mind TTÜ'sse magistrantuuri õppima.

Samuti tänan oma perekonda toetuse eest.

Kasutatud kirjandus

Alenius, P., Myrberg, K. and Nekrasov, A., 1998. The physical oceanography of the Gulf of Finland: a review. *Boreal Env. Res.* 3, pp 97–125

Andrejev, O., Myrberg, K., Alenius, P. and Lundberg, P. A., 2004. Mean circulation and water exchange in the gulf of Finland- a study based on three-dimensional modelling. *Boreal Env. Res.* 9, pp 1-16

Book, J.W., Perkins, H., Signell, R.P. and Wimbush, M., 2007. The Adriatic Circulation Experiment winter 2002/2003 mooring data report: A case study in ADCP data processing. Memo. Rep. NRL/mr/7330-07-8999, U.S. Naval Res. Lab., Stennis Space Center, Miss

Conley, D. J.; Björck, S.; Bonsdorff, E.; Carstensen, J.; Destouni, G.; Gustafsson, B. G.; Hietanen, S.; Kortekaas, M.; Kuosa, H.; Meier, H. E. M.; Müller-Karulis, B.; Nordberg, K.; Norkko, A.; Nürnberg, G.; Pitkänen, H.; Rabalais, N. N.; Rosenberg, R.; Savchuk, O. P.; Slomp, C. P.; Voss, M.; Wulff, F.; Zillén, L.: Hypoxia-related processes in the Baltic Sea, *Environ. Sci. Technol.*, 43, pp 3412–3420

Elken, J., 2006. Läänemere veekonveier: kas „korsten“ paikneb Soome lahe suudmes? *Publicationes Geophysicales Universitatis Tartuensis* 50 (2006) lk 74–84

Elken, J., Raudsepp, U., Lips, U. 2003. On the estuarine transport reversal in deep layers of the Gulf of Finland. *Journal of Sea Research* 49, pp 267 – 274

Fofonoff, M., Millard, Jr., R.C., 1983. Calculation of Physical Properties of Seawater. Woods Hole Oceanographic Institution, pp 1-14

Fonselius, S., Valderrama, J., 2003. One hundred years of hydrographic measurements in the Baltic Sea. *Journal of Sea Research*, Vol. 49, pp 229-241

Gray, J.S., Wu, R., Or, Y.Y., 2002. Effects of hypoxia and organic enrichment on the coastal marine environment. *Marine Ecology Progress Series*. Vol 238, pp 249-279

- HELCOM, 2013. Climate change in the Baltic Sea Area HELCOM thematic assessment in 2013. Baltic Sea Environment Proceedings No. 137, Helsinki, pp 1-60
- Hellerman, S., 1965. Computations of wind stress fields over the Atlantic Ocean. U.S. Weather Bureau, Washington, D.C., pp 239-244
- Inkala, A., Myrberg, K., 2001. Comparison of hydrodynamical models of the gulf of Finland in 1995- a case study. Systems Analysis Laboratory Research Reports, pp 1-19
- Jääntti, H., Heitanen, S., 2012. The effects of Hypoxia on Sediment Nitrogen Cycling in the Baltic Sea. Online doi: [10.1007/s13280-011-0233-6](https://doi.org/10.1007/s13280-011-0233-6), pp 161-169
- Keevallik, S., Soomere, T., 2010. Towards quantifying variations in wind parameters across the Gulf of Finland. Estonian Journal of Earth Sciences, 59, pp 288-297
- Laine, O. I., Andersin, A., Leiniö, S., Zuur, A., 2007. Stratification-induced hypoxia as a structuring factor of macrozoobenthos in the open Gulf of Finland (Baltic Sea). Journal of Sea Research 57, pp 65-77
- Launiainen, J. and Laurila, T., 1984. Wind characteristics at Finnish automatic marine weather stations in the Northern Baltic Sea. Finnish Marine Res., 250, pp 52-86
- Lehmann, A. and Hinrichsen, H.-H., 2002. Water, heat and salt exchange between the deep basins of the Baltic Sea. Boreal Env. Res. 7, pp 405-415
- Lessin, G., Raudsepp, U., Stips, A., 2014. Modelling the Influence of Major Baltic Inflows on Near-Bottom Conditions at the Entrance of the Gulf of Finland. PLoS ONE 9(11): e112881. doi:10.1371/journal.pone.0112881
- Liblik, T., Lips, U., 2011. Characteristics and variability of the vertical thermohaline structure in the Gulf of Finland in summer. Boreal Environment Research 16, pp 73-83
- Liblik, T., Lips, U., 2012. Variability of synoptic-scale quasi-stationary thermohaline stratification patterns in the Gulf of Finland in summer 2009. Ocean Sci., 8, pp 603-614
- 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 Sci., 9, pp 917-930

- Lilover, M-J., Pavelson, J., Kõuts, T. 2011. Wind forced currents over the shallow Naissaar Bank in the Gulf of Finland. *Boreal Env. Res.* 16 (suppl. A), pp 164-174
- McDougall, T. J., Jackett, D. R., Millero, F. J., Pawlowicz, R., Barker, P. M. 2012. A global algorithm for estimating Absolute Salinity. *Ocean Sci.*, 8, pp 1123–1134
- Mohrholz, V., Naumann, M., Nausch, G., Krüger, S., Gräwe, U., 2015. Fresh pxygen for the Baltic Sea-An exceptional saline inflow after a decade of stagnation. *Journal of Marine Systems*. Vol. 148, pp 152-166
- Palmen E., 1930. Untersuchungen über die Strömungen in den Finnland umgebenden Meeren, *Soc. Sci. Fenn., Comm. Phys.-Math.*, 12, pp 1–94
- SBE. Sea-Bird Electronics [WWW] <http://www.seabird.com/sbe16plusv2-seacat-ctd>
- Statistilise järeldamise meetodid. Korrelatsioon- ja regressioonanalüüs, lk 43-53. [WWW] http://www.sauga.pri.ee/audentes/download/ps_konspekt_lk43_53.pdf
- Suhhova, I., Pavelson, J., Lagemaa, P., 2015. Variability of currents over the southern slope of the Gulf of Finland. *Oceanologia*, pp 132–143
- Uscinowicz, S., 2014. The Baltic Sea continental shelf. National Research Institute, pp 80-328
- Vahtera, E., Conley, D.J., Gustafsson, B.G., Kuosa, H., Pitkänen, H., 2007. Internal ecosystem feedbacks enhance nitrogen-fixing cyanobacteria blooms and complicate management in the Baltic Sea. *Ambio* 36, pp 186–194

LISAD

LISA 1. Põhjakihi parameetrite ajaline muutlikkus

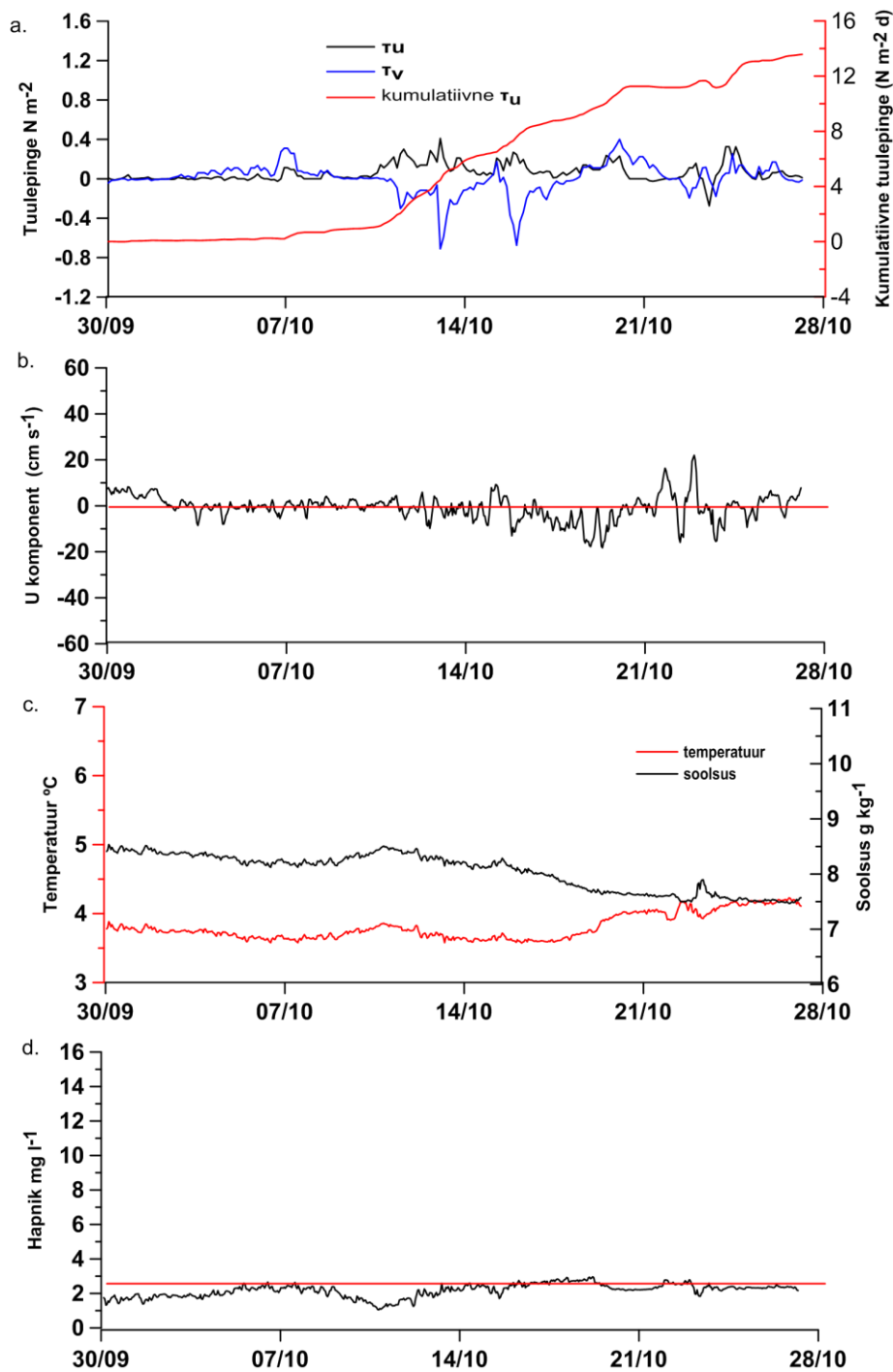
Selles lisas on näidatud temperatuuri, soolsuse ja hapniku ajaline muutlikkus ning selle seost tuulepinge ja hoovusega. Iga mõõdistusperioodi koha olid tehtud joonised 4 alamjoonisega. Ülevalt esimene (a) paneel näitab tuulepinge u ja v komponentide ajalist muutust.

U komponent näitab suunda läänest itta ning v komponent lõunast põhja. Joonisel on näidatud ka kumulatiivne tuulepinge u komponendist. Teisel (b) paneelil on näidatud hoovuse kiiruse komponent (cm s^{-1}) piki valitud suundasid (vt. peatükk 3.3). Punane 0-joon näitab piiri, millest kõrgemad väärtused näitavad lahte sissevoolu ning väiksemad väljavoolu. Kolmandal (c) paneelil on toodud temperatuuri ja soolsuse ajaline käik ning hapniku muutus neljandal paneelil (d).

1.mõõtmisperiood: 30.09.2010-27.10.2010

Sügisel 2010 tehtud mõõtmised näitavad, et 14 oktoobril tuulepinge τ_u näitab 0.4 N m^{-2} ehk suunda läänest itta ja tuulepinge τ_v -0.8 N m^{-2} või suunda põhjast lõunasse (joonis 1). Nende vektorite summa arvutus näitas, et tuul puhus loodest. Eelmises peatükis oli mainitud, et hoovused pöörati lääne-ittaa suunas, et oleks paremini vaadata hoovuste liikumine piki isojoonte. Joonisel 1b, on näha, et 22 oktoobril toimus põhjalähedases kihis toimus tugevam sissevool mööda isojoonte. Alates 11 oktoobrist hoovuse kiirus hakkas kasvama saavutades oma maksimumi 22.2 cm s^{-1} ning oli suunatud kirdesse.

Temperatuuri ja soolsuse omavahelisest joonisest on näha (joonis 1c), et 22 oktoobril hakkas temperatuur põhjalähedases kihis kasvama, samal ajal soolsus langes ja hapniku sisaldus vähenes 0.3 mg l^{-1} . Tabelis 3 on toodud välja, et oktoobris 2010 kogu perioodi jooksul esines tugev hüpoksia, 72% ajast põhjalähedases kihis esines hapnikuvaene olukord.



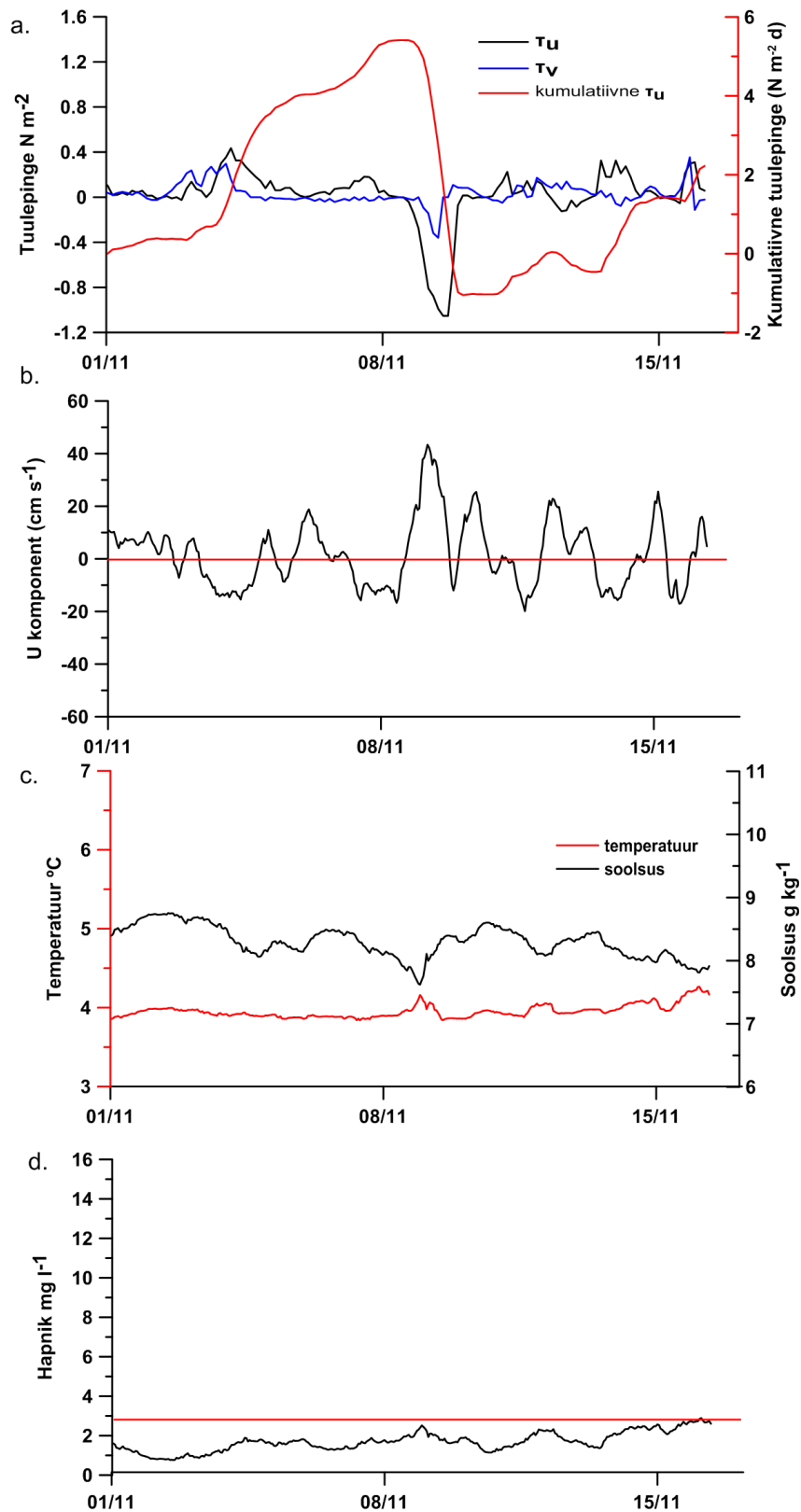
Joonis 1. 30.09-27.10.2010 (ADCP1) a) tuulepinge τ_u ja τ_v , b) U komponent ning punane 0-joon näitab sissevoolu ja väljavoolu, c) temperatuur ja soolsus, d) hapniku sisaldus ja hüperoksia piir.

2.mõõtmisperiood: 1.11.2010-17.11.2010

Jaamas ADCP2 tehtud mõõtmised näitasid, et 9 novembril oli registreeritud tuulepinge komponentides järsk muutus, tsonaalse tuulepinge väärtus langes kuni -1.05 N m^{-2} . Põhjalähedases kihis (80 m) maksimaalne hoovuse kiirus oli registreeritud 9 novembril väärtusega 43 cm s^{-1} (joonis 2b).

Võrreldes omavahel temperatuuri ja soolsuse andmed võime näha, et alates novembri esimesest nädalast (joonis 2c) temperatuuri väärtuse tõusud põhjalähedases kihis langevad kokku soolsuse sisalduse langusega. Tugeva lääne – idasuunalise voolamise korral, kus oli registreeritud maksimaalne hoovuse kiirust (9 november), temperatuur oli langenud $0.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ võrra ja soolsus suurenes 0.3 g kg^{-1} . Novembris 2010 temperatuuri keskmine väärtus põhjalähedastes kihis oli 4.0° C ja soolsuse keskmine sisaldus näitas 8.3 g kg^{-1} (tabel 3).

Sellel mõõtmisperioodil põhjalähedases kihis hapniku keskmine sisaldus oli 2.0 mg l^{-1} . Joonisel 2d on hästi näha, et peaaegu kõik hapniku väärtused olid punase joone all, millest võib järeldada, et selle perioodi jooksul põhjalähedases kihis esines suur hapnikuvaesus. Tabelis 3 näitas, et novembril 2010 hüpoksia esinemise sagedus oli 100%, mis on kõikidest mõõtmisperioodidest kõige kõrgeim protsent.



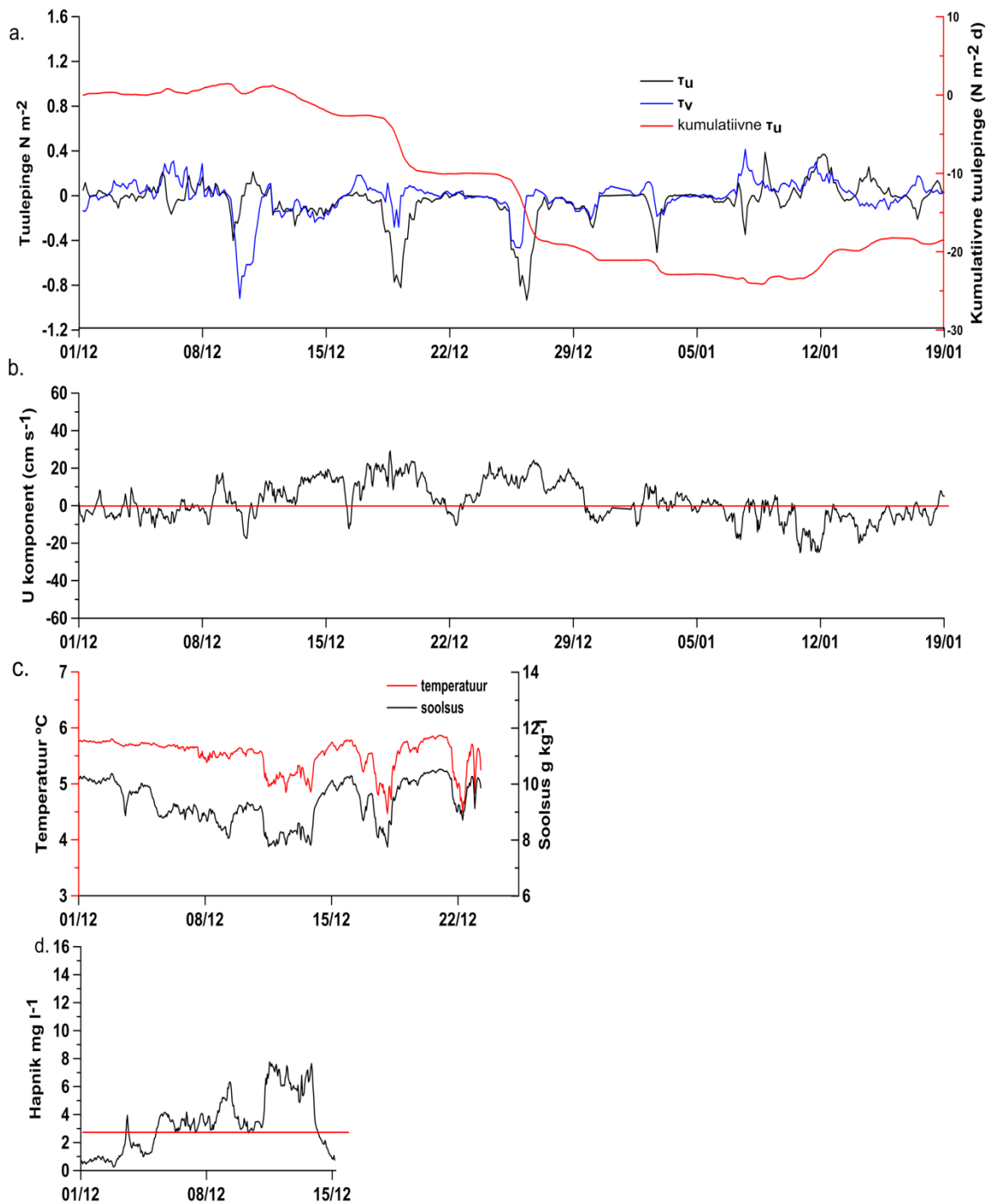
Joonis 2. 01.11-17.11.2010 (ADCP2) a) tuulepinge τ_u ja τ_v , b) U komponent ning punane 0-joon näitab sissevoolu ja väljavoolu, c) temperatuur ja soolsus, d) hapniku sisaldus ja hüpoksia piir.

3.mõõtmisperiood: 1.12.2010-18.01.2011

Mõõtmised tehtud detsembrist 2010 kuni jaanuarini 2011 näitavad, et selle mõõdistusjaama jooksul esinesid 3 tugevama tuule episoodi (joonis 3). Tugeva tuule perioodid olid registreeritud 9-10 detsembril, 18-19 detsembril ja 25-26 detsembril 2010l. Maksimaalne hoovuse kiirus sügavusel 70 m oli mõõdetud 18 detsembril (29.2 cm s^{-1}) idasuunas. Samal päeval temperatuur oli tõusnud $0.8 \text{ }^\circ\text{C}$ võrra ja soolsuse sisalduse tõus võrreldes eelmise (17 detsember) päevaga oli 0.6 g kg^{-1} .

CTD sondist võetud temperatuuri ja soolsuse andmeid koguti kuni 23 detsembrini 2010. aastal. Hapniku andmed olid registreeritud kuni 14 detsembrini, kuna sellel mõõdistusperioodil toimus CTD SBE16plus sondi andmete kadumine.

Kui Läänemere avaosast tuleb soolane vesi sisse, siis soolsuse sisaldus põhjalähedases kihis suureneb, nii nagu oli märgatud 18 detsembril. Temperatuuri ja soolsuse omavahelisest võrdlusest (joonis 3c) selgus, et peaaegu kõikidel juhtudel kui langeb temperatuur, väheneb ka soolsuse sisaldus. Soolsuse ja temperatuuri kõige väiksemad kontsentratsioonid olid mõõdetud 17 detsembril olles 7.5 g kg^{-1} ja $4.5 \text{ }^\circ\text{C}$, vastavalt. Nii temperatuur kui ka soolsuse sisaldus vähenes 1.5 kuu jooksul 0.4 ühiku võrra. Hapniku tingimused selles mõõdistusperioodil olid paremad võrreldes ADCP1 ja ADCP2 perioodidega. Hapniku keskmine sisaldus kogu perioodi jooksul oli 3.6 mg l^{-1} ning hüpoksia esines 36% kogu mõõtmistest. Peab märkima, et hapniku mõõtmised toimusid vaid 15 päeva jooksul ja viimasel mõõdetud päeval hapniku sisaldus hakkas langema.



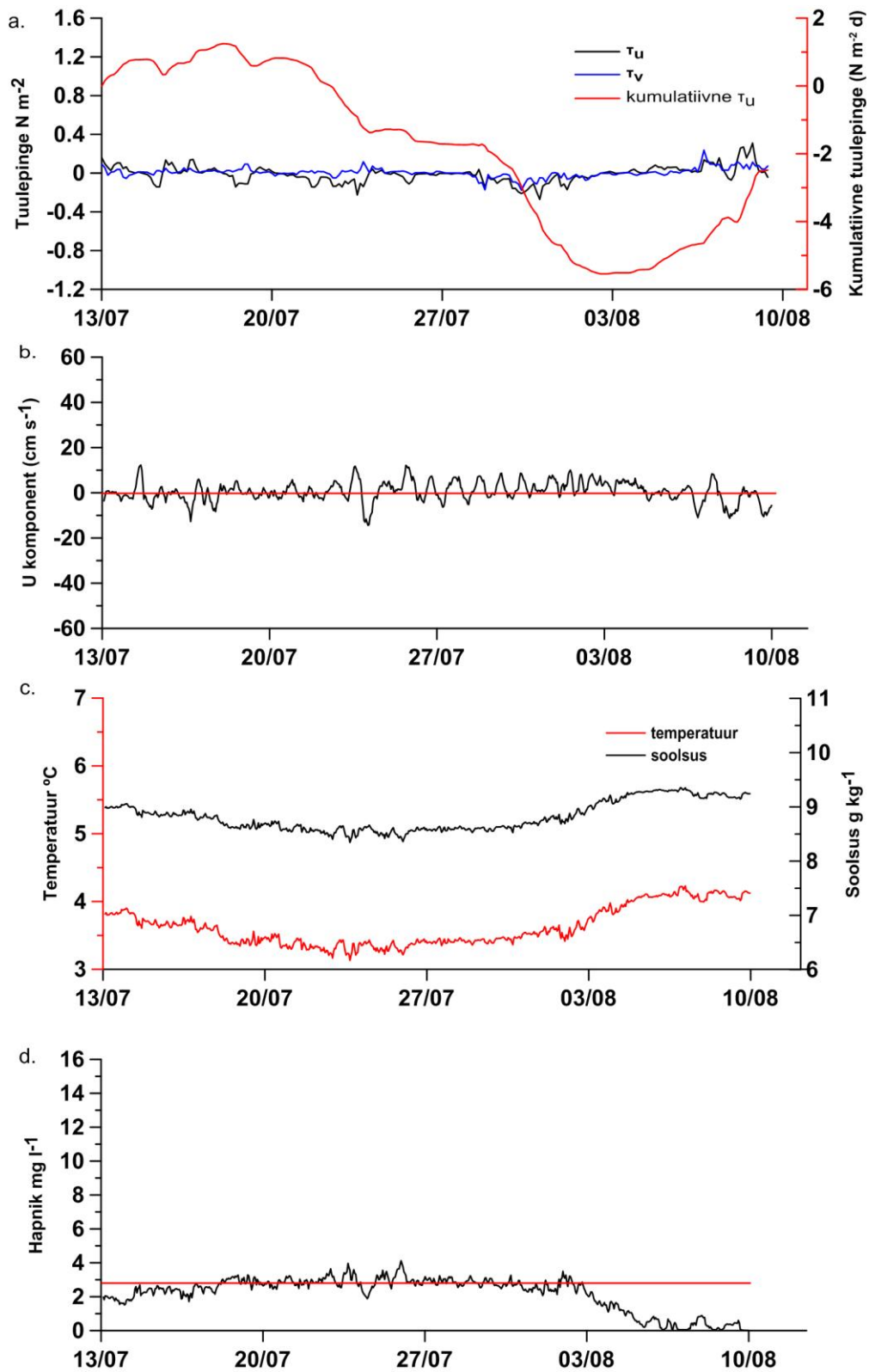
Joonis 3. 01.12.2010-18.01.2011 (ADCP3) a) tuulepinge τ_u ja τ_v , b) U komponent ning punane 0-joon näitab sissevoolu ja väljavoolu, c) temperatuur ja soolsus, d) hapniku sisaldus ja hüpoksia piir.

4 .mõõtmisperiood: 13.07.2011-05.09.2011

Selle perioodi jooksul mõõtmised olid tehtud Soome lahe kesk osas. Tuulepinge sel ajal oli stabiilne ilma suure kõikumiseta (joonis 4a). CTD sondist temperatuuri, soolsuse ja hapniku andmed olid registreeritud kuni 09 augustini.

Maksimaalne piki isojoonte voolamise kiirus oli registreeritud 23 juulil väärtusega 14.4 cm s^{-1} . 22 juulil hoovuse kiirusekomponent hakkas tõusma ja jõudis oma maksimumi 23 juulil ning peale seda hakkas uuesti langema. Sel ajal esines kõige järsem väljavool, mida tõi temperatuuri ja soolsuse sisalduse langemist. Kogu perioodi jooksul temperatuur langes 0.3° C võrra, esines ka soolsuse langus 0.2 g kg^{-1} .

Hapniku joonisest 4d on näha, et suur osa mõõtmistest oli väärtusega suurem kui 2.9 mg l^{-1} , kuid keskmine hapniku sisaldus kogu perioodi jooksul oli 2.2 mg l^{-1} . Hüppoksia esines 75.9% kogu mõõtmistest. Alates 3 augustist kuni 9 augustini hapniku kontsentratsioon langes 1.8 mg l^{-1} -st 0.02 mg l^{-1} -ni. Samal ajal kui hapniku sisaldus põhjakihis langes, siis temperatuuri ja soolsuse väärtused tõusid 3.9° C -st 4.1° C -ni ja 9.1 g kg^{-1} -st 9.3 g kg^{-1} -ni, vastavalt.



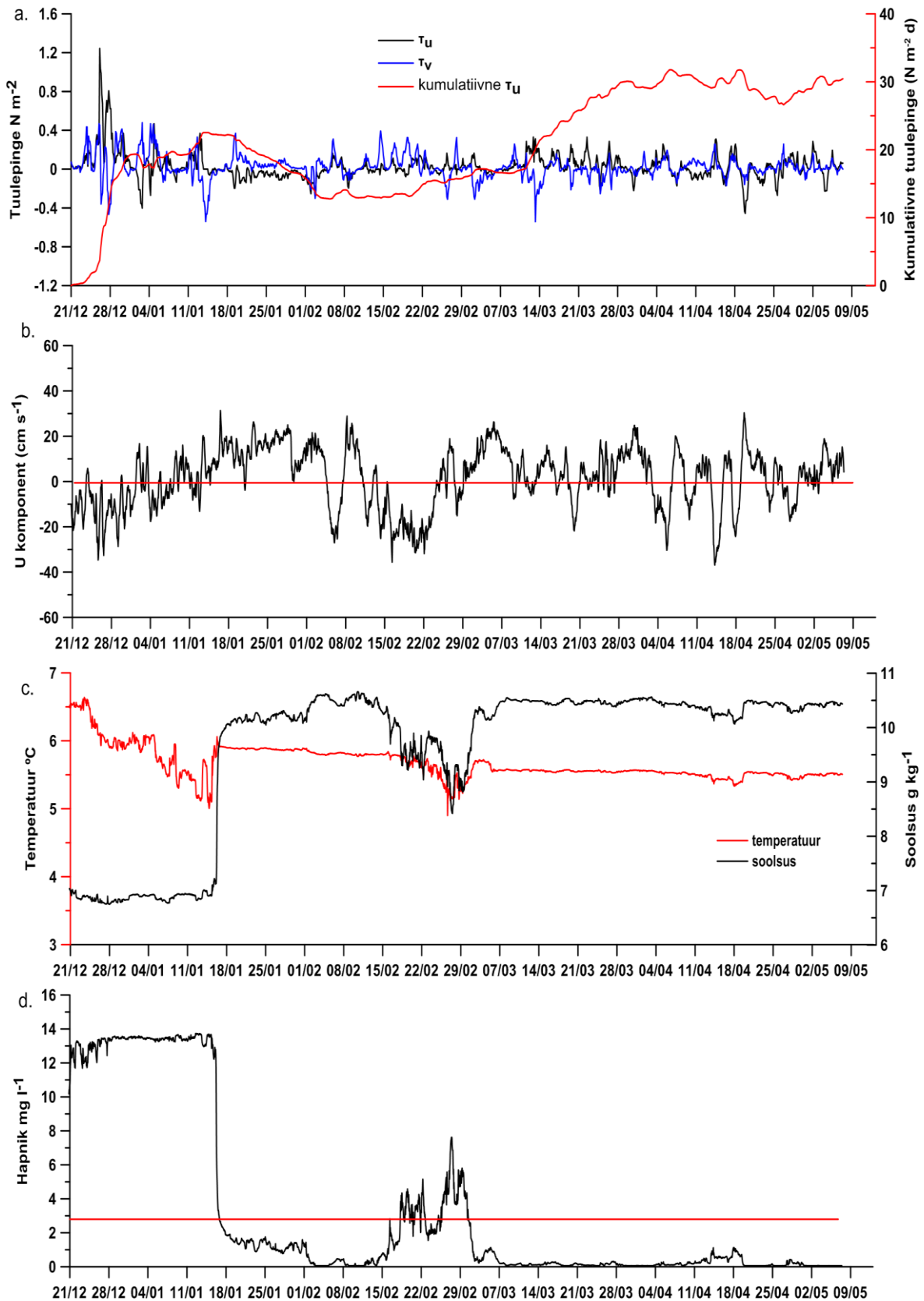
Joonis 4. 13.07.2011-05.09.2011 (ADCP4) a) tuulepinge τ_u ja τ_v , b) U komponent ning punane 0-joon näitab sissevoolu ja väljavoolu, c) temperatuur ja soolsus, d) hapniku sisaldus ja hüpoksia piir.

5.mõõtmisperiood: 21.12.2011-09.05.2012

ADCP5 mõõdistusperiood oli Soome lahe lääneosas. See oli kõige lähedaseim punkt Läänemere avaosani, kus toimub soolase vee sissevool lahte. Andmed olid kogutud pool aastat talvest kevadeni. Tuulepinge joonisest 5a on näha, et kõige suurem tõus mõlema komponendi väärtuses esines 28 detsembril.

Jooniselt 28b on näha, kuidas muutus hoovuse kiiruse komponent 21 detsembrist kuni 9 maini. Maksimaalne piki isojoonte voolamise kiirus oli 31.4 cm s^{-1} (16 jaanuaril). Temperatuuri ajareast (joonis 5c) võib näha, et suur temperatuuri muutus toimus 21 detsembrist kuni 17 jaanuarini, millal temperatuuri väärtused langesid 6.5° C -st kuni 5.0° C . Selles ajavahemikus soolsuse sisalduses ei toimunud suuri muutusi. Soolsuse joonisest on näha, et 15 jaanuarist kuni 17 jaanuarini soolsus järsult kasvas 3 g kg^{-1} võrra. Samal ajal oli registreeritud ka temperatuuri tõus. Soolsuse sisaldus jaanuaris 2012 muutus tänu tugeva soolase vee sissevoolu Soome lahte. Kogu mõõdistusperioodi jooksul põhjalähedase kihi soolsuse kontsentratsioon kasvas 3.4 g kg^{-1} võrra, temperatuur aga langes 1° C võrra.

Soolsusest vastupidine olukord Soome lahes tekkis hapniku kontsentratsioonis talvel 2012. Hapniku kõige suurem kontsentratsioon oli registreeritud 12 jaanuaril väärtusega 15.6 mg l^{-1} . 21 detsembrist kuni 17 jaanuarini hapniku sisaldus peaaegu ei muutu. Ajavahemikus 15 jaanuari kuni 17 jaanuar oli mõõdetud suur langus hapniku sisalduses. Hapniku väärtused langesid 11.46 mg l^{-1} kuni 2.02 mg l^{-1} . Veebruari lõpus oli märgatud soolsuse langus ning samal ajal hapniku kontsentratsiooni tõusu. Alates 2 märtsist põhjalähedases kihis hakkas arenema hüpoksia mis kestis kuni mõõdistusperioodi lõpuni.



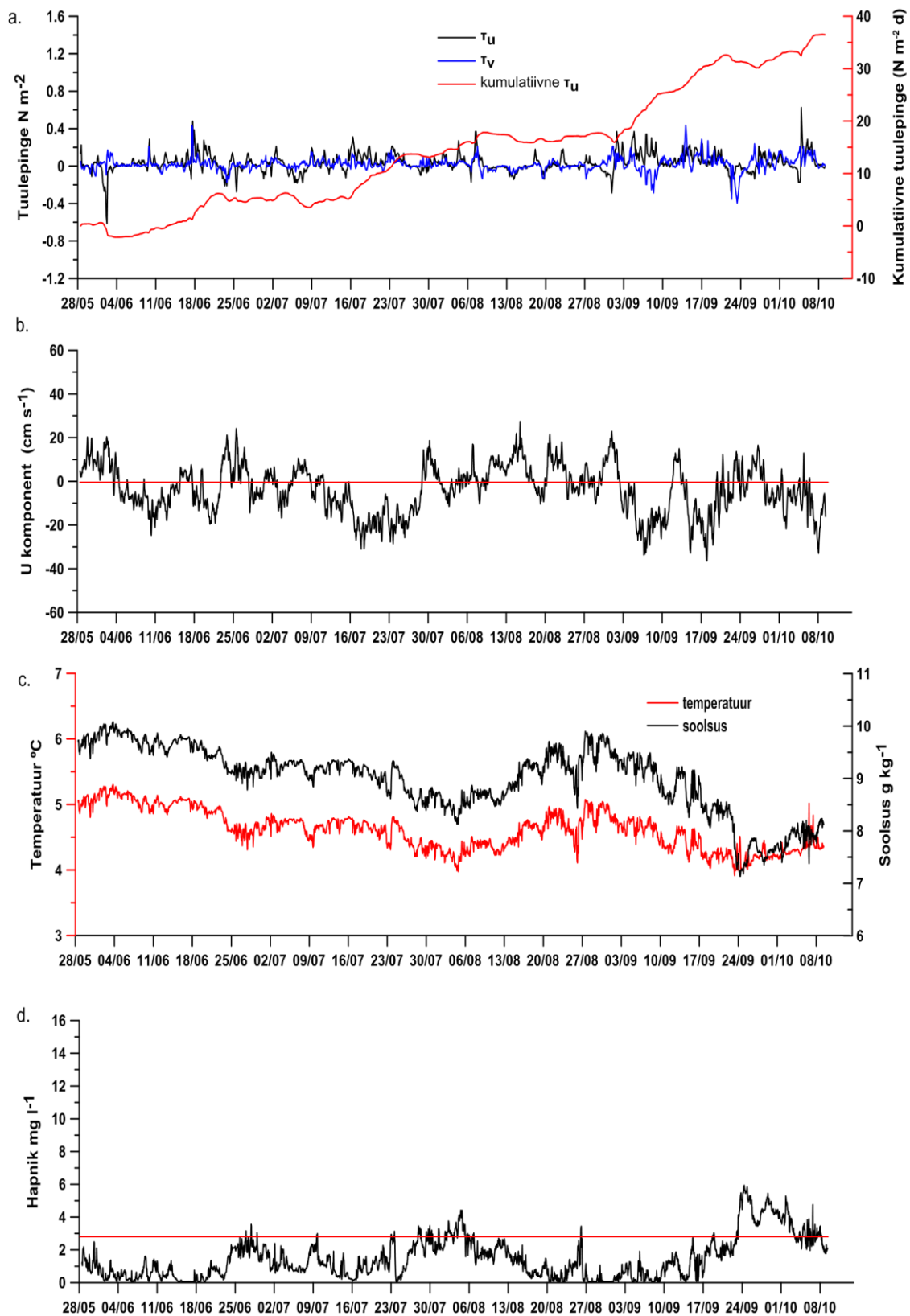
Joonis 5. 21.12.2011-09.05.2012 (ADCP5) a) tuulepinge τ_u ja τ_v , b) U komponent ning punane 0-joon näitab sissevoolu ja väljavoolu, c) temperatuur ja soolsus, d) hapniku sisaldus ja hüpoksia piir.

6.mõõtmisperiood: 28.05.2012-9.10.2012

ADCP6 mõõdistusperioodi jooksul andmed olid kogutud kevadest kuni sügiseni 2012. Sellel perioodil tuulepinge komponentide muutus toimus peaaegu koos. Hoovuste kiiruse keskmine väärtus põhjalähedases kihis (80 m) oli 10 cm s^{-1} . Maksimaalne hoovus 80 m sügavusel oli mõõdetud 18 septembril kiirusega 36.0 cm s^{-1} .

Soolsuse väärtus vähenes 135 päeva jooksul 1.7 g kg^{-1} võrra ning temperatuur langes $0.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ võrra. Temperatuuri ja soolsuse andmetest (joonis 6c) on näha, et nende kahe parameetri muutused toimusid sarnaselt: 28 maist kuni 6 juulini temperatuur tõusis $0.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ võrra ja samal perioodil soolsus kontsentratsioon oli tõusnud 9.7 g kg^{-1} -st 10.0 g kg^{-1} -ni. Mõõtmisperioodi erandiks oli 29 september kui toimus temperatuur kasv kuid soolsuse sisaldus langes.

Hapniku sisalduse muutused põhjalähedases kihis toimusid vastupidiselt soolsuse muutustega. Jooniselt 6d saab jälgida, et 23 septembrist hapnik hakkas tõusma ning päeva jooksul tõusis 3.0 mg l^{-1} -st 6.6 mg l^{-1} -ni. Samal ajal soolsus vähenes 1 g kg^{-1} võrra. Kogu mõõdistusperioodi jooksul hapniku sisaldus kasvas 1 mg l^{-1} võrra. Hapniku keskmine kontsentratsioon selle perioodi jooksul oli kõige väiksem kõikidest mõõdistusperioodidest, sellepärast hüpoksia esinemise sagedus oli kõrge 87%.



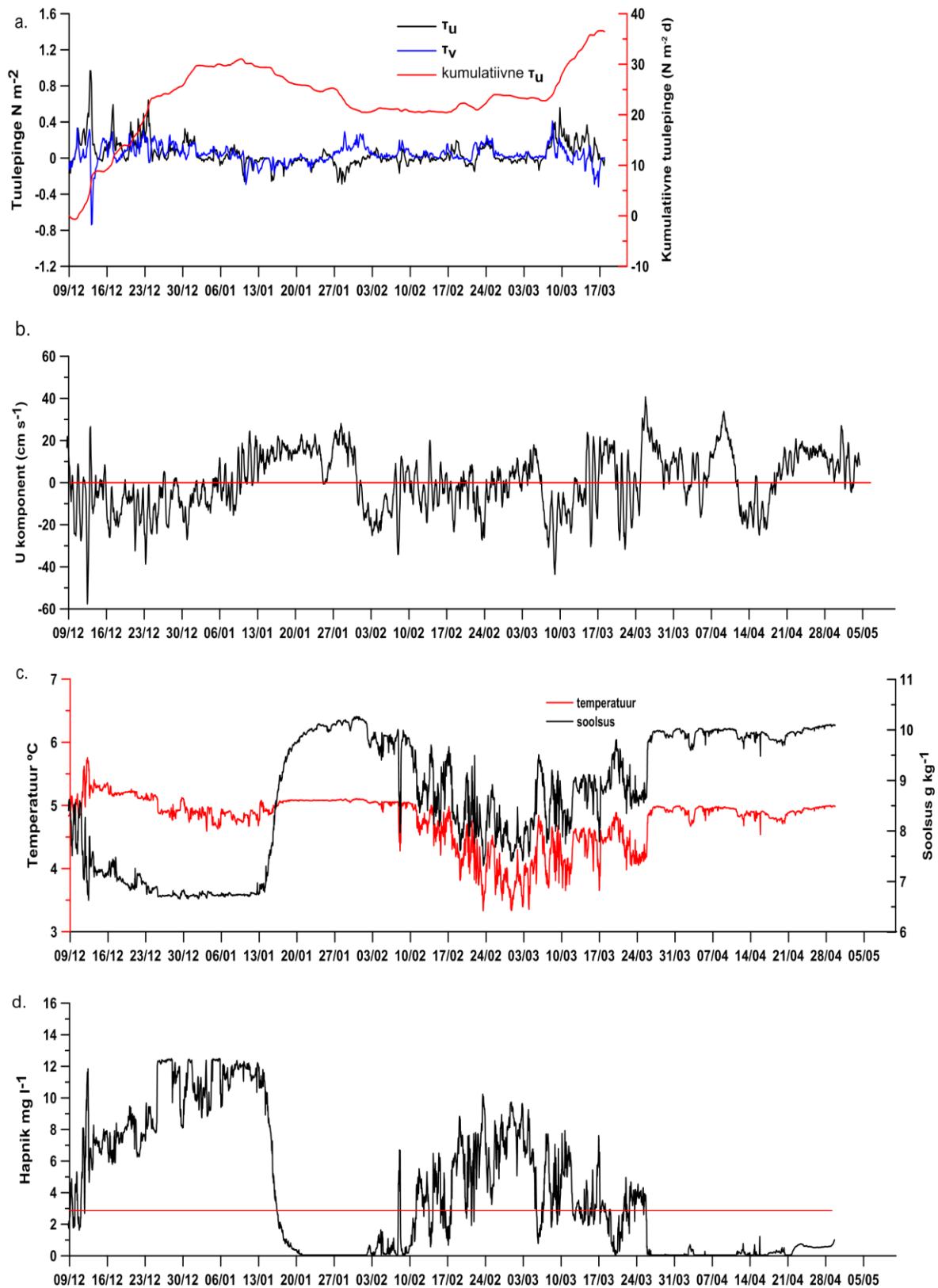
Joonis 6. 28.05.2012-09.10.2012 (ADCP6) a) tuulepinge τ_u ja τ_v , b) U komponent ning punane 0-joon näitab sissevoolu ja väljavoolu, c) temperatuur ja soolsus, d) hapniku sisaldus ja hüpskia piir.

7.mõõtmisperiood: 9.12.2013-6.05.2014

Viimase (ADCP7) mõõdistusperioodi jooksul andmeid koguti 149 päeva. Maksimaalne hoovuste kiirus 82 m sügavusel (57.1 cm s^{-1}) seitsmenda mõõtmisperioodi jooksul oli registreeritud 12 detsembril. Temperatuuri, soolsuse (joonis 7c) ja hapniku sisalduse joonistel (joonis 7d) on näha 3 huvitavat sündmust.

Esimene episood toimus 12 jaanuarist kuni 24 jaanuarini, sellel perioodil soolsuse väärtused olid tõusnud kuni 10 g kg^{-1} , temperatuur tõusis $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ võrra ja hapniku sisaldus langes 12.7 mg l^{-1} -st 0.1 mg l^{-1} -ni. Ajavahemikul 14-21 jaanuar hapniku sisaldus oli langenud 9 mg l^{-1} võrra. 20 jaanuarist kuni 3 veebruarini hapniku kontsentratsioon lahes oli 0 mg l^{-1} , samal ajal, kus soolsuse sisaldus oli kõige suurem kogu mõõdistusperioodi jooksul.

Ajavahemikus 3 veebruar kuni 3 märts on näha, et soolsus vähenes 2.3 g kg^{-1} võrra, temperatuur samuti vähenes $2.0 \text{ }^\circ\text{C}$ ning hapniku kontsentratsioon oli tõusnud 0.1 mg l^{-1} -st 9.7 mg l^{-1} -ni. Kolmas mõõdetud episood oli registreeritud 3 märtsist kuni 25 märtsini, millal hapniku keskmine sisaldus oli 3.7 mg l^{-1} . Hapniku suurim väärtus oli registreeritud 3 märtsil väärtusega 9.7 mg l^{-1} . Samal kuupäeval soolsuse kontsentratsioon oli kõige väiksem 7.5 g kg^{-1} . Perioodi algusest kuni mõõtmisperioodi lõppuni soolsuse sisaldus põhjakihis suurenes 1.5 g kg^{-1} võrra.



Joonis 7. 09.12.2013-06.05.2014 (ADCP7) a) tuulepinge τ_u ja τ_v , b) U komponent ning punane 0-joon näitab sissevoolu ja väljavoolu, c) temperatuur ja soolsus, d) hapniku sisaldus ja hüüpoksia piir.