

Pro gradu –tutkielma

**Keväinen lämpeneminen ja jääpeitteen alaiset veden
liikkeet Päijänteen Ristinselällä 2006**

Ninni Liukko



Jyväskylän yliopisto

Bio- ja ympäristötieteiden laitos

Limnologia ja hydrobiologia

12.12.2007

JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO, Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta

Bio- ja ympäristötieteiden laitos
Limnologia ja Hydrobiologia

LIUKKO NINNI, I.: Keväinen lämpeneminen ja jääpeitteen alaiset veden liikkeet
Päijänteen Ristinselällä 2006

Pro gradu: 40+1 s.

Työn ohjaajat: Prof. Kalevi Salonen

Tarkastajat: Prof. Kalevi Salonen, Dos. Timo Huttula

Joulukuu 2007

Hakusanat: konvektio, lämpötila, virtaukset, kevätkierto

TIIVISTELMÄ

Vesi liikkuu järvissä myös talven jääpeitteisenä aikana, vaikkakin yleensä hitaammin kuin avovesikaudella. Keväällä lämpeneminen alkaa jo jään alla, mutta heikkojen jääolojen takia mittaustietoa jäiden lähtöä edeltäviltä viikoilta on melko vähän. Tässä tutkimuksessa seurattiin lämpötilan kehittymistä Päijänteen Ristinselällä keväällä 2006 aina jäiden lähtöön asti. Mittaustulokset osoittavat lämpenemisen alkaneen ylimmissä vesikerroksissa noin kuukautta ennen jäiden lähtöä ja edenneen vähitellen syvempiä vesikerroksia kohti. Lisäksi rantojen lähellä lämpötila oli paikoin korkeampi verrattuna ulappa-alueisiin erityisesti viimeisellä viikolla ennen jäiden lähtöä. Tärkein tekijä Ristinselän kevänaikaisessa lämpenemis- ja sekoittumisprosessissa näyttääkin olevan sekä pysty- että vaakasuuntainen konvektiosekoittuminen, joka aiheutuu jään läpi veteen tunkeutuvan auringon säteilyn lämmittävästä vaikutuksesta. Sekoittuminen alkaa ensin pystysuunnassa tehostuen jatkuvasti säteilyn lisääntymisen ja jää- ja lumipeitteen ohenemisen vaikutuksesta. Myöhemmin rantojen läheltä alkava vaakasuuntainen sekoittuminen saattaa vaikuttaa jäiden lähtöön mennessä jopa syvännealueella asti.

UNIVERSITY OF JYVÄSKYLÄ, Faculty of Science

Department of Biological and Environmental Science

Limnology and Hydrobiology

LIUKKO NINNI, I.: Water warming and movements under ice in Ristinselkä, Lake Päijänne in spring 2006.

Master of Science Thesis: 40+1 p.

Supervisors: Prof. Kalevi Salonen

Inspectors: Prof. Kalevi Salonen, Dos. Timo Huttula

December 2007

Key Words: convection, temperature, gradient, current

ABSTRACT

Water movement is evident in lakes under ice cover in winter, although the movement is typically slower than during the open water period. The spring-time warming of water begins already under ice, but there are few data from the last weeks before ice out because of the poor ice conditions. In this project, I studied the development of under-ice water temperature at Ristinselkä basin of Lake Päijänne, in spring 2006. The results show that the water started to warm first a month before the ice off in the uppermost layers and gradually later in the deeper layers. In addition, the water temperatures near the shores were sometimes higher than temperatures in the deeper areas, particularly during the last week before ice off. The most important factor affecting the process of warming and mixing of the water column seems to be the convective mixing in both vertical and horizontal direction. This mixing happens because the radiation from the sun enters through the ice, warming the water under it. The mixing begins first in vertical direction and extends to larger depths due to increase in radiation and thinning of snow and ice cover. Later the horizontal mixing begins near shores and may finally at the time of ice out be seen even in the middle of the lake.

Sisältö

1. JOHDANTO	5
2. AINEISTO JA MENETELMÄT	6
2.1. Tutkimusalue.....	6
2.2. Tutkimusjakso ja tehdyt mittaukset.....	7
3. TULOKSET	11
3.1. Säätiiedot ja lumen ja jään paksuudet	11
3.2. Lämpötila-anturien tulokset	12
3.3. CTD-tulokset.....	19
3.3.1. Syväne, Rutalahti ja Ristinselän keskiosa.....	19
3.3.2. Lahtilinja.....	21
3.3.3. Purolinja.....	28
3.4. Happipitoisuus.....	31
4. TULOSTEN TARKASTELU	33
4.1. Pystysuuntainen konvektio.....	33
4.2. Pohjanmyötäiset virtaukset.....	34
4.3. Lämpötilan vuorokausivaihtelu	37
4.4. Happi	38
4.5. Lämpötilajakaumien epäjatkuvuus.....	38
4.6. Tutkimusmahdollisuuksia jatkossa.....	39
Kiitokset	40
Kirjallisuus	41

1. JOHDANTO

Suomalaisissa makeavetisissä järvissä lämpötila on talvisin käänteisesti jakautunut, eli heti jään alla on kylmin lähes nolla-asteinen vesi ja pohjan lähellä lämpimin ja raskain vesi, jonka lämpötila on yleensä enintään 4°C. Tämä johtuu siitä, että veden tiheysmaksimi makeassa vedessä (noin 1000 kg/m³) on 4 °C:ssa. Jäättyessään vesi laajenee, minkä vuoksi jää kelluu kevyempänä veden päällä. Järviin varastoituu siis talveksi lämpöä, jonka jääkansi ja lumipeite eristävät ilmakehästä.

Suurissa järvissä jäätymisen tapahtuu syksyisin tuulen aiheuttaman sekoittumisen takia myöhemmin kuin pienissä järvissä (Kalff 2002). Tämän vuoksi suuret järvet viilenevät ennen jäätymistä usein pieniä järviä selvästi kylmemmiksi, noin 1-3 °C:seen. Nollan ja neljän asteen välillä lämpötilasta johtuvat tiheyserot ovat pieniä ja tämä tekee jäänalaisesta vesimassasta hyvin epävakaa ja alttiin liikehtimiselle pientenkin ulkoisten häiriöiden vaikutuksesta.

Avovesikaudella suurten järvien sekoittumiseen vaikuttaa merkittävimmin tuulen aiheuttama leikkausjännitys veden pinnassa. Lisäksi sekoittumista voi tapahtua pintaveden jäähtymisen aiheuttamien tiheyserojen takia, kun lämpöä siirtyy veden pinnasta ilmaan. Keskitalvella näitä ilmiöitä ei esiinny, sillä jääkansi eristää vesimassan tuulen vaikutukselta ja ilman lämpötilan muuttuminen vaikuttaa lähinnä jään paksuuteen. Järven lämpö määrä muuttuu vain hyvin vähän talven aikana. Jäänalainen vesimassa ei siitä huolimatta ole täysin liikkumaton, vaan useat tekijät voivat aiheuttaa sekoittumista myös jään alla. Laajan mittakaavan virtausten lisäksi vedessä tapahtuu aina myös mikroskaalan liikkeitä. Bengtssonin (1996) mukaan sekoittuminen jään alla voi johtua neljästä eri syystä: läpivirtauksesta, jääkannen heilahteluista, sedimentistä vapautuvasta lämmöstä tai auringon säteilyn veteen tunkeutumisesta. Kahden jälkimmäisen tekijän kohdalla sekoittuminen johtuu konvektiovirtauksista, jotka syntyvät alle neliasteisessa vedessä lämpenemisen aiheuttamien tiheyserojen seurauksena.

Läpivirtauksen aiheuttamat virtaukset ovat havaittavia vain, jos järven läpi virtaava joki on suuri ja järvi itse suhteellisen pieni. Päävirtaus kulkee järven keskiosassa, ja sen lisäksi noin kertaluokkaa hitaammat sekundaariset virtaukset, jotka aiheutuvat Coriolisvoimasta, sekoittavat vettä järven poikkisuunnassa kahdessa kerroksessa. (Bengtsson 1996).

Jääkannen heilahtelut aiheutuvat tuulen voiman kohdistumisesta jään pintaan ja jääkannen kallistumisesta sen seurauksena. Heilahtelujen jakso on minuuttien luokkaa, ja siitä aiheutuva vesimassan siirtyminen ylös ja alas voi olla metrien suuruusluokkaa. Tästä voi seurata hidaskiertävä vaakasuuntainen kiertovirtaus, jonka suunta vaihtelee tuulitilanteiden mukaan. Bengtsson (1996) toteaa tällaista heilahtelevaa liikettä esiintyvän aina jääpeitteisissä järvissä ja sen vaikuttavan merkittävästi vaakasuuntaiseen sekoittumiseen.

Kun lämpöä siirtyy pohjasedimentistä veteen, niin pohjan lähellä oleva (alle neljäasteinen) vesi tulee yläpuolisia kerroksia raskaammaksi ja voi alkaa liikkua painovoimavirtauksena pohjaa pitkin syvänteisiin. Tämä ilmenee syvänteiden lämpenemisenä talven mittaan (Mortimer ja Mackereth 1958). Kun raskaampi vesi liikkuu alaspäin, niin vastavirtauksena nousee korvausvettä ylös. Tästä syntyvät konvektiokierron solut ovat vaakasuunnassa pitkiä ja ohuita, ja niiden virtausnopeus on Bengtssonin (1996) mukaan noin 1 mm/s tai vähemmän.

Pohjaa pitkin kulkevia virtauksia voi esiintyä myös keväällä, kun auringon säteily lämmittää rannan lähellä olevia tai matalikoiden pieniä vesimassoja järven keskiosien suuria

massoja nopeammin. Tällöin alle neljäasteisessä vedessä voi syntyä raskaamman (lämpimämmän) veden painovoimavirtaus pohjaa pitkin syvemmälle. (Stefanovic ja Stefan 2001).

Pystysuuntainen konvektiosekoittuminen alkaa, kun auringon lyhytaaltainen säteily pääsee tunkeutumaan jään läpi lämmittäen alapuolella olevaa vettä. Veden lämpötilan ollessa alle 4 °C lämmennyt raskaampi vesi vajoaa alaspäin, ja tällöin alhaalta nousee samanaikaisesti korvausvettä ylöspäin. Kierto pysyy yllä, jos auringon säteilyn veteen tunkeutuminen jatkuu ja jään alla säilyy ohut lämpimämmän veden kerros. Pystysuuntainen konvektiokierto on polaaristen alueiden järvissä merkittävä prosessi keväällä. Kierto tehostuu ja sen vaikutusalue syvenee kevään mittaan, kun auringon veteen tunkeutuvan säteilyn osuus kasvaa säteilyn lisääntyessä ja jääpeitteen ohentuessa (Matthews 1988). Sekoittuvan kerroksen syventyessä sen alapuolelta kulkeutuu kiertoon mukaan yhä raskaampaa vettä (Kelley 1997).

Ennen jäiden lähtöä tapahtuva pystysuuntainen sekoittuminen voi tehostaa sekoittumisoloja kevään aikana erityisesti, jos sekoittuva kerros ulottuu pohjaan asti jo ennen jäiden lähtöä. Baehrin ja DeGrandpren (2004) mukaan pystysuuntainen sekoittuminen jään alla voi olla tärkeä mekanismi hiilidioksidin ja hapen siirtymiselle pohjan ja pinnan välillä sekä järven matalien ja syvien alueiden välillä. Jään alla tapahtuva sekoittuminen vaikuttaa myös muun muassa kasviplanktonin pysymiseen vesimassassa (Matthews ja Heaney 1987, Kelley 1997), minkä vuoksi perustuotanto saattaa runsastua jo ennen jäiden lähtöä vaikuttaen koko järven ekologiseen kiertokulkuun.

Bengtssonin (1996) mukaan jään alla tapahtuvat erilaiset virtaukset liittyvät aina vahvasti järven lämpöoloihin. Vaikka kaikki virtaukset eivät synnykään lämpötilan muutosten seurauksena, niin lämpötilan pystysuuntainen jakauma voi rajoittaa tai ohjata kaikenlaisia virtauksia tiettyyn vesikerrokseen.

Tässä työssä tutkin Päijänteen Ristinselän keväänaikeista lämpenemistä. Tavoitteena oli selkeämmän kuvan saaminen vesimassan lämpötila- ja sekoittumisolosuhteiden kehittymisestä ajan kuluessa kohti kevään täyskiertoa. Työ on osa laajempaa tutkimusta Hydrodynamic focusing of sediment oxygen consumption to the deepest parts of large lakes – a multidisciplinary approach (K. Salonen, Suomen Akatemian hanke 203589).

2. AINEISTO JA MENETELMÄT

2.1. Tutkimusalue

Tutkimus tehtiin Päijänteen pohjoisosassa Ristinselällä, jonka luoteispäässä sijaitsee Muuramen kunta ja asutuskeskus. Kaakkoispäässä varsinaisen Ristinselän jatkeena on Rutalahti, jonka pohjukassa sijaitsee samanniminen kylä. Ristinselän pohjoispuolella Päijänne kapenee Hauhonseläksi ja Murtoseläksi ja on yhteydessä Jyväsjärveen Äijälänsalmen kautta. Ristinselän eteläpuolella on Kärkisten salmi, jonka alapuolella Päijänne aukeaa Mustanseläksi ja Vanhanseläksi. (Kuva 1).

Päijänteeseen tulee vettä pohjoisesta Vaajakosken kautta keskimäärin 150 m³ sekunnissa. Pohjois-Päijänteen tulovirtaamasta alle 2 % tulee Äijälänsalmen kautta Jyväsjärvestä ja sen yläpuolisesta vesistöistä. (Hakkari ja Saukkonen 1998). Suurin osa Pohjois-Päijänteeseen tulevasta vedestä virtaakin Vaajakosken kautta, jossa Vaajavirta kokoaa Rautalammin, Viitasaaren ja Saarijärven reittien vedet yhteen. Keväisin virtaamat ovat suurimmillaan, ja esimerkiksi vuoden 2006 huhtikuussa Vaajakosken kautta tuli Päijänteeseen

vettä noin 0,2 km³. Karkeasti arvioiden puolet tästä vesimäärästä riittäisi täyttämään Ristinselän 8,4 kilometriä pitkän ja yli 50 metriä syvän alueen 50 metrin syvyyteen asti. Järven luusua on Kalkkisissa, josta Päijänteen vettä virtaa Kymijokeen keskimäärin 240 m³ sekunnissa. Päijänteen vesi virtaa siis hitaasti pohjoisesta etelään ja sen viipymisaika on keskimäärin 2,5 vuotta.

Ristinselkä on muodostunut yhteen Päijänteen altaan useista luoteis-kaakkoissuunnassa kulkevista murtumalinjoista, jotka ovat syntyneet mannerlaatan liikkeessa. Ristinselällä on Suomen sisävesien syvin (95,3 m, Hakkari ja Saukkonen, 1998) kohta, joka sijaitsee lähellä selän jyrkkäpiirteistä koillisrantaa. Lähellä syvännettä on myös Rappukallio-niminen jyrkkä kallio, joka on melko tunnettu nähtävyys alueella.

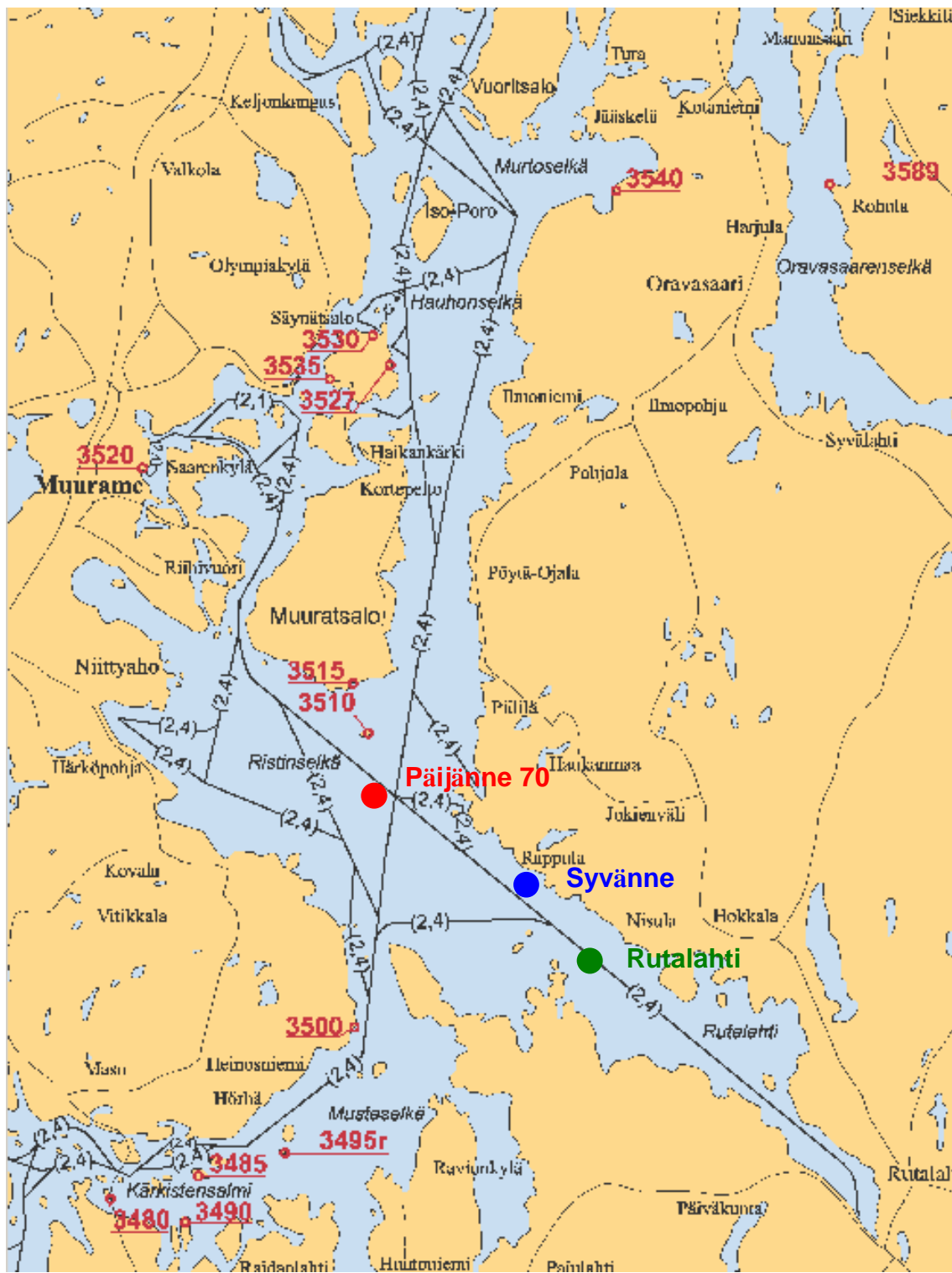
2.2. Tutkimusjakso ja tehdyt mittaukset

Mittaukset tehtiin vuoden 2006 keväällä Päijänteen syvimmissä kohdassa (myöhemmin *Syvänne*) ja siitä rantaa kohti muodostetuilla kahdella linjalla, jotka nimettiin Lahtilinjaksi ja Purolinjaksi, sekä lisäksi Rutalahdella (myöhemmin *Rutalahti*) ja Ristinselän keskellä (myöhemmin myös *Päijänne 70*) olevilla pisteillä. Syväne – mittauspaikka on noin 92 metriä syvä, kun taas Rutalahti ja Päijänne 70 ovat noin 75 metriä syviä. (Kuva 1 ja Taulukko 1).

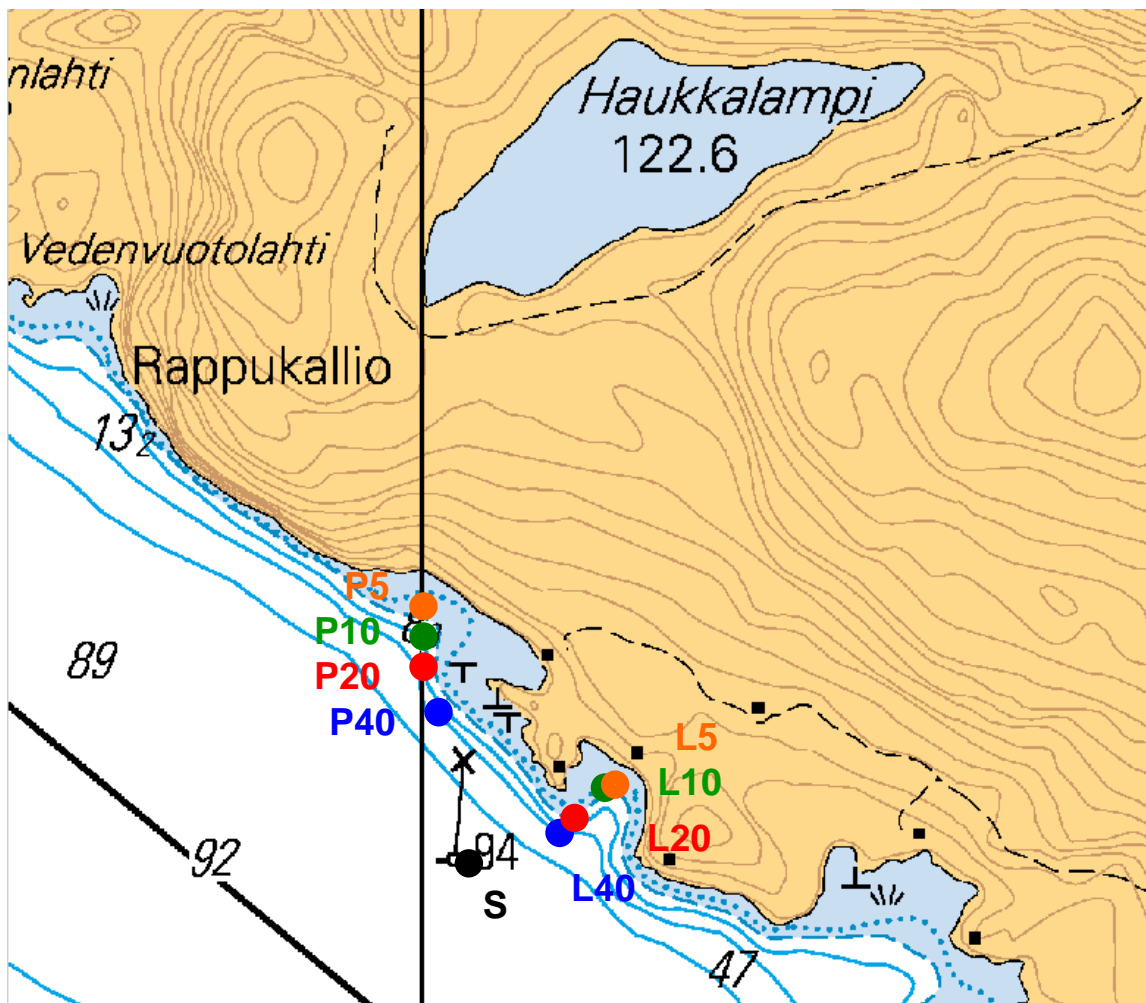
Lahtilinja muodostettiin siten, että Syvänteeltä otettiin linja kohti läheisen rannan lahdelta, ja mittauspaikat sijoitettiin kohtiin, jossa veden syvyys oli noin 40 metriä (*Lahti 40*), 20 metriä (*Lahti 20*), 10 metriä (*Lahti 10*) ja 5 metriä (*Lahti 5*). Purolinja tehtiin samalla tavalla kohti toista lahdelta, jonne virtaa ylempänä olevasta Haukkalammesta puro. Linja tehtiin kohti puron suuta, ja linjan mittauspisteet ovat *Puro 40*, *Puro 20*, *Puro 10* ja *Puro 5*. (Kuva 2 ja taulukko 1).

Taulukko 1. Mittauspaikkojen syvyydet ja koordinaatit WGS84-järjestelmän mukaan.

	N-koordinaatti	E-koordinaatti	Syvyys (m)
Syvänne	62 02,855	25 50,089	92.0
Päijänne 70	62 04,060	25 46,299	77.0
Rutalahti	62 02,233	25 51,456	75.7
Lahti 40	62 02,877	25 50,217	42.0
Lahti 20	62 02,884	25 50,256	21.0
Lahti 10	62 02,894	25 50,321	11.0
Lahti 5	62 02,895	25 50,320	7.0
Puro 40	62 02,967	25 50,035	44.0
Puro 20	62 03,017	25 49,995	18.0
Puro 10	62 03,054	25 49,991	11.0
Puro 5	62 03,072	25 49,988	4.5



Kuva 1. Ristinselkä ja Päijänne 70-, Syväne- ja Rutalahti-mittauspaikat. (Kartta: CD Merikartta J Vesijärvi-Päijänne). Kartan mittakaava on noin 1:120000.



Kuva 2. Syvänteen, Lahtilinjän ja Purolinjän mittauspaikat. S tarkoittaa Syväntettä, L lahtilinjaa, P purolinjaa ja numerot viittaavat mittauspaikkojen nimellisiin syvyyksiin. Kartan mittakaava on noin 1:105000 (Kartta: CD Merikartta J Vesijärvi-Päijänne).

Syvänteen, Rutalahden ja Ristinselän keskiosan mittauspaikoissa ketjuissa olevat anturit mittasivat lämpötilaa puolen tunnin välein keskitalvesta jäiden lähtöön asti. Ketjuissa ensimmäinen anturi oli asetettu metrin syvyyteen, seuraava viiden metrin syvyyteen ja siitä lähtien aina seuraava viittä metriä edellistä syvemmälle. Syvänteellä alin anturi oli 90 metrin syvyydessä ja Rutalahdessa sekä Ristinselän keskellä 75 metrin syvyydellä. Syvänteen anturiketju vietiin paikalleen vuoden 2005 lopussa ja asetettiin mittaamaan 31.12.2005 kello 23:59 alkaen. Rutalahden ja Ristinselän keskelle ketjut vietiin vasta tammikuun lopulla ja ne mittasivat 26.1.2006 kello 23:59 alkaen. Rutalahden anturiketjussa alimman anturin ja pohjapainon väliseksi etäisyydeksi jäi 0,7 metriä ja Ristinselän ketjussa 2 metriä. Anturit pysyivät vakioetäisyydellä pohjasta, koska ketjun pintakelluke oli jatkuvasti jään alapintaa syvemmällä. Rutalahden 40 metrin syvyydessä sijaitseva anturi ja Ristinselän keskiosan 45 metrin anturi rikkoutuivat kesken mittausjakson, joten niistä ei saatu mittaustuloksia. Käytetyt anturit ovat Starmon mini- lämpötila-antureita, joille on graafinen SeaStar-tukiohjelmisto. Valmistajan (Star-Oddi, Islanti) ilmoittama mittaustarkkuus on 0,05 °C.

CTD-luotaukset tehtiin Helsingin yliopiston Geofysiikan osaston MicroCTD-luotaimella (Falmouth Scientific). Sen lämpötila-anturin tarkkuus on $\pm 0,005$ °C ja erotuskyky $0,0001$ °C. Sähkönjohtavuusanturin tarkkuus on $\pm 0,5$ mS m^{-1} ja erotuskyky $0,01$ mS m^{-1} . Syvyyssanturin tarkkuus on $\pm 0,02$ % ja erotuskyky $0,001$ %. Luotauksissa CTD laskettiin ensin avantoon noin puolen metrin syvyyteen, jossa sen lämpötilan annettiin tasaantua minuutin ajan. Sen jälkeen laite laskettiin tasaisesti pohjaan ja vedettiin ylös. Mittausaineistosta käytettiin vain alapään laskettaessa mitattuja arvoja.

CTD-luotauksia tehtiin jäiden lähtöä edeltävillä viikoilla kaikissa mittauspaikoissa. Syväne-mittauspaikasta luodattiin 15 kertaa ajalla 13.4.–5.5.2006. Jäätilanne oli hyvin heikko 5.5., ja jäät lähtivät lopullisesti mittausalueelta todennäköisesti 5.-6.5. Rutalahden ja Ristinselän keskiosan mittauspaikoissa luotaus tehtiin vain 3 kertaa jäiden kestäessä vielä hyvin jalankulkijaa. Lahtilinjan eri paikoissa CTD-luotaus tehtiin aina silloin, kuin Syvänteen paikastakin, tosin kahtena kertana Lahti 5- paikasta ei luodattu lainkaan. Purolinjalla tehtiin myös luotauksia samoina aikoina, mutta ainoastaan 28.4. asti. Syvänteellä, Lahtilinjalla ja Purolinjalla tehdyillä mittauksilla 24.-25.4. ja 2.-3.5. pyrittiin selvittämään lämpötilan vaihtelua eri vuorokaudenaikojen välillä. Itse purosta tehtiin mittaus 25.4. (Taulukko 2).

Taulukko 2. CTD-luotausten ajankohdat mittauspaikoissa keväällä 2006.

	Syväne	Rutalahti	Päijänne70	Lahti 40	Lahti 20	Lahti 10	Lahti 5	Puro 40	Puro 20	Puro 10	Puro 5
13.4.	x										
18.4.	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
21.4.	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
24.4.											
klo13	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
24.4.											
klo19	x			x	x	x	x	x	x	x	x
25.4. klo1	x			x	x	x	x	x	x	x	x
25.4. klo7	x			x	x	x	x	x	x	x	x
25.4.											
klo13	x			x	x	x	x	x	x	x	x
28.4.	x			x	x	x		x	x	x	x
2.5. klo13	x			x	x	x					
2.5. klo19	x			x	x	x	x				
3.5. klo1	x			x	x	x	x				
3.5. klo7	x			x	x	x	x				
4.5.	x			x	x	x	x				
5.5.	x			x	x	x	x				

Happinäytteitä otettiin Ristinselältä tukemaan lämpötilojen perusteella tehtyjä johtopäätöksiä sekoittumisesta. Happinäytteitä otettiin Syvänteeltä 18.4., 24.4., 28.4. ja 2.5. Rutalahdesta ja Ristinselän keskeltä näytteet otettiin 18.4. Lahtilinjalta happinäytteet otettiin Lahti 10- ja Lahti 40-paikoista samoina päivinä kuin Syvänteeltäkin. Purolinjan paikoista Puro 10 ja Puro 40 näytteet otettiin 18.4., 24.4. ja 28.4. Kustakin paikasta happinäytteet otettiin happipulloon siten, että ensimmäinen näyte otettiin metrin syvyydeltä, seuraava 5 metrin syvyydeltä ja seuraavat aina 5 metrin syvyysvälein. Näytteenotossa käytettiin Limnos-näytteenotinta. Näytteet kuljetettiin laboratorioon kylmälaukussa jäärouheeseen upotettuina. Veteen liunneen hapen määrittäminen tehtiin standardin SFS 3040 mukaisesti. Määrittäminen tapahtui

joko Jyväskylän yliopiston Bio- ja ympäristötieteen laitoksella tai Helsingin yliopiston Lammin biologisella asemalla.

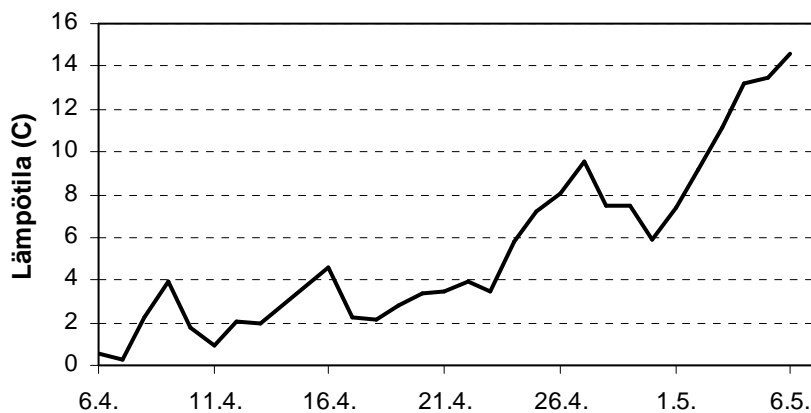
Säätiedot mittausjakson ajalta saatiin Jyväskylällä sijaitsevan Jyväskylän yliopiston AINO-lautan mittaustuloksista (www.paijanne.org/tulokset_lter.php). Lumen ja jään paksuutta mitattiin lämpötilamittausten yhteydessä mittakepillä, jonka asteikon tarkkuus oli yksi senttimetri.

3. TULOKSET

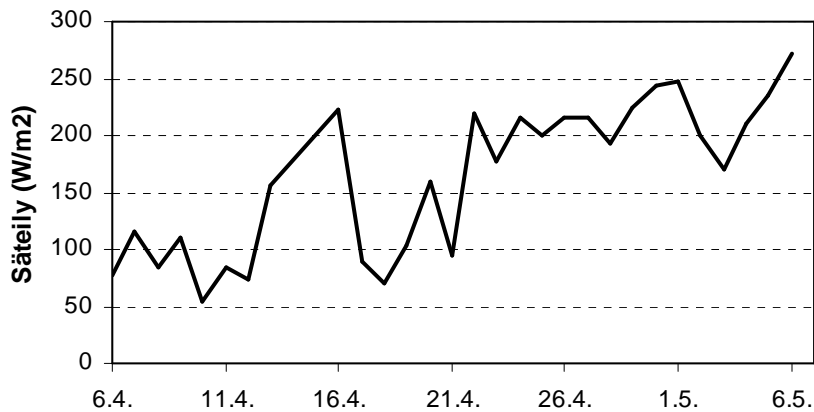
3.1. Säätiedot ja lumen ja jään paksuudet

Jää ulottui rannasta Syvänteelle asti jo joulukuun lopussa 2005. Koko Ristinselän vesialue oli jäässä 27.1.2006, jolloin jään paksuus Syvänteellä oli noin 27 cm ja sen päällä oli 0-5 cm paksuinen lumikerros. Rutalahdessa jäätä oli tällöin 37 cm, kun taas Ristinselän keskellä jään paksuus oli vasta 18 cm. Ennen kevään mittausjakson aloittamista 11.4. jään paksuus oli Syvänteellä 50 cm, ja jään päällä oli 8 cm paksu sohjokerros. 18.4. lunta oli vielä jonkin verran jään päällä. Samaan aikaan jään paksuus oli Rutalahdessa 50 cm ja Ristinselän keskellä 36 cm. 24.4. lunta ei enää ollut jään päällä. Jään paksuus Syvänteellä oli tällöin 44 cm, kun taas lähempänä rantaa jää oli 3-4 cm tätä ohuempaa.

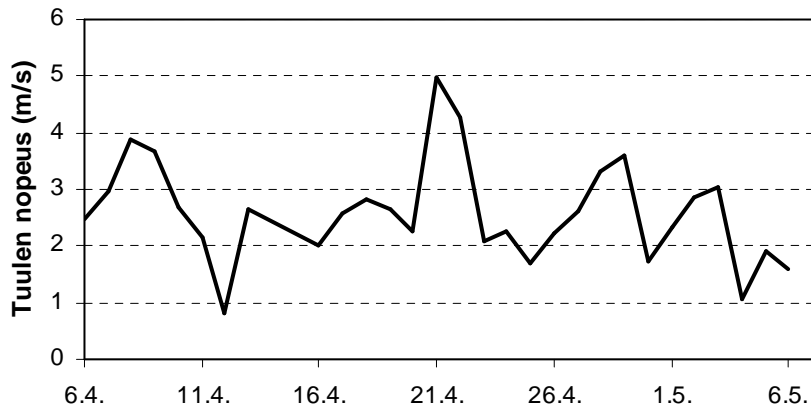
Ilman lämpötilan vuorokausikeskiarvot nousivat nollan yläpuolelle huhtikuun alussa. Tämän jälkeen lämpötila kohosi siten, että 3.5. lämpötila oli jo yli 10 °C (Kuva 3). Auringon säteily lisääntyi melko tasaisesti tammikuun alusta maaliskuun loppupuolelle (26.3.) asti, minkä jälkeen säteily oli kahden viikon ajan hieman vähäisempää. Huhtikuussa ja toukokuun alussa säteilyarvot olivat useina päivinä yli 200 W/m², mutta muutamana päivänä vain alle 100 W/m² (Kuva 4). Keskimääräinen tuulen nopeus 6.4.-6.5. oli Jyväskylällä 2,6 m/s (Kuva 5). Mittausjakson sateisin päivä oli 10.4., jolloin sademääräksi mitattiin noin 7,4 mm Jyväskylällä Ristinselältä noin 21 kilometriä pohjoiseen. Vähän sadetta (alle 3mm/vrk) tuli myös 6.4., 11.4. ja 18.-21.4.



Kuva 3. Ilman lämpötilan vuorokausikeskiarvot Jyväsjärven Aino-lautalla 6.4.–6.5.2006 (www.paijanne.org/tulokset_lter.php).



Kuva 4. Tulevan auringonsäteilyn vuorokausikeskiarvot Jyväsjärven Aino-lautalla 6.4.–6.5.2006 (www.paijanne.org/tulokset_lter.php).



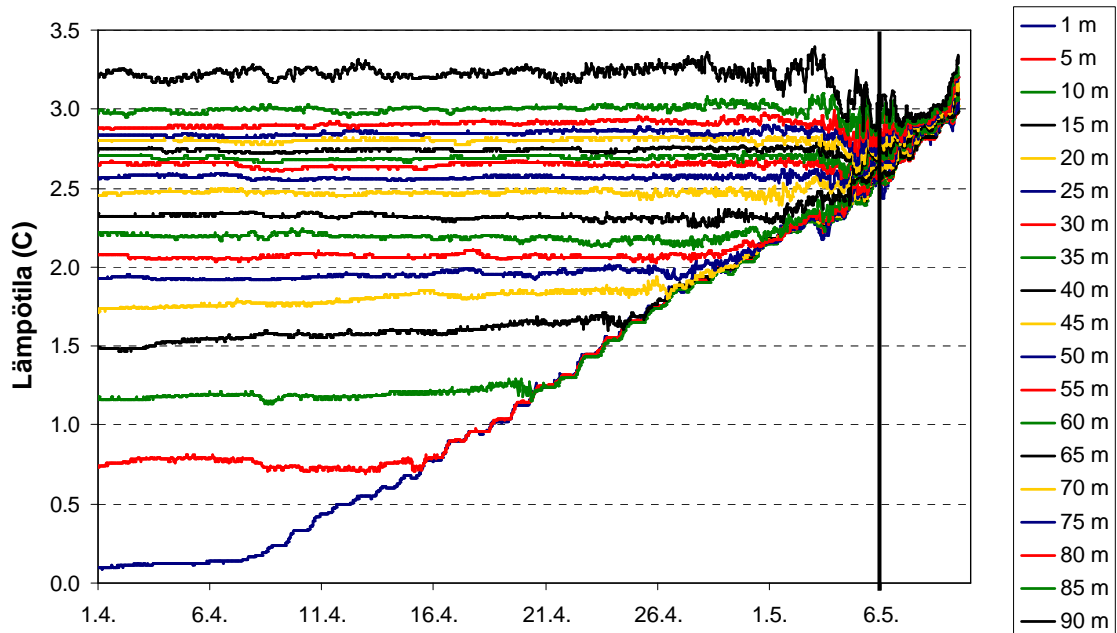
Kuva 5. Tuulen nopeuden vuorokausikeskiarvot Jyväsjärven Aino-lautalla 6.4.–6.5.2006 (www.paijanne.org/tulokset_lter.php).

3.2. Lämpötila-anturien tulokset

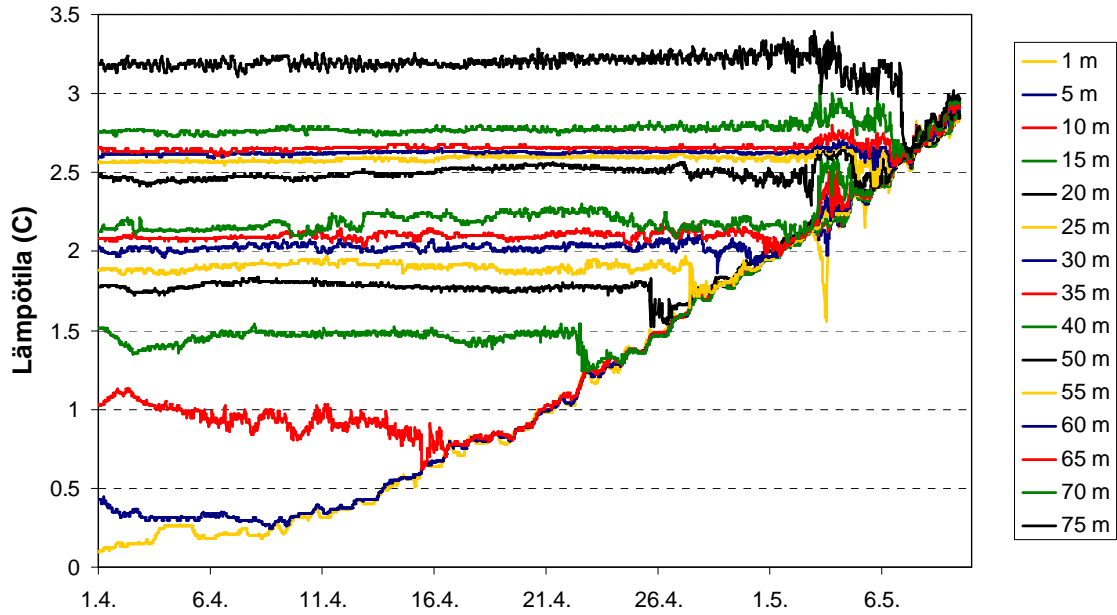
Talven aikana mittauspaikoissa lämpötila oli käänteisesti jakautunut eli korkein pohjan lähellä ja alhaisin pinnassa jään alla. Syvänteellä 90 metrin syvyydessä ja Ristinselän keskellä 75 metrin syvyydessä lämpötila oli huhtikuun alussa noin 3,3 °C, kun taas Rutalahdessa 75 metrin syvyydessä lämpötila oli vain 2,9 °C. Lämpötilat pysyivät keskitalvella vakaina, mutta myöhemmin kevään edetessä tapahtui huomattavaa lämpenemistä ensin pinnanläheisissä kerroksissa ja myöhemmin syvemmillä. Lämpeneminen alkoi ensin Ristinselän keskellä, myöhemmin Rutalahdessa ja viimeisenä Syvänteellä. Syvänteellä lämpeneminen alkoi metrin syvyydessä noin 7.4. Viiden metrin syvyydessä lämpeneminen näkyi vasta 15.4. ja 10 metrin syvyydessä 20.4. (Kuvat 6, 7, 8 ja 10).

Lämpenevissä vesikerroksissa esiintyi selkeää vuorokausivaihtelua, joka näkyi lämpötilan portaittaisena kohoamisena ajan suhteen kaikissa kolmessa mittauspaikassa (Kuvat 6, 7, 8 ja 9). Tämä vaihtelu oli selkeintä lähimpänä pintaa olevissa kerroksissa ja lämpenemisjakson alkuvaiheessa. Lämpötila kohosi päivän aikana ja pysyi samana tai jopa

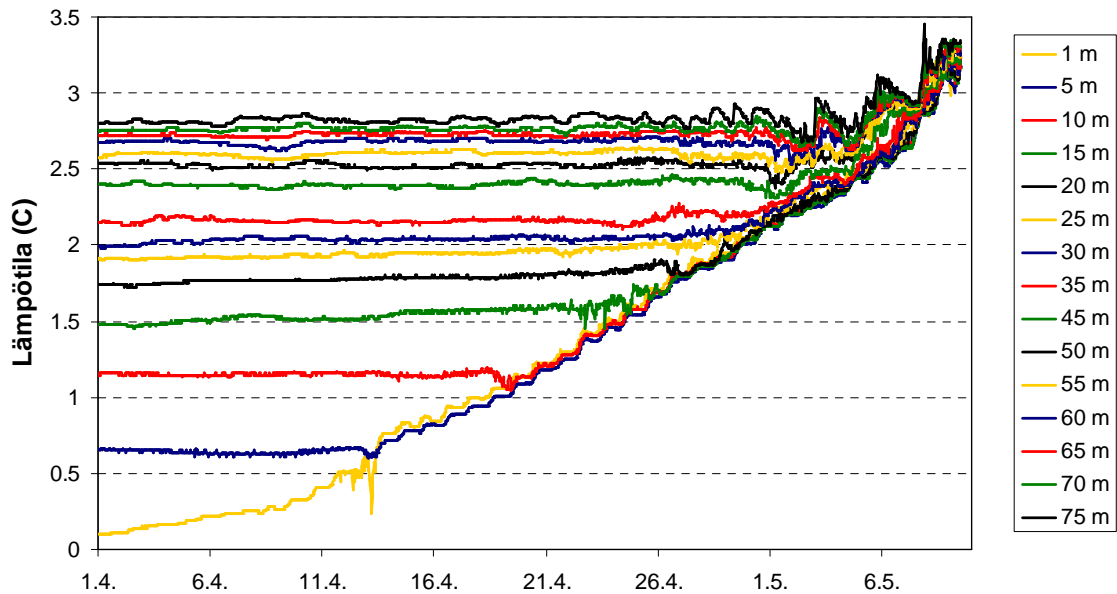
aleni yön aikana. Vaikka lämpötila pieneni toisinaan öisin, se ei ylittänyt auringon säteilyä johtuvaa lämpötilan nousua päivisin, ja usean päivän jaksolla tarkasteltuna vesikerrokset lämpenivät selvästi. Syvänteellä öisin tapahtuvaa lämpötilojen pienenemistä ei lämpenemisjakson alkupuolella tapahtunut ollenkaan ja myös Rutalahdessa se oli selvästi vähäisempää kuin Ristinselän keskellä (Kuvat 6, 7 ja 8, syvyydet 1, 5 ja 10 m). Myöhemmin keväällä havaittiin kuitenkin lämpötilojen laskua öisin myös Syvänteellä, mikä johtunee ajan myötä lisääntyvästä sekoittumisesta tai jään sulamisesta.



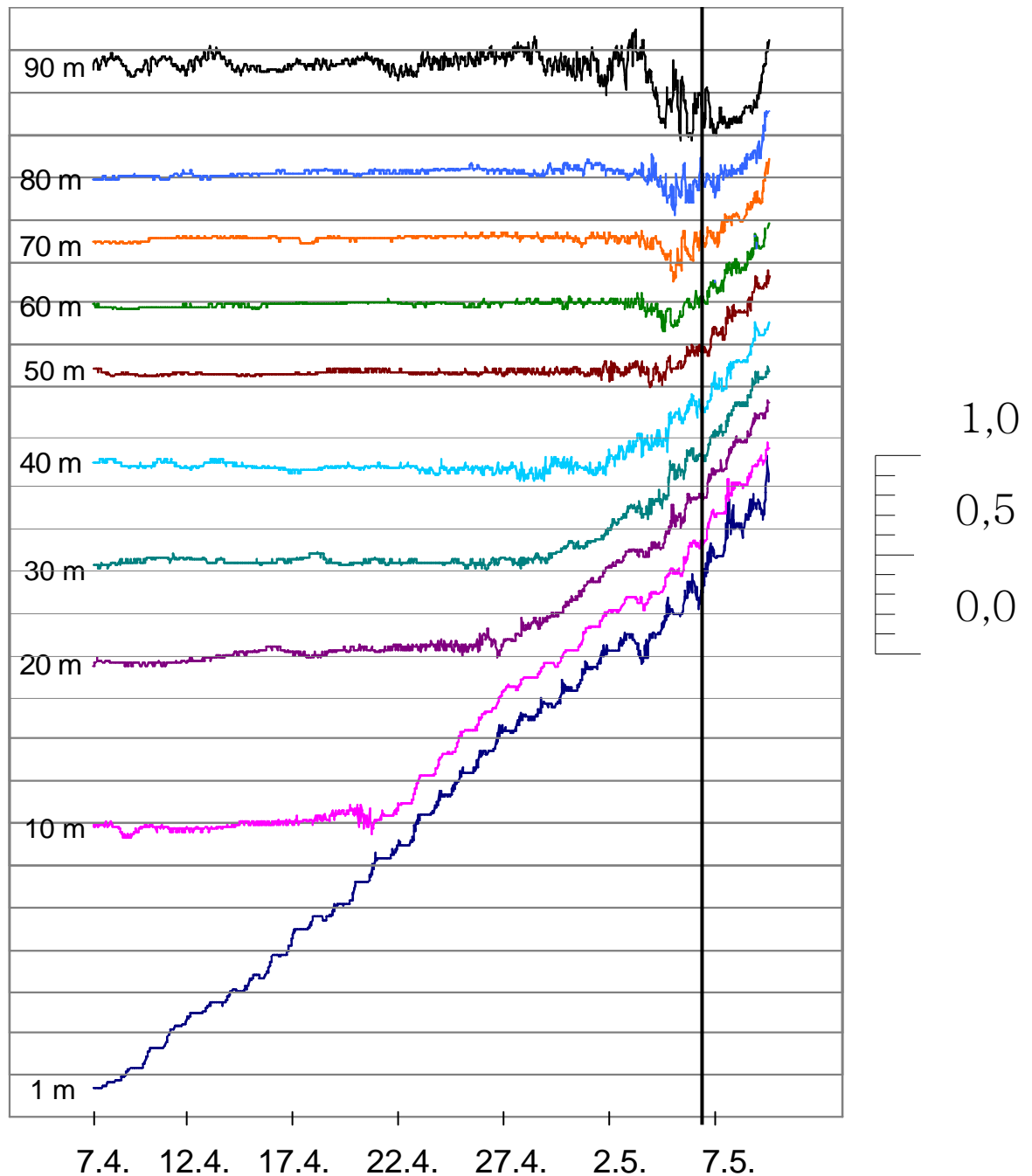
Kuva 6. Anturiketjun mitaamat lämpötilat Syvänteellä 6.4.–8.5.2006. Kuvan vasemmassa reunassa lämpötilakäyrät ovat syvyysjärjestyksessä (alin 1 m ja ylin 90 m). Pystyviiva osoittaa arvioitua jäidenlähtöpäivää.



Kuva 7. Anturiketjun mitaamat lämpötilat Ristinselän keskellä 6.4.–8.5.2006. Kuvan vasemmassa reunassa lämpötilakäyrät ovat syvyysjärjestyksessä (alin 1 m ja ylin 75 m).

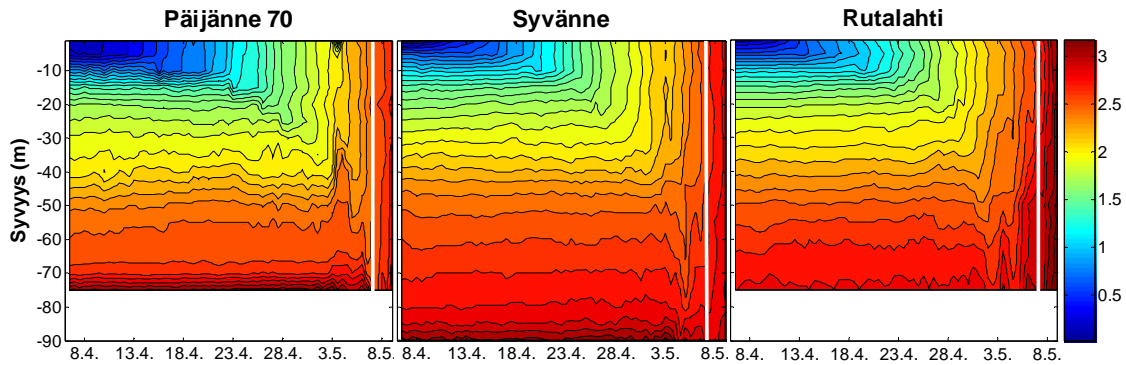


Kuva 8. Anturiketjun mitaamat lämpötilat Rutalahdessa 6.4.–8.5.2006. Kuvan vasemmassa reunassa lämpötilakäyrät ovat syvyysjärjestyksessä (alin 1 m ja ylin 75 m).



Kuva 9. Anturiketjun mitaamat lämpötilat (°C) Syvänteellä 7.4.–8.5.2006. Jokaista käyrää on kohotettu edelliseen käyrään verrattuna selkeyden saavuttamiseksi. Lämpötilan mittakaava on esitetty oikealla ja kuvan pystyviiva kuvaa arvioitua jäidenlähtöpäivää 6.5.

Syvänteellä metrin syvyydessä lämpötila kohosi tasaisesti 7.4. alkaen aina jäiden lähtöön asti (Kuvat 6, 9 ja 10). Tätä syvemmissä kerroksissa lämpeneminen alkoi aina ylempiä kerroksia myöhemmin eli silloin kun yläpuolinen vesimassa saavutti näiden kerrosten aiemman (talvenaikaisen) lämpötilan. Toisin sanoen pystysuuntaisen konvektion (luku 1) aiheuttama sekoittuva kerros eteni vähitellen syvemmälle ja samalla jatkuvasti lämpeni.

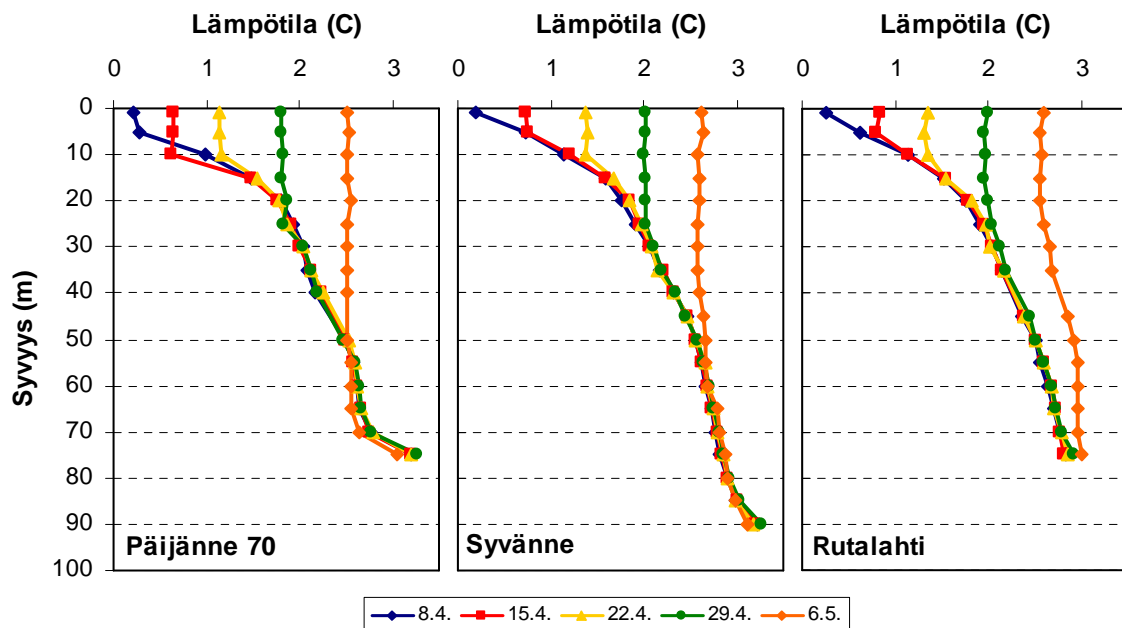


Kuva 10. Jäiden lähtöä edeltävän kuukauden (6.4.-8.5.2006) lämpötilan tasa-arvokäyrät Syvänteellä, Ristinselän keskellä ja Rutalahdessa. Käyrät on tehty lineaarisella interpoloinnilla metrin syvyysvälein ja 12 tunnin aikavälein. Värit kuvaavat lämpötilaa (°C), jonka skaala on oikealla. Valkoinen pystyviiva kuvaa arvioitua jäidenlähtöpäivää 6.5.

Syvänteellä konvektiokierrossa oleva sekoittuva kerros eteni jatkuvasti syvemmälle. 15.4. se ulottui lämpötila-anturien tulosten perusteella (Kuva 11) ainakin viiden metrin syvyyteen, 22.4. 10 metrin syvyyteen ja 6.5., eli jäiden lähtiessä, 60 metrin syvyyteen. Vesipatsas oli jo seuraavana päivänä jäiden lähdön jälkeen täyskierrossa pohjaan asti. Ristinselän keskellä konvektiokierto alkoi aiemmin kuin Syvänteellä ja ulottui myöhemminkin syvemmälle (Kuvat 10 ja 11). Ristinselän keskellä 6.5. sekoittuva kerros näytti ulottuvan jo 65 metrin syvyyteen asti. Rutalahdessa konvektio alkoi samaan aikaan kuin Syvänteelläkin, mutta näytti etenevän loppukeväästä tätä syvemmälle. Sekoittuvassa kerroksessa näytti myös olevan taipumusta lämmitä syvimpiä kerroksia kohti, mikä viittaa lämpimän pohjavirtauksen olemassaoloon. 6.5. sekoittuva kerros ulottui Rutalahdessa jo 75 metrin syvyyteen eli pohjaan asti, ja pohjan lähellä oli myös tapahtunut lämpenemistä verrattuna aikaisempiin mittauksiin. (Kuva 11).

Ristinselän keskellä vesikerroksen lämpenemisjakson alkua edelsi monissa kerroksissa äkillinen viileneminen (Kuva 7 ja 10). Esimerkiksi 15 metrin syvyydessä vesi viileni 22.4. muutaman iltapäivän tunnin aikana 0,25 °C ja alkoi seuraavana aamuna lämmitä. Viileneminen havaittiin selvimmin 10-35 metrin syvyyksillä. Syvänteellä ja Rutalahdessa yhtä voimakasta lämpenemisjakson alkuun liittyvää viilenemistä ei havaittu vastaavilla syvyyksillä (Kuva 10).

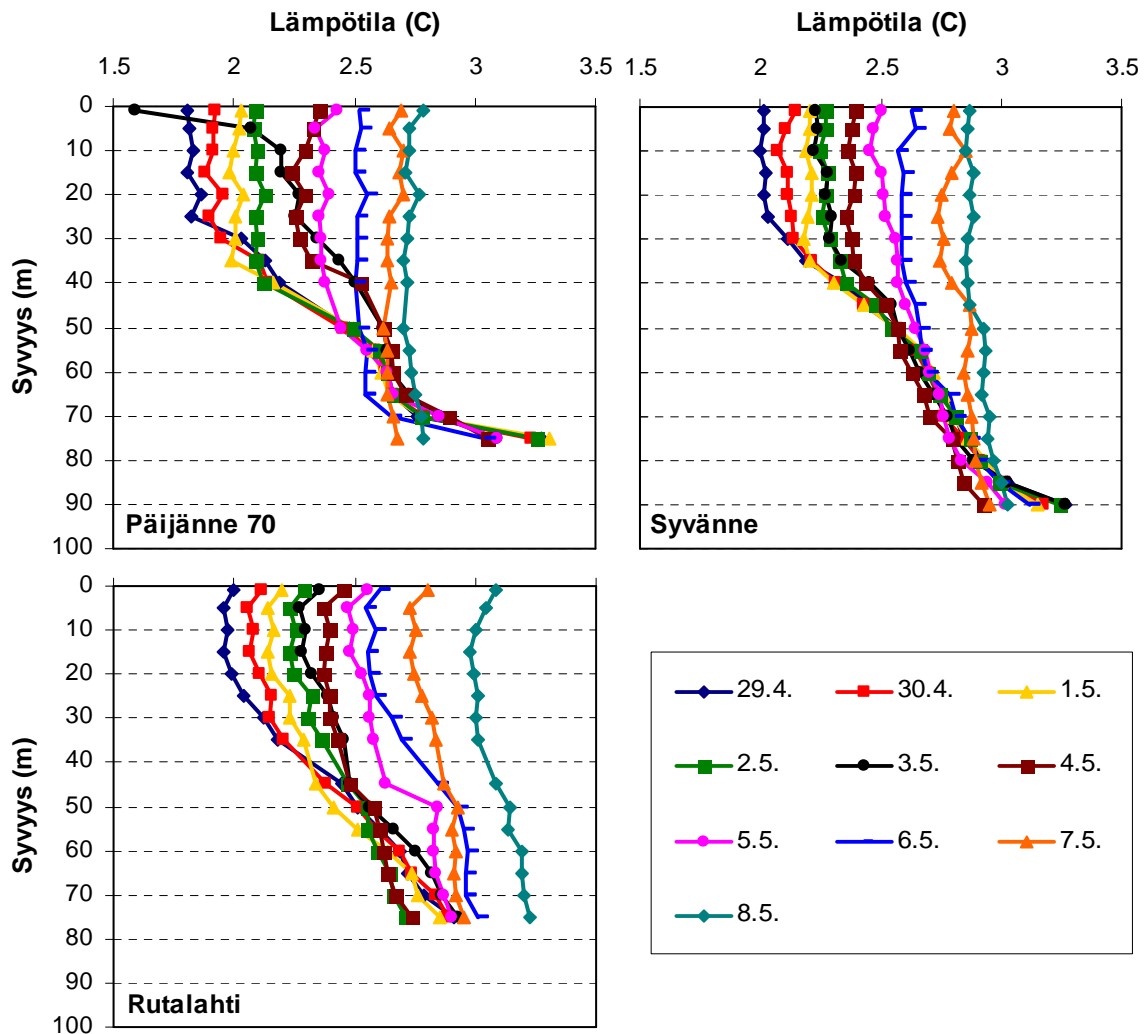
Myös syvissä kerroksissa tapahtui viilenemistä muutamaa päivää ennen jäiden lähtöä. Syvänteellä vesi viileni vuorokauden aikana (3.5.-4.5.) kaikilla syvyyksillä 50 metrin alapuolella, erityisesti pohjan lähellä (Kuva 12). 90 metrin syvyydellä viilenemistä tapahtui tällöin 0,3 °C ja 85 metrin syvyydessä 0,2 °C. Samaan aikaan pinnan läheisissä kerroksissa vesi lämpeni edelleen ja koko syvyydellä tilanne kehittyi siis kohti tasalämpöistä vesipatsasta. Samanlainen äkillinen syvien kerrosten viileneminen havaittiin myös Rutalahdessa. Ristinselän keskellä tällaista viilenemistä ei havaittu. (Kuva 12). Kaikissa kolmessa anturimittauspaikassa havaittiin myös pienemmän aikamittakaavan vaihtelua pohjan lähellä. Syvänteellä ja Ristinselän keskellä heilahtelu tapahtui hyvin lyhyissä jaksoissa ja heilahtelujen lämpötilaerot kasvoivat selvästi jäiden lähtöä kohti. (Kuvat 6 ja 7).



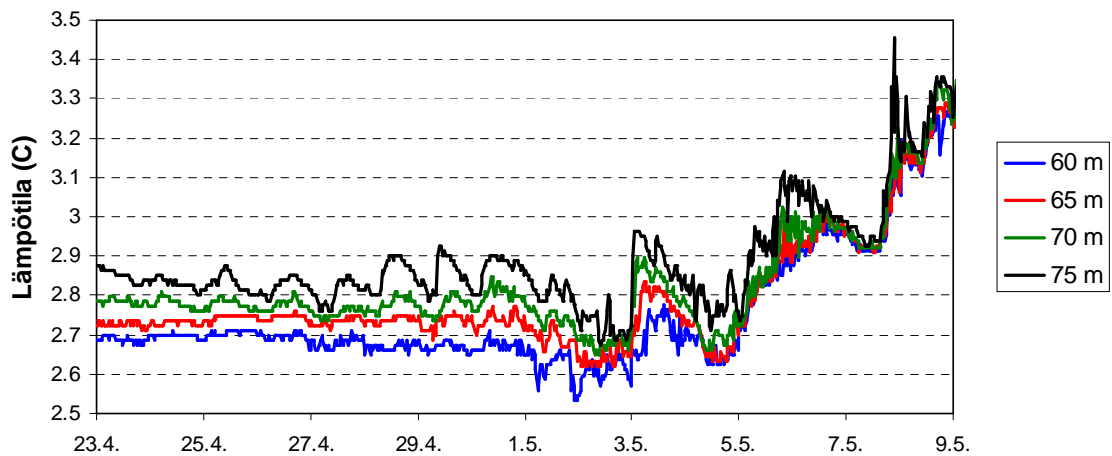
Kuva 11. Anturiketjujen mitaamat lämpötilat Ristinselän keskellä (Päijänne 70), Syvänteellä ja Rutalahdessa kello 12 viikon välein 8.4.–6.5.2006.

Rutalahdessa syvimmissä mittauskerroksissa 70 ja 75 metrin syvyyksillä havaittiin selkeä vuorokausivaihtelu, jossa päivän aikana lämpötila kohosi ja yön aikana pieneni (Kuva 13). Tällainen ilmiö toistui ainakin kolmen päivän ajan 26.–29.4. Samantyyppistä vaihtelua esiintyi pidemmälläkin jaksolla 24.4.–3.5., mutta kaikissa vaihteluissa lämpeneminen ei tapahtunut yhtä selkeästi valoisana aikana, vaan esimerkiksi loppuyön ja aamupäivän aikana. Pienemmän vaihtelun jälkeen aamuyöllä 3.5. lämpötila nousi pohjan lähellä 75 metrin syvyydessä Rutalahdessa terävästi (noin 0,3 C) ja myöhemmin viileni hitaasti. Samanaikainen yhtäkkinen lämpötilan nousu ja vähittäisempi lasku näkyy myös muissa syvissä kerroksissa 60–70 metrin syvyydellä (Kuva 13). Tämän heilahduksen jälkeen Rutalahdessa esiintyi toinen samanlainen, mutta hitaampi lämpeneminen ja viileneminen, jonka sisällä oli myös havaittavissa lyhyempiä heilahdusjaksoja.

Syvänteellä jäiden lähtöä edeltävällä viikolla 29.4.–6.5. lämpötilan jakaumat olivat samanlaisia eli vesipatsaan yläosassa havaittiin melko tasalämpöinen alue ja pohjan lähellä korkeampia lämpötiloja, koska sekoittuminen ei ulottunut pohjaan saakka. 7.-8.5. koko vesipatsas oli tasalämpöinen ja edellisiin päiviin verrattuna oli tapahtunut selkeää lämpenemistä kaikilla syvyyksillä. Vesipatsas oli tällöin siis täyskierrossa pohjaan saakka. Täyskierron alkaminen tapahtui todennäköisesti hyvin pian jäiden lähtemisen jälkeen, koska 5.5. näköhavaintojen mukaan jäidenlähtö oli hyvin lähellä ja todennäköisesti se tapahtuikin 6.5. Rutalahden ja Ristinselän keskiosan jäiden lähdöstä ei ole havaintoja. Rutalahdessa koko vesipatsas oli sekoittunut jo 6.5. ja myös lämmennyt edellisestä päivästä (Kuva 12). Lämpötilajakaumien vinoudesta 5.-8.5. (Kuva 12) päätellen lämpeneminen eteni Rutalahdessa syvimmissä kerroksissa nopeammin verrattuna yläpuoliseen vesimassaan. Syvänteellä ja vielä selvemmin Ristinselän keskellä lämpötilajakaumat olivat tällöin pystysuoria, eli koko vesipatsas oli lähes tasalämpöinen.



Kuva 12. Anturiketjun mitaamat lämpötilat Ristinselän keskellä (Päijänne 70), Syvänteellä ja Rutalahdessa päivittäin kello 12 29.4.–8.5.2006.



Kuva 13. Anturien mitaamat lämpötilat syvimmissä kerroksissa Rutalahdessa 23.4.–9.5.2006.

3.3. CTD-tulokset

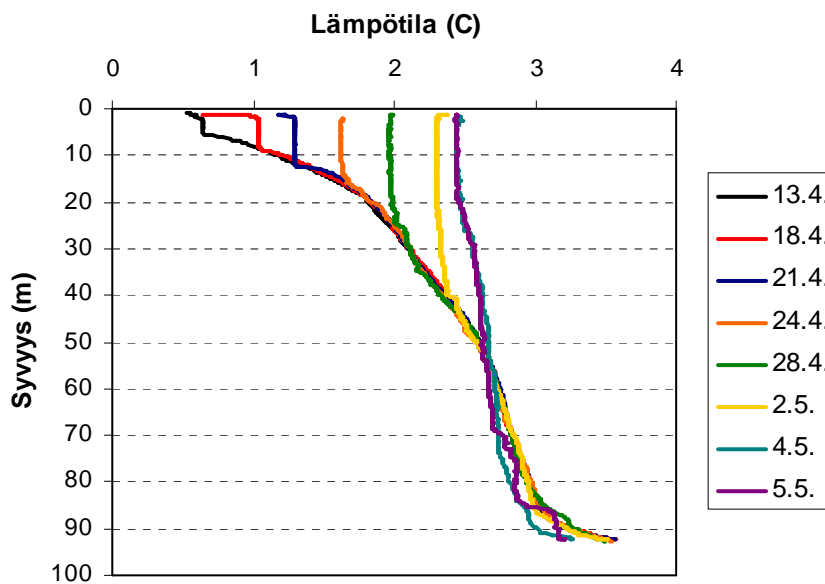
3.3.1. Syväne, Rutalahti ja Ristinselän keskiosa

CTD-luotaukset antoivat konvektion etenemisestä lisätietoa anturiketjujen tulosten lisäksi, koska anturit oli sijoitettu viiden metrin syvyysvälein ja luotauksissa lämpötilatiedot saatiin noin 0,1 metrin syvyysvälein. CTD-luotauksia pystyttiin kuitenkin tekemään vain joinakin päivinä mittausjaksolla.

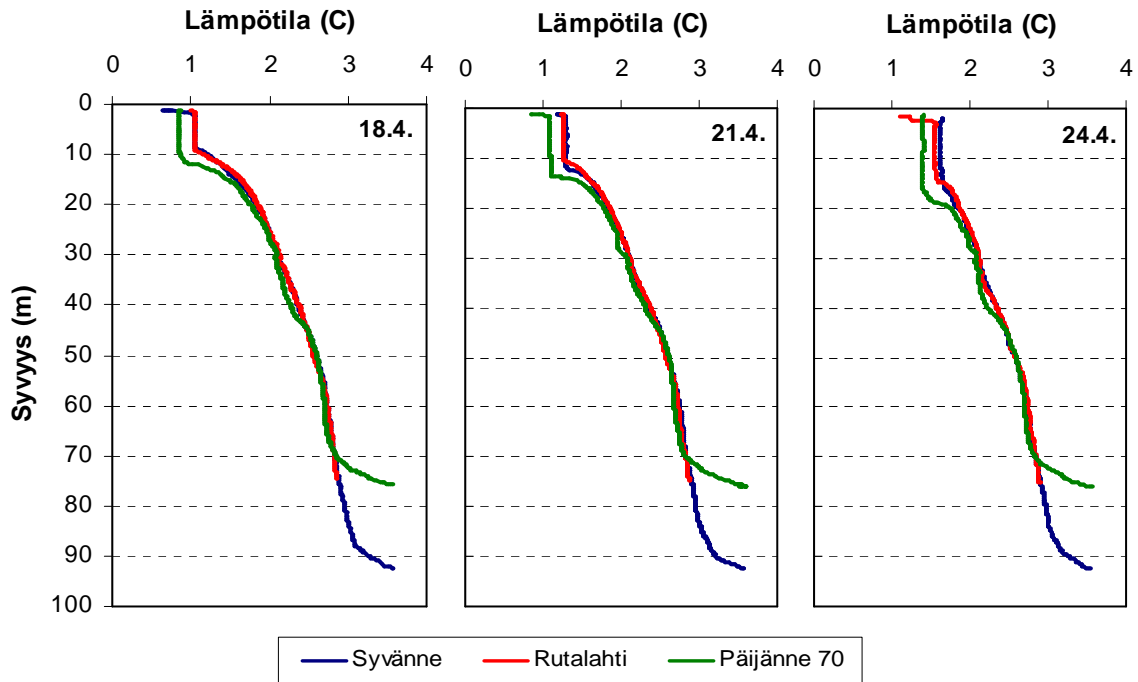
CTD-luotausten mukaan konvektion ulottumissyvyys kasvoi Syvänteellä ajan myötä (Kuva 14). 2.5. ja 4.5. välisenä aikana tapahtui lämpenemistä 55 metrin yläpuolella ja viilenemistä tätä syvemmällä, mikä edellä nähtiin myös lämpötila-anturien tuloksista. 4.5. lämpötiloissa ei ollut terävää eroa pinnan ja pohjan välillä, vaan pikemminkin koko jakauma oli hieman taipunut, eli lämpötila nousi vähitellen syvemmälle mentäessä. Pohjanläheinen lämpötila oli kuitenkin selvästi korkeampi kuin muussa vesipatsaassa, joten vesimassa ei ollut vielä täyskierrossa. 5.5. tehtyjen mittauksen perusteella konvektio näyttää ulottuneen tällöin noin 68 metriin. Tämän syvyyden alapuolella lämpötilajakaumassa oli kaksi selkeää porrasta. (Kuva 14).

Huhtikuun lopulla konvektio ulottui syvemmälle Ristinselän keskellä kuin Rutalahdella ja Syvänteellä (Kuva 15). Sekä anturimittauksen että CTD-luotausten perusteella konvektion piirissä oleva vesi oli Ristinselän keskellä kylmempää kuin kahdessa muussa paikassa (Kuvat 11 ja 15). Myös sekoittuvan kerroksen alapuolella oli alueita, joissa vesi oli viileämpää Ristinselän keskellä kuin muissa paikoissa.

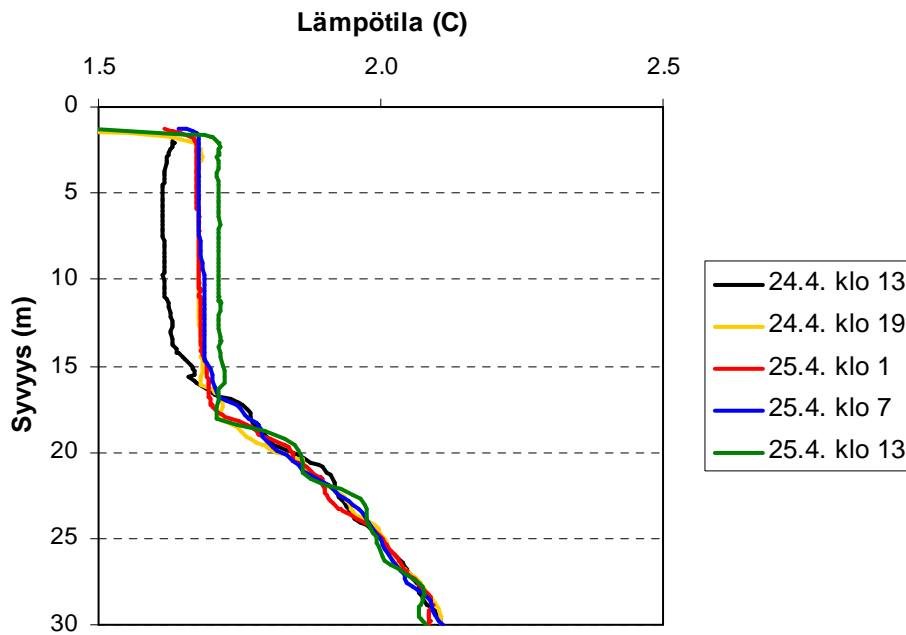
Rutalahdessa pohjanläheinen lämpötila oli kaikilla mittauskerroilla noin 0,7 °C alhaisempi kuin Syvänteellä ja Ristinselän keskellä, joissa lämpötila nousi nopeasti syvyyden suhteen noin viiden metrin etäisyydellä pohjasta (Kuva 15). Myös tämä havaittiin sekä anturien että CTD-luotausten tuloksista. Rutalahdessa lämpimämmän veden aluetta pohjan lähellä ei havaittu, koska paikka sijaitsee rinteessä eikä pohjaa pitkin virtaava lämpimämpi vesi kerääntynyt tällaiselle paikalle.



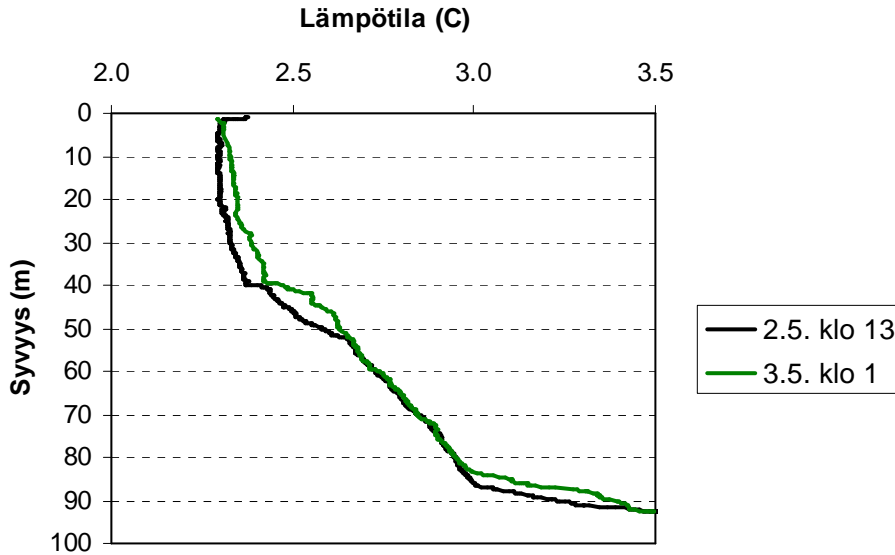
Kuva 14. Lämpötilan jakaumia Syvänteellä CTD:llä mitattuna keväällä 2006.



Kuva 15. CTD-luotaimella mitatut lämpötilajakaumat Syvänteellä, Rutalahdessa ja Ristinselän keskellä 18.4., 21.4. ja 24.4.2006.



Kuva 16. Lämpötilan jakaumia Syvänteellä CTD:llä mitattuna 24.–25.4.2006 ylimmissä kerroksissa 0–30 metrin syvyydellä.



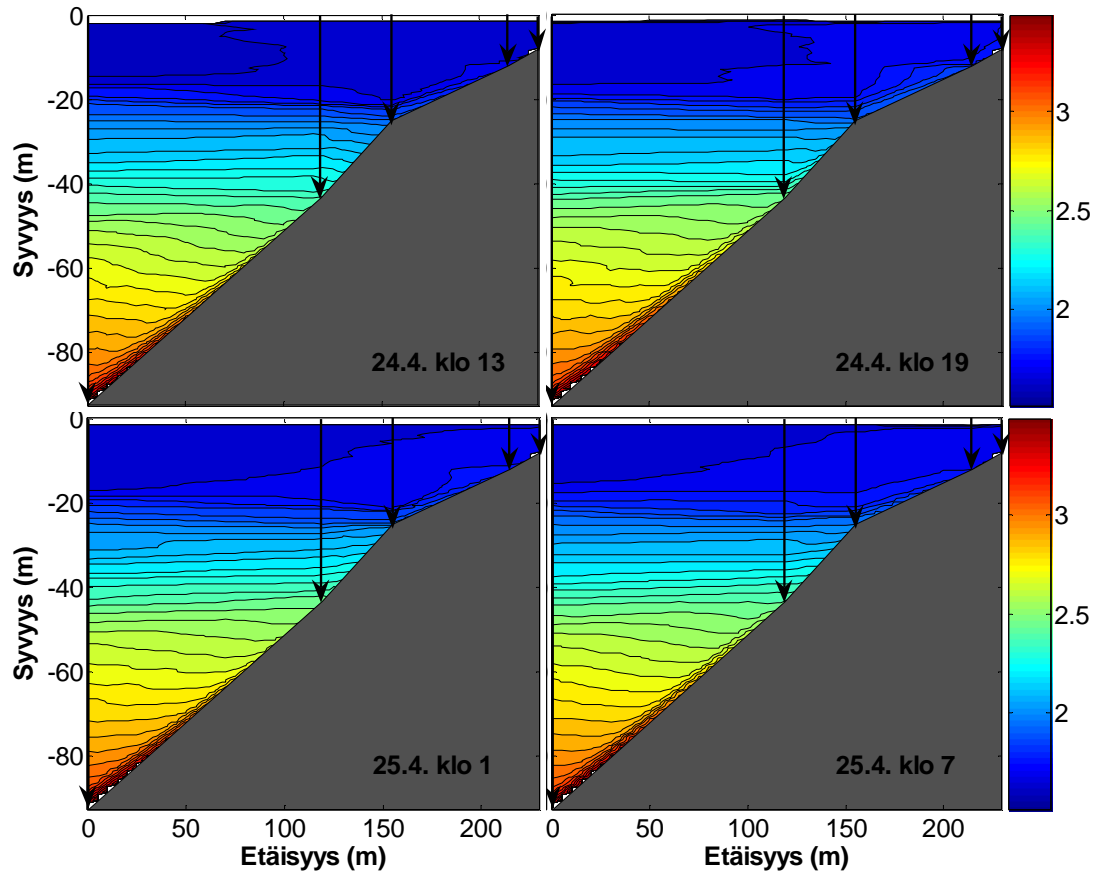
Kuva 17. Lämpötilan jakaumia Syvänteellä CTD:llä mitattuna 2.-3.5.2006.

Syvänteellä tehtiin CTD-luotauksia kuuden tunnin välein 24.–25.5. ja 2.-3.5. Konvektiokierron vaikutusalueella eli 0-16 metrin syvyydessä tapahtui lämpenemistä 24.4. kello 13 ja kello 19 mittausten välillä. Yön aikana lämpötilat eivät muuttuneet. Seuraavana päivänä 25.5. kello 7 ja kello 13 mittausten välillä lämpötila kohosi jälleen sekoittuvassa kerroksessa, joka kello 13 ulottui jo 18 metrin syvyyteen saakka. 25.4. kello 13 lämpötila näytti myös sekoittuvan kerroksen alapuolella nousevan aaltoilevasti tai portaittain syvyyden suhteen. Samantyyppistä taipumusta portaittaisuuteen havaittiin hieman myös muissa mittauksissa, esimerkiksi 24.4. kello 19. Sekoittuvan kerroksen alapuolella lämpötiloissa tapahtui kuitenkin hyvin vähän muutoksia eri mittausten välillä. 24.4. kello 13 lämpötilan jakauma sekoittuvan kerroksen alueella taipui hieman lämpimämpään suuntaan alaosastaan, kun taas muissa mittauksissa sekoittuva kerros oli lähes tasalämpöinen. (Kuva 16).

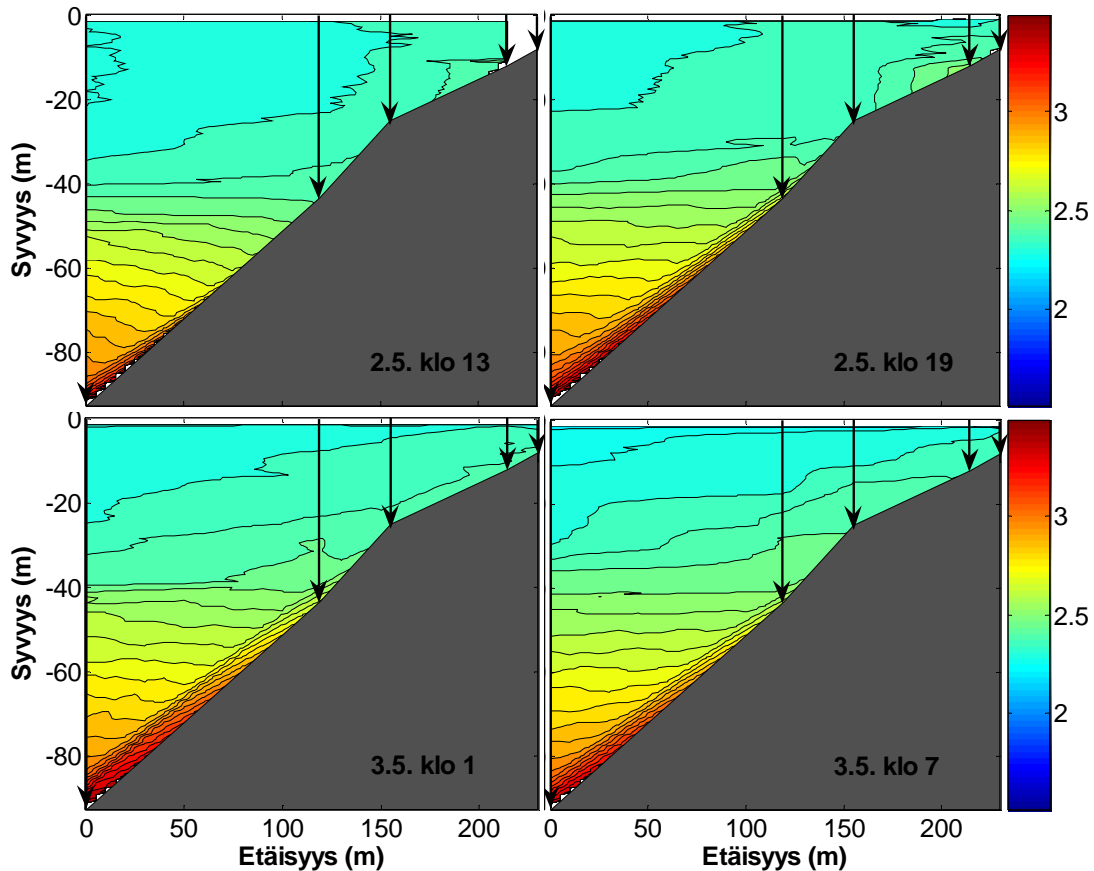
2.-3.5. tapahtui lämpenemistä kello 13 ja kello 1 välillä sekoittuvassa kerroksessa eli 0-40 metrin syvyydellä. Myös tämän alapuolella noin 40–50 metrin syvyydellä ja lisäksi pohjan lähellä 80–90 metrin syvyydellä tapahtui lämpenemistä. Mittauksessa kello 1 havaittiin myös hieman porrasmaisuutta. (Kuva 17).

3.3.2. Lahtilinja

Lahtilinjalla lämpötila oli käänteisesti jakautunut Syvänteellä ja lisäksi 40 ja 20 metrin syvyyksissä paikoissa mittausjakson alkupuolella (Kuva 18). 20 metriä syvä paikka oli pohjaan saakka tasalämpöinen jo 28.4. ja 40 metriä syvä paikka 2.5. Tällöin siis koko vesipatsas oli kierrossa pohjaan asti. Syvänteellä vesipatsas tuli tasalämpöiseksi vasta jäiden lähdön aikaan. Matalien ja syvien alueiden välillä havaittiin joitakin lämpötilaeroja, jotka viittaavat myös vaakasuuntaiseen sekoittumiseen.



Kuva 18. Lämpötilan ($^{\circ}\text{C}$) tasa-arvokäyrät Lahtilinjalla 24.-25.4.2006. Tasa-arvokäyrät ovat $0,05^{\circ}\text{C}$ välein (väriskaala oikealla). Interpolointi on tehty syvyysuunnassa $0,5$ metrin välein ja pituussuunnassa viiden metrin välein. Pystysuuntaiset nuolet kuvaavat luotauspaikkoja ja harmaa alue kuvaa pohjaa.



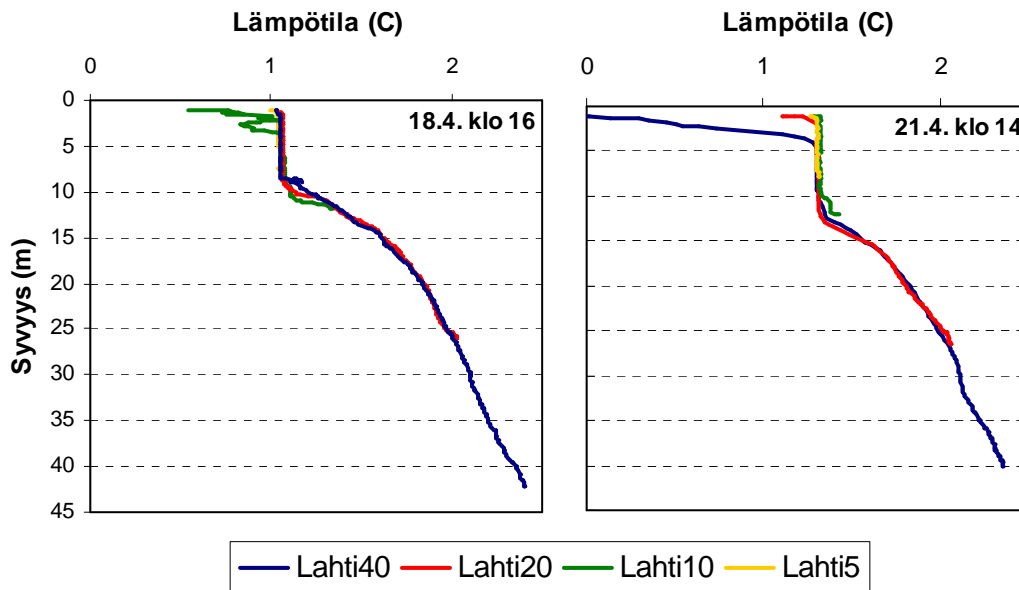
Kuva 19. Lämpötilan ($^{\circ}\text{C}$) tasa-arvokäyrät Lahtilinjalla 2.-3.5.2006. Tasa-arvokäyrät ovat $0,05^{\circ}\text{C}$ välein (väriskaala oikealla). Interpolointi on tehty syvyysuunnassa $0,5$ metrin välein ja pituussuunnassa viiden metrin välein. Pystysuuntaiset nuolet kuvaavat luotauspaikkoja ja harmaa alue kuvaa pohjaa.

Viiden metrin syvyisessä paikassa lämpötila oli melko tasainen pinnasta pohjaan kaikilla mittauskerroilla. Mittausten aikana 18.4.-5.5. lämpötila kohosi 1°C -asteesta $2,5^{\circ}\text{C}$ -asteeseen. Myös 10 metrin syvyisessä paikassa lämpötilat olivat melko tasaisia pinnasta pohjaan lukuun ottamatta mittausta 18.4., jolloin noin kolmen metrin syvyydellä oli kylmempää vettä kuin sen ylä- ja alapuolella. Lämpötila kohosi tässä paikassa suunnilleen samaan tahtiin kuin viiden metrin paikassakin. 20 ja 40 metriä syvissä paikoissa päällysveden lämpötila kehittyi samaan tahtiin kuin matalammissakin paikoissa. (Kuvat 18, 19, 20, 21 ja 22).

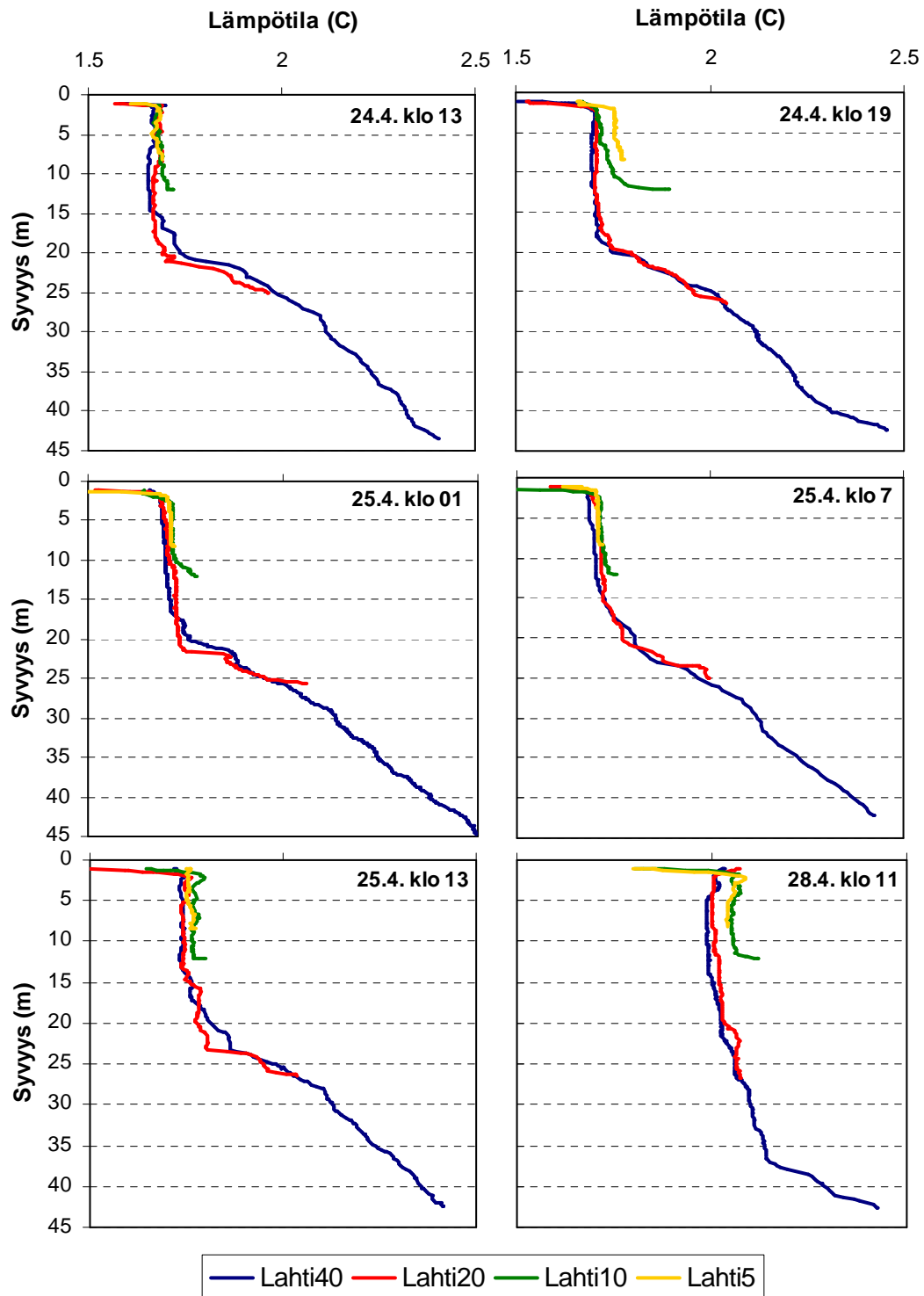
Matalimmissa, 10 ja viiden metrin paikoissa oli useina mittauskertoina lämpimämpää vettä kuin syvemmissä Lahtilinjan paikoissa (Kuvat 21 ja 22). Nämä lämpötilaerot tulivat merkittävämmäksi jäiden lähtöä lähestyttäessä, sillä vielä 18.4. ja 21.4. eroja ei havaittu lainkaan (Kuva 20). 10 metrin paikassa lämpötilat olivat tavallista korkeampia usein erityisesti pohjan lähellä, mutta loppukeväällä koko vesipatsas oli lämpimämpi verrattuna syvempiin paikkoihin. Lämpötilaerot olivat kuitenkin hyvin pieniä, enimmillään $0,1$ - $0,2^{\circ}\text{C}$. Joissakin mittauksissa myös 20 metriä syvässä paikassa havaittiin korkeampia lämpötiloja kuin 40 metrin paikassa. Tämä näkyi selvimmin 3.5. kello 7 (Kuva 22). Myös lämpötilamittauksista tehdyistä lämpötilan tasa-arvokuvista havaittiin, että rannan lähellä tasa-arvokäyrät viettivät

syvemmälle rannasta etäännyttäessä, mikä osaltaan kertoo lämpötilaeroista rannan ja ulapan välillä (Kuvat 18 ja 19).

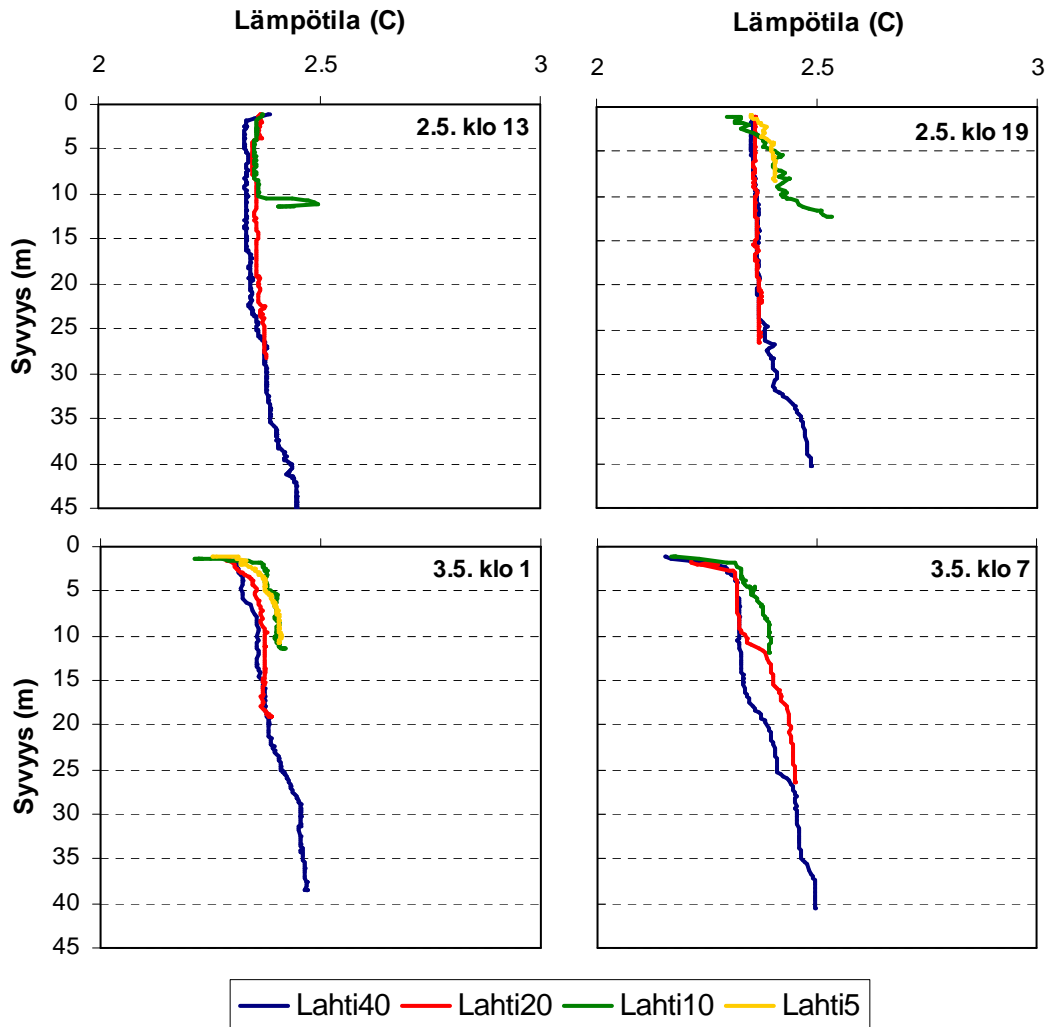
Syvänteellä sekoittuvan kerroksen lämpötila oli aikaisin keväällä sama kuin muissa Lahtilinjan paikoissa lähempänä rantaa, mutta 24.4. klo 13 ja 2.-3.5. hieman alhaisempi kuin muissa paikoissa. 2.5. koko linja lukuun ottamatta Syvänettä oli jo täyskierrossa.



Kuva 20. Lämpötilan jakaumat CTD:llä mitattuna Lahtilinjalla 18.4. ja 21.4.2006.



Kuva 21. Lämpötilan jakaumat CTD:llä mitattuna Lahtilinjalla 24.-25.4. ja 28.4.2006.

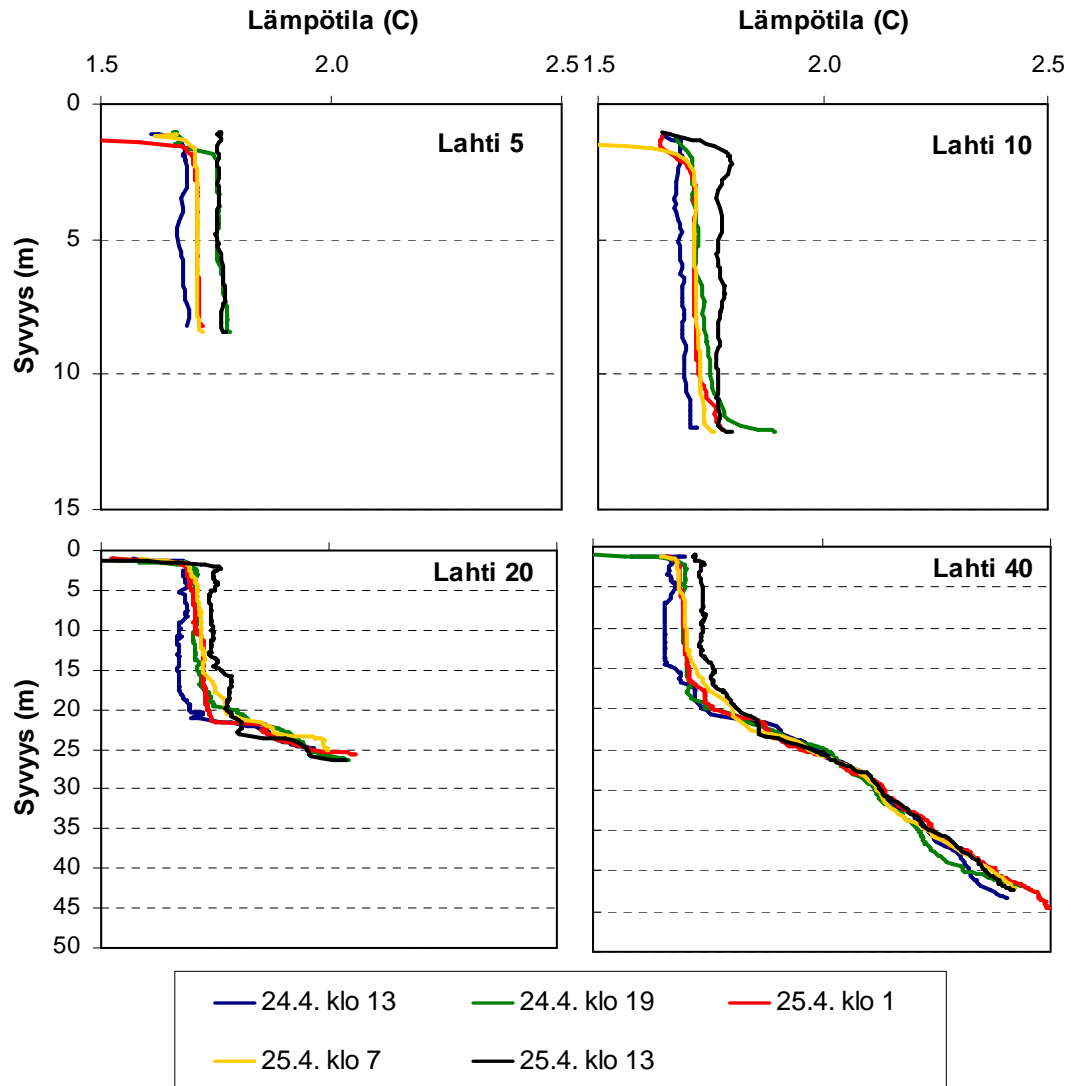


Kuva 22. Lämpötilan jakaumat CTD:llä mitattuna Lahtilinjalla 2.-3.5.2006.

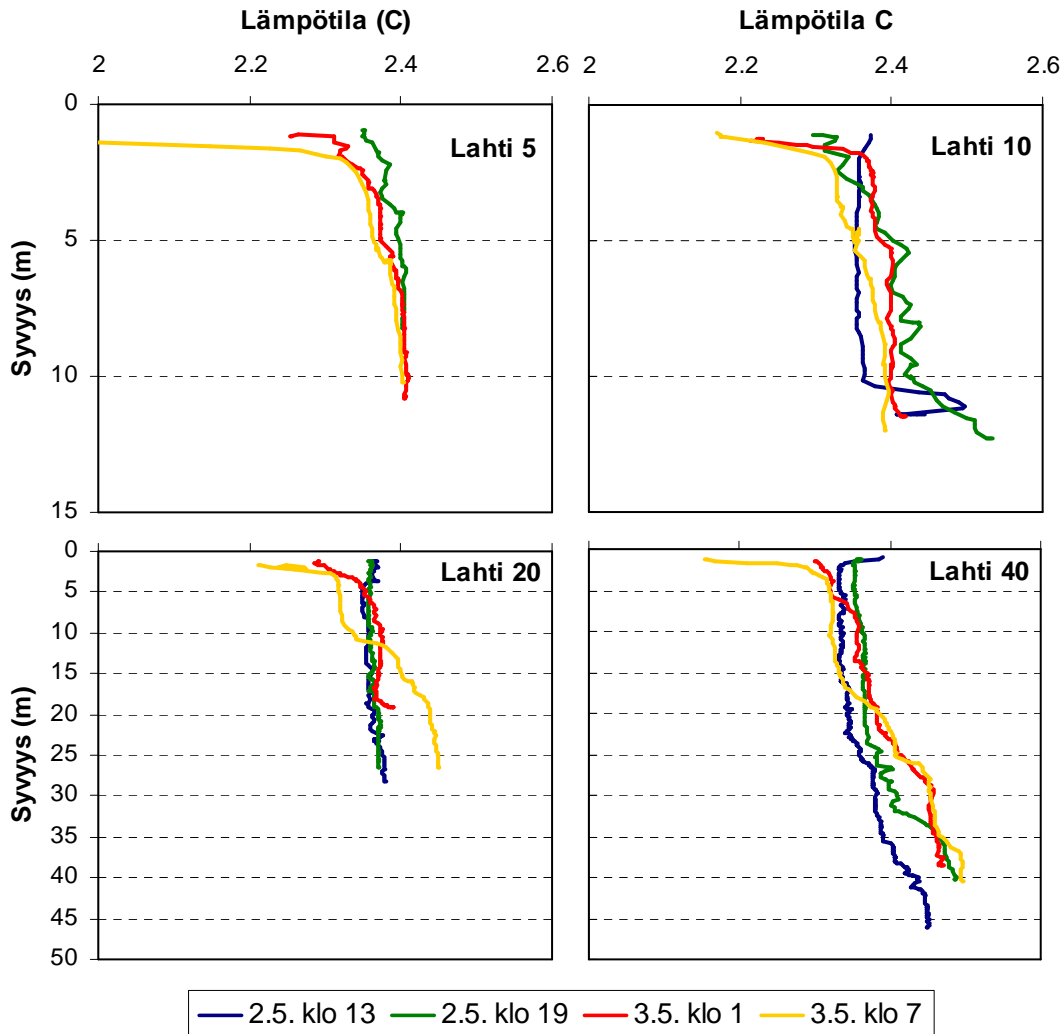
Lahtilinjalla tehtiin mittauksia kuuden tunnin välein 24.-25.4. ja 2.-3.5. Sekoittuvan kerroksen alueella havaittiin lämpenemistä valoisaan aikaan erityisesti 24.-25.4. Matalimmassa mittauspäikässä (5 m) lämpeneminen oli suurinta, ja siellä tapahtui myös viilenemistä yön aikana. (Kuva 23).

20 ja 40 metrin syvyisissä paikoissa havaittiin 24.-25.4. hieman samanlaista porrasmaisuutta lämpötilan jakaumissa kuin Syvänteelläkin. Tämä portaitaisuus esiintyi kaikissa paikoissa heti tasalämpöisen konvektiokerroksen alapuolella. (Kuva 21).

Myös 2.-3.5 havaittiin sekoittuvan vesikerroksen lämpenemistä päivän aikana ja viilenemistä yöllä. 20 ja 40 metrin syvyisissä paikoissa vesi lämpeni syvemmällä alueella illan ja yön aikana, ja lämpötilan jakaumat olivat alaosaan lämpimämpään suuntaan taipuneita, mikä jälleen viittaa pohjaa pitkin kulkevaan lämpimämpään virtaukseen. (Kuva 24).



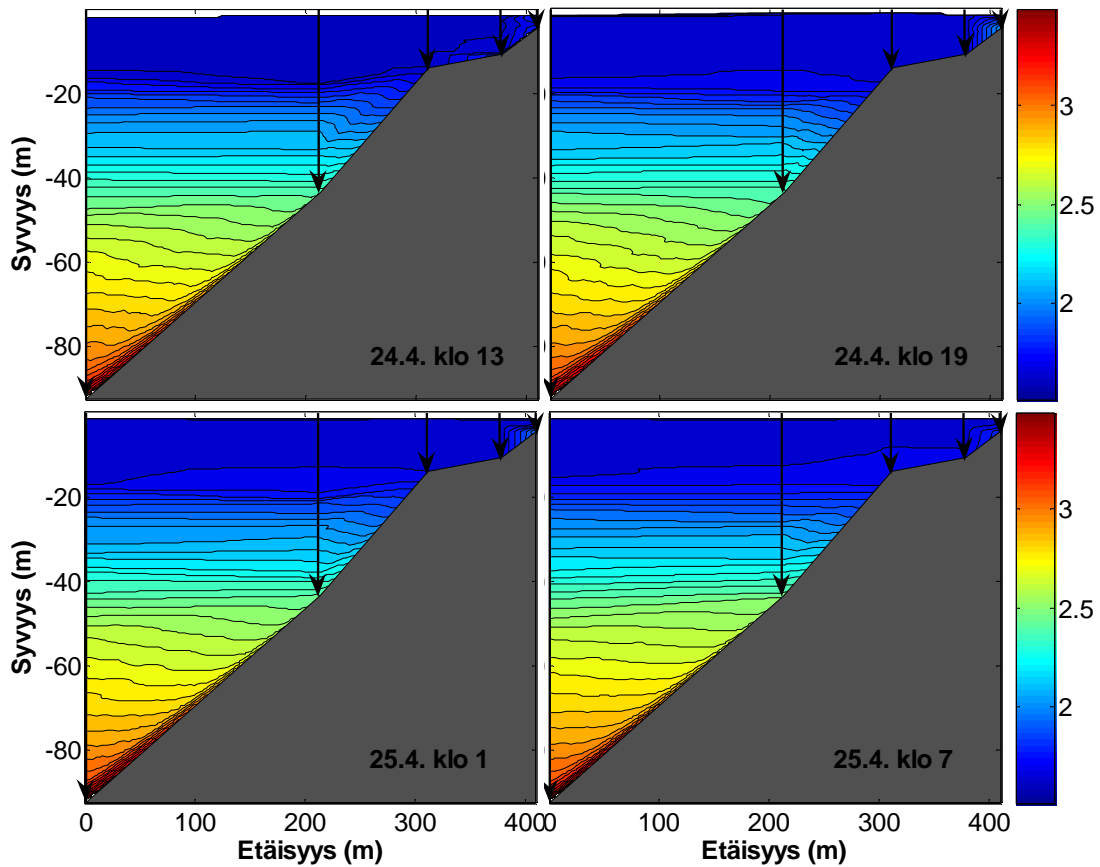
Kuva 23. Lämpötilan jakaumat CTD:llä mitattuna Lahtilinjalla 24.-25.4.2006.



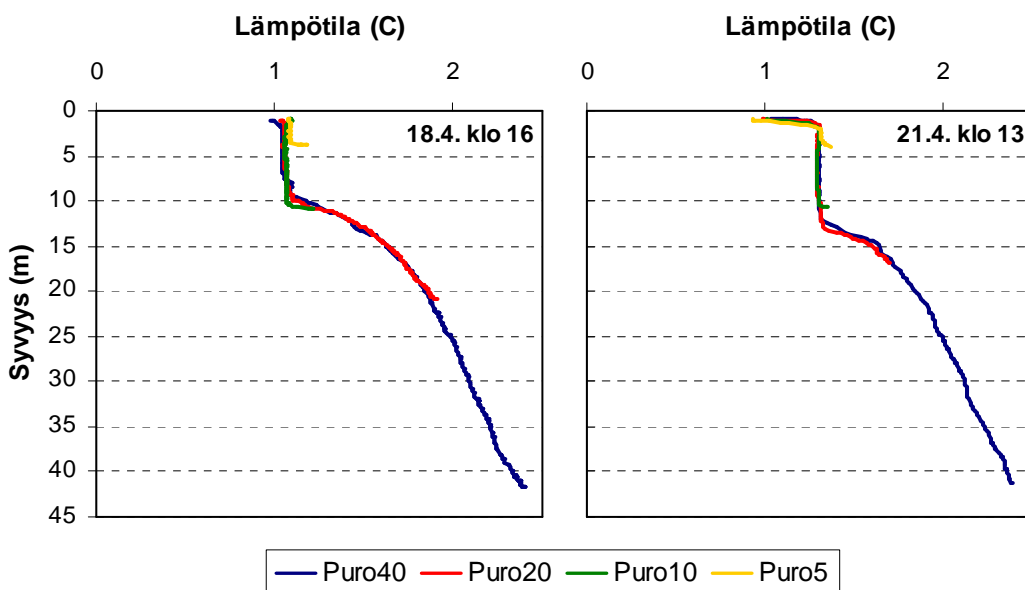
Kuva 24. Lämpötilan jakaumat CTD:llä mitattuna Lahtilinjalla 2.-3.5.2006.

3.3.3. Purolinja

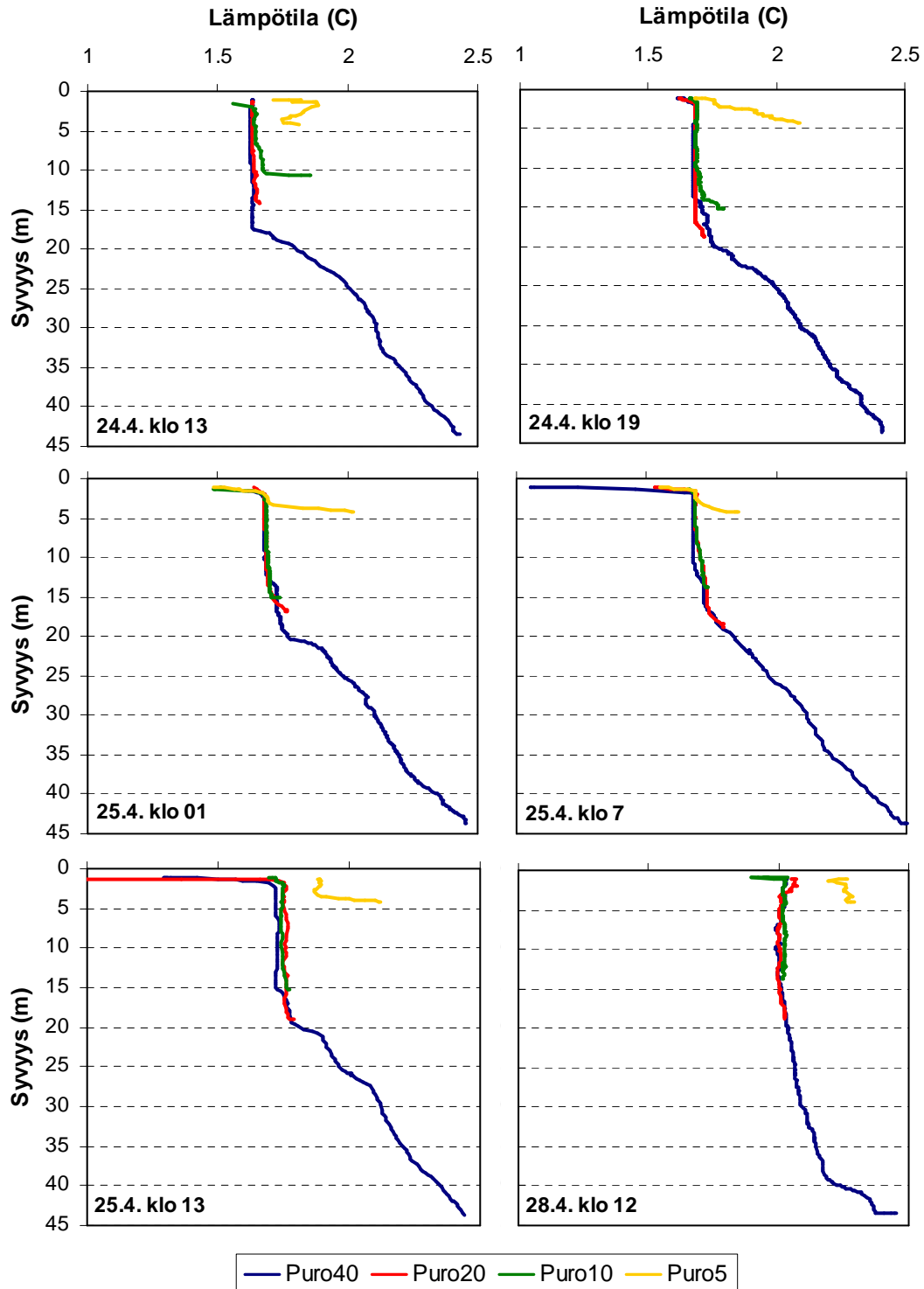
Purolinjalla 20 metrin syvyydessä paikassa lämpötila oli käänteisesti jakautunut vielä 21.4. ja 40 metrin syvyydessä paikassa ainakin vielä 25.4. (Kuva 25). Viimeisen mittauksen 28.4. mukaan 40 metrin syvyinen paikka oli lähes pohjaan saakka sekoittunut. Lämpeneminen tapahtui Purolinjalla samaan tapaan kuin Lahtilinjallakin. Merkittäviä lämpötilaeroja näiden linjojen välillä ei havaittu. Purolinjan matalammissa mittauspaikoissa havaittiin korkeampia lämpötiloja verrattuna syvempiin paikkoihin, samoin kuin Lahtilinjallakin. Nämä lämpimämmät alueet havaittiin useimmin pohjan lähellä 5 ja 10 metrin syvyyksissä mittauspaikoissa. (Kuva 26 ja 27). Osa Purolinjalla havaituista lämpötilaeroista oli hieman suurempia kuin Lahtilinjalla samaan aikaan havaitut lämpötilaerot.



Kuva 25. Lämpötilan ($^{\circ}\text{C}$) tasa-arvokäyrät Purolinjalla 24.-25.4.2006. Tasa-arvokäyrät ovat $0,05^{\circ}\text{C}$ välein (väriskaala oikealla). Interpolointi on tehty syvyysuunnassa $0,5$ metrin välein ja pituussuunnassa viiden metrin välein. Pystysuuntaiset nuolet kuvaavat luotauspaikkoja ja harmaa alue kuvaa pohjaa.



Kuva 26. Lämpötilan jakaumat CTD:llä mitattuna Purolinjalla 18.4. ja 21.4.2006.

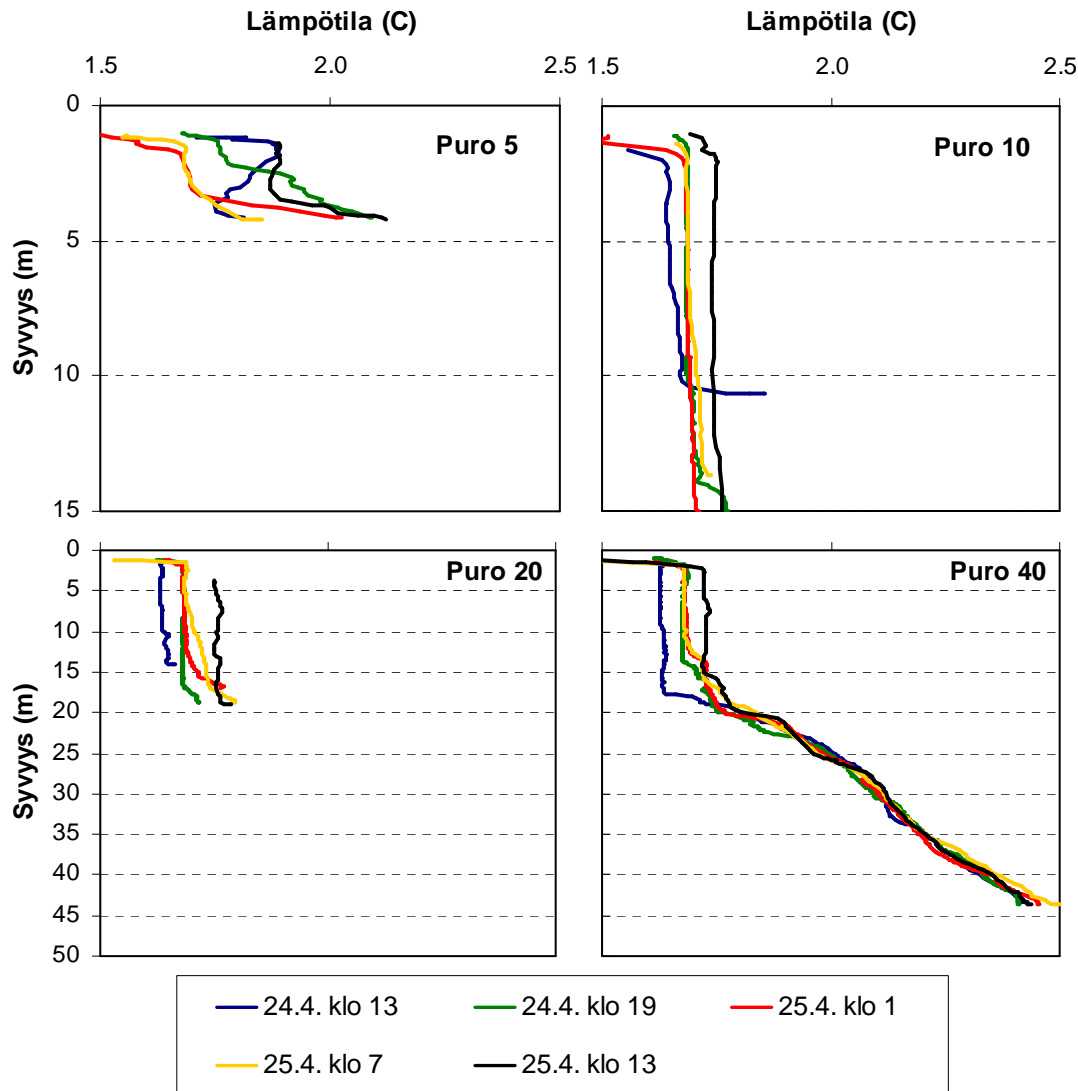


Kuva 27. Lämpötilan jakaumat CTD:llä mitattuna Purolinjalla 24.-25.4. ja 28.4.2006.

Purolinjalla tehtiin mittauksia kuuden tunnin välein 24.-25.4. (Kuva 28). Viiden metrin syvyisessä paikassa lämpötilat eivät olleet tasaisia koko syvyydellä, vaan esimerkiksi kello 13 pinnan lähellä oli lämpimämpää vettä kuin pohjan lähellä. Muissa mittauksissa pinnan lähellä

oli viileämpää ja pohjalla lämpimämpää. Yöllä viiden metrin syvyydessä paikassa tapahtui viilenemistä päivällä mitatuista lämpötiloista.

10 metrin syvyydessä paikassa vesi lämpeni päivän aikana sekä 24.4. että 25.4. (Kuva 28). Yöllä lämpötila ei laskenut, vaan jopa kohosi syvemmissä kerroksissa. 20 metrin syvyydessä paikassa vesi oli kierrossa pohjaan saakka ja lämpeni molempina päivinä koko syvyydellä, kun taas yön aikana lämpenemistä tapahtui ainoastaan yli seitsemän metrin syvyydessä. 40 metrin syvyydessä paikassa sekoittuva kerros ulottui 24.4. noin 17,5 metrin syvyyteen asti. Sekoittuvassa kerroksessa lämpötila kohosi molempina päivinä, mutta pysyi muuttumattomana yöllä.

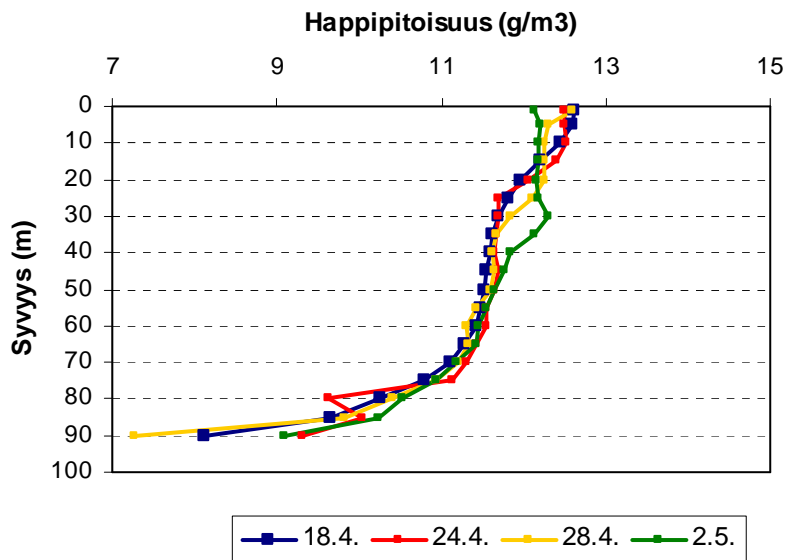


Kuva 28. Lämpötilan jakaumat CTD:llä mitattuna Purolinjalla 24.-25.4.2006.

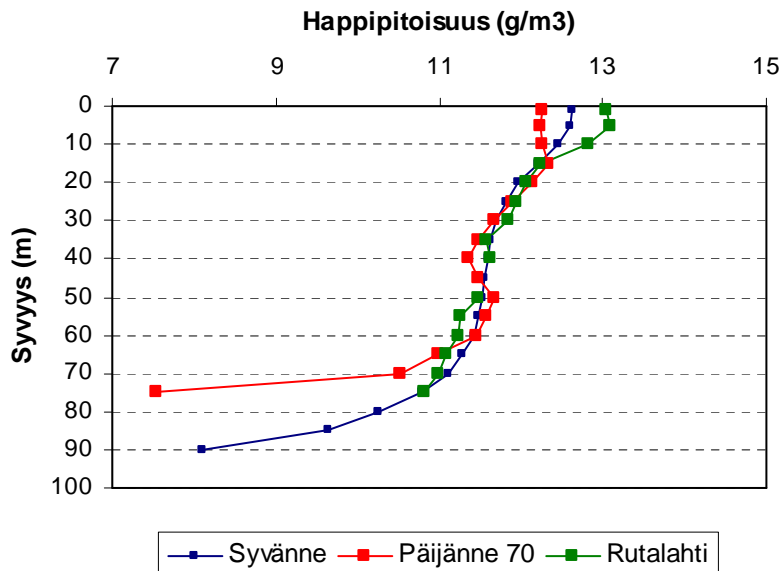
3.4. Happipitoisuus

Happipitoisuus oli Syvänteellä suurempi pinnan lähellä kuin pohjassa. Päälimmäisissä vesikerroksissa happipitoisuus aleni alkukevällä melko nopeasti. Myöhemmin (2.5.) pitoisuus oli kuitenkin tasaisehko ylimmän 30 metrin syvyydellä, jossa vesi oli sekoittunutta. (Kuva 29).

Ristinselän keskellä hapen jakauma oli samanlainen kuin Syvänteellä, mutta sekä pohjan että pinnan lähellä oli vähemmän happea kuin Syvänteellä. Rutalahdessa happipitoisuus oli pinnan lähellä korkeampi kuin kahdessa muussa paikassa. Lähellä pohjaa olevissa kerroksissa Rutalahden happipitoisuus ei myöskään ollut pienempi verrattuna koko syvyyteen, toisin kuin kahdessa muussa paikassa. (Kuva 30). Tämä tukee lämpötilamittausten tuloksia, joiden mukaan Syvänteelle ja Ristinselän keskelle oli kasaantunut lämpimämpää vettä pohjalle, mutta Rutalahteen ei (Luku 4.3.1.).

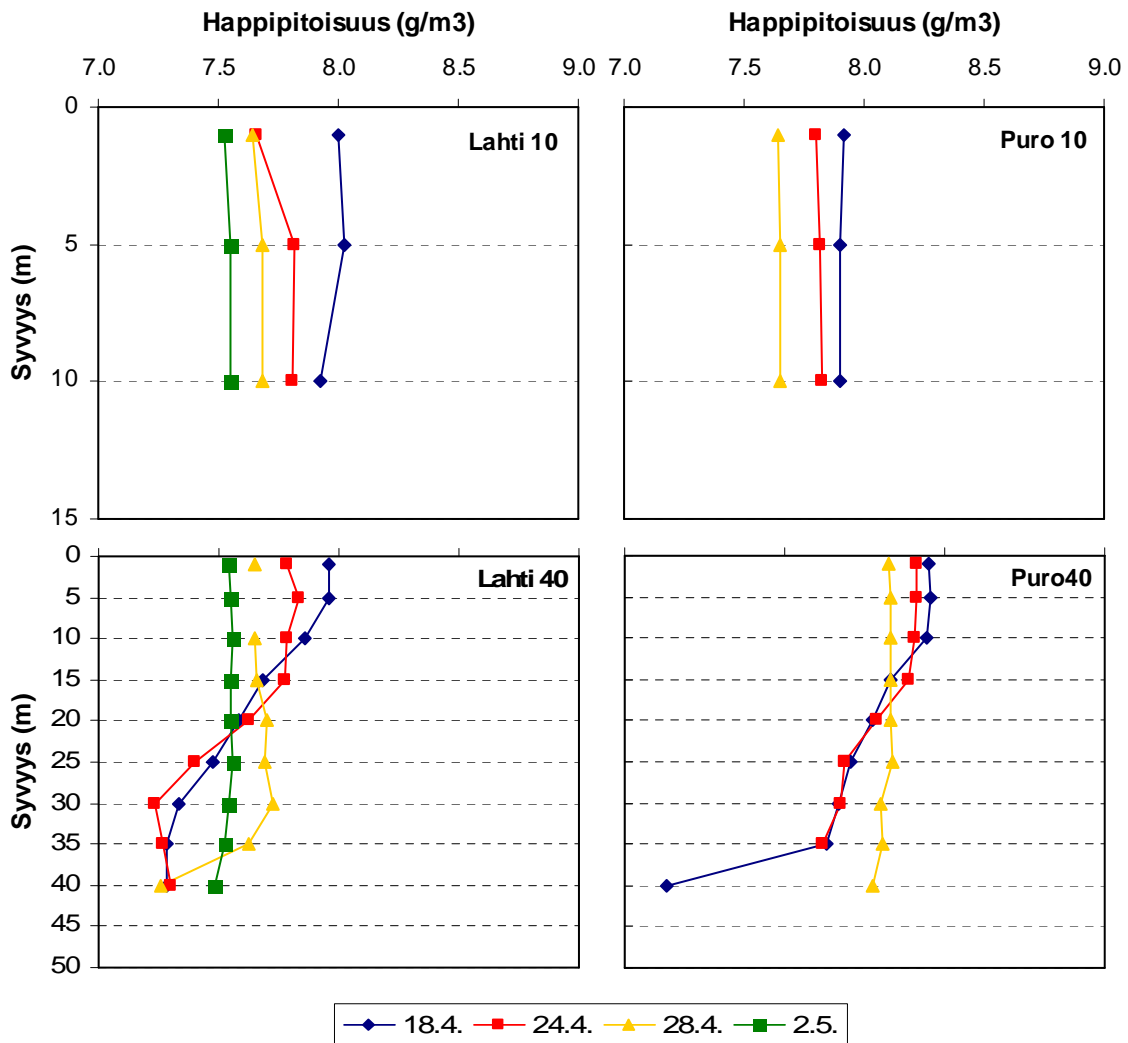


Kuva 29. Happipitoisuus Syvänteellä keväällä 2006 happipullonäytteistä määritettynä.



Kuva 30. Happipitoisuus Syvänteellä, Ristinselän keskellä (Päijänne 70) ja Rutalahdessa 18.4.2006 happipullonäytteistä määritettynä.

Myös Lahti- ja Purolinjoilla happipitoisuus pieni pintavedessä kevään edetessä. Happipitoisuus oli melko tasainen pinnasta pohjaan 10 metrin syvyisissä paikoissa. 40 metrin syvyisissä paikoissa pinnan lähellä oli tasaisen happipitoisuuden alue, jonka syvyys kasvoi kevään edetessä. Loppukeväällä koko vesipatsaassa happipitoisuus oli suunnilleen samansuuruinen eli noin $7,7 \text{ g m}^{-3}$. (Kuva 31).



Kuva 31. Happipitoisuus Lahti- ja Purolinjoilla keväällä 2006 happipullonäytteistä määritettynä.

4. TULOSTEN TARKASTELU

Veden lämpeneminen alkoi Ristinselällä ylimmissä vesikerroksissa noin kuukautta ennen jäiden lähtöä ja myöhemmin lämpenemistä havaittiin vaiheittain myös syvemmällä. Lämpötilojen tarkastelun perusteella Ristinselän keväanaikaiseen sekoittumiseen näyttää vaikuttavan ainakin pystysuuntainen sekä vaakasuuntainen konvektiokierto ja vähäisemmässä määrin mahdollisesti Päijänteen läpivirtaus. Pystysuuntainen konvektio näytti aiheuttavan suurimman osan lämpenemisjakson alkuvaiheen sekoittumisesta, kun taas pohjanmyötäisen virtauksen merkkejä ilmeni vasta myöhemmin jäiden lähdön lähestyessä. Lisäksi

pohjanmyötäinen virtaus näytti vaikuttavan vahvimmin Rutalahden mittauspaikassa, joka sijaitsee kauimpana Ristinselän keskiosasta.

4.1. Pystysuuntainen konvektio

Ristinselän syvimmällä kohdalla lämpeneminen tapahtui suurelta osin pystysuuntaisen konvektiosekoittumisen vaikutuksesta. Kevään edetessä konvektio tehostui jatkuvasti aiheuttaen sekoittuvan ja samalla lämpenevän kerroksen laajenemisen vähitellen syvemmälle päin (Kuvat 11 ja 14) aivan kuten Matthews (1988), Bengtsson (1996) ja Kelley (1997) ovat todenneet tapahtuvan muissakin järvissä.

Matthews (1988) on tutkinut konvektiota myös Suomessa Lammin Pääjärvellä. Ristinselällä mitatut lämpötilajakaumat vastasivat Pääjärvellä havaittuja lämpötilojen syvyysjakaumia. Samoin kuin Matthews'n tutkimissa järvissä, lumen sulaminen jään päältä näytti vaikuttavan Ristinselällä merkittävästi sekoittumisen alkamiseen. Ristinselän Syvänteellä lumisohjoa oli noin kahdeksan senttimetriä paksu kerros 11.4., jolloin lämpeneminen oli alkanut metrin syvyydellä, mutta ei vielä viiden metrin syvyydellä. Pääjärvellä 1987 lämpeneminen oli samanlaisessa lumitilanteessa juuri alkanut kahden metrin syvyydellä (Matthews 1988). Lumipeitteen sulaminen keväällä jään päältä lisää ratkaisevasti auringonsäteilyn tunkeutumista veteen, koska lumen albedo (heijastuneen säteilyn suhde tulevaan säteilyyn) on suuri eli lumi estää tehokkaasti valon tunkeutumista. Mustan kirkkaan teräsjään albedo puolestaan on pieni, joten se päästää suuren osan säteilystä lävitseen. Matthews'n havaintoja jään paksuuden vaikutuksesta konvektion alkamisaikaan ja tehokkuuteen tukee myös se, että Ristinselällä konvektion alkaminen havaittiin ensin selän keskellä, jossa jääpeite oli ohuin. Sekoittuvan kerroksen syvyys oli siellä myöhemminkin suurempi verrattuna muihin mittauspaikkoihin.

Ristinselän keskellä havaittiin useilla syvyyksillä viilenemistä juuri ennen veden lämpenemisen alkamista (Kuvat 7 ja 10). Tämä johtunee konvektion ylilyönnistä eli siitä, että konvektiossa alaspäin virtaava vesi jatkaa liikettään vielä vähän omaa lämpötilaansa vastaavaa kerrosta alemmas eli varsinaisen sekoittuvan kerroksen alapuolelle lämpimämpään vesimassaan. Tällaista yhtä voimakasta viilenemistä ei kuitenkaan havaittu Syvänteellä tai Rutalahdessa. Yhtenä syynä tähän voisi olla Ristinselän keskiosan ohuempi jääpeite ja siitä johtuva veden voimakkaampi lämpeneminen ja tehostuneempi konvektio. Matthews (1988) kuitenkin havaitsi samanlaisen konvektion ylilyöntiin liittyvän viilenemisen Pääjärvässä jo 10 metrin syvyydessä, joten konvektiovirtauksen liike-energia olisi varmasti riittänyt ylilyöntiin myös Ristinselällä Syvänteellä ja Rutalahdessa. Vaakasuoran konvektion vaikutus saattaa myös näkyä lämpötilajakaumissa. Jos ylhäältä päin tuleva konvektiovirtaus viilentää tiettyä vesikerrosta ja ranta-alueiden lämpenemisestä alkanut vaakasuora virtaus lämmittää sitä, niin lopputuloksena on vähäisempi ero kerroksen lämpötilassa. Syvänteellä havaittiin ennen sekoittumisen alkua hyvin heikko lämpeneminen ja sen jälkeen heikko viileneminen monilla syvyyksillä (Kuvat 6 ja 10). Näistä lämpeneminen edustanee pohjanmyötäistä virtausta ja kylmeneminen pystysuoraa konvektiota. Myös Ristinselän keskellä havaittiin melko voimakasta lämpenemistä ja yhtäkkistä viilenemistä ennen sekoittumisen alkua (Kuvat 7 ja 10), mutta vasta vähän ennen jäiden lähtöä. Tämä alueellinen ero voisi johtua ranta-alueiden etäisyydestä mittauspaikkoihin. Ristinselän keskiosan mittauspaikka sijaitsee melko kaukana rannoista, mutta myöhemmin keväällä vaakasuorat virtaukset voivat vaikuttaa jopa selän

keskellä asti. Veden sekoittumista ja lämpötilan heilahteluja Ristinselän keskiosissa saattaa lisätä myös veden virtaus etelään päin Päijänteen läpivirtauksen takia.

Syvänteellä sekoittuva kerros ulottui noin 60 metrin syvyyteen ennen jäiden lähtöä ja havaintojen mukaan ensimmäisenä tai viimeistään toisena jäättömänä päivänä koko järvi oli pohjaan asti sekoittunut (Kuvat 12 ja 14). Muutamaa päivää ennen jäiden lähtöä Syvänteellä havaittiin viileneminen ja uusi lämpeneminen 50-90 metrin syvyydellä samaan aikaan, kun ylemmät vesikerrokset lämpenivät edelleen (Kuvat 6, 10 ja 12). Tämäkin saattaisi johtua edellä mainitusta konvektion ylilyönnistä, nyt vain entistä suuremmassa mittakaavassa. Koska vesipatsas oli tällöin jo melkein tasalämpöinen, niin kylmempiä pulsseja päällysvedestä saattaisi helpommin ajoittain vajota tasalämpöisen kerroksen alapuolellekin. Kun lisäksi sekoittuvan kerroksen ja alemman kerroksen välinen raja kävi jäiden lähdön lähestyessä epäselvemmäksi (Kuva 12), niin sekoittuminen ei välttämättä rajoittunut enää selkeästi jonkin tietyn syvyyden yläpuolelle.

4.2. Pohjanmyötäiset virtaukset

Auringon säteily voi keväällä lämmittää matalaa ranta-aluetta syviä alueita nopeammin aiheuttaen pohjaa pitkin etenevän lämpimämmän veden virtauksen syvälle päin. Stefanovic ja Stefan (2001) totesivat tällaisen jyrkällä rinteellä kulkevan virtauksen olemassaolon Yhdysvaltojen Minneapolisisissa jääpeitteisen Ryan-järven lämpötilan tasa-arvokäyristä. Kyseisissä mittauksissa pohjaa pitkin virtaavan veden lämpötila oli noin 0,2 °C korkeampi verrattuna yläpuoliseen vesimassaan, ja lämpimämmän alueen paksuus oli noin 0,4 metriä. Lahti- ja Purolinjoilla Ristinselällä näytti olevan kyse samanlaisesta virtauksesta, koska matalissa paikoissa havaittiin muuta vesimassaa korkeampia pohjanläheisiä lämpötiloja. Joissakin mittauksista aivan alimmat tulokset saattavat tosin edustaa sedimentin lämpötiloja (Kuvat 21 ja 27), mutta jos mitattu lämpötila on korkeampi usean kymmenen sentin etäisyydellä pohjasta, kyse on varmasti veden lämpötilasta. Lämpötilaerot olivat suurimmillaan samaa luokkaa kuin Ryan-järven tapauksessa (Kuvat 20, 21, 25 ja 26). Matalissa paikoissa pinnan lähellä oli huomattavasti viileämpää kuin pohjan lähellä, mikä johtunee jään sulamisesta ja jään alla kulkevasta kylmästä vastavirtauksesta. Ristinselällä pohjan läheisen lämpimämmän alueen paksuus oli Lahtilinjalta alle metrin varhaisemmissa mittauksissa, kun taas lähempänä jäidenlähtöä lämpötila oli muuta vesipatsasta korkeampi usean metrin matkalla pohjan yläpuolella. Tämä voisi johtua pohjavirtauksen tehostumisesta kevään edetessä auringon säteilyn ja lämmittävän vaikutuksen lisääntymisen takia. Aurinko lämmittää rantavesiä erityisen tehokkaasti loppukevällä, kun jää on jo sulanut rannan läheltä, ja aiemmin jään sulattamiseen kulunut suuri energiamäärä näkyy veden lämpenemisen kiihtymisenä. Toisaalta tällöin myös jäähtyminen on yöaikaan tehokkaampaa. Myös Ryan-järvellä tapahtui edellistä tehokkaampaa vaakasuuntaista sekoittumista matalan ja syvän alueen välillä sen jälkeen, kun pohjavirtauksen merkit oli ensimmäisen kerran havaittu. Stefanovic ja Stefan päättelivät vaakasuuntaisen sekoittumisen olemassaolon suoraan siitä, että lämpötiloissa havaittiin alueellisia eroja tietyllä syvyydellä.

Ristinselän Syvänteelle suuntautuvilla Lahti- ja Purolinjoilla Syvänteen ja 40 metrin syvyyden paikkojen välillä lämpötilojen tasa-arvokäyrät olivat pohjan lähellä kohti Syväntettä viettäviä (kuvat 18, 19 ja 24), mistä voisi olettaa pohjavirtauksen kulkeneen Syvänteen rinteitä. Näin jyrkät tasa-arvokäyrät mittauspisteiden välillä voivat kuitenkin olla pikemminkin käyrien tuottamiseen käytetyn interpolointiohjelman tuotteita kuin todellisia.

Koska ranta-alueella havaintopisteet olivat lähempänä toisiaan, siellä olevat epäsäännöllisemmät, lähellä pintaa näkyvät kaltevat tasa-arvokäyrät kuvastanevat luotettavammin todellista vaakasuuntaista lämpötilaeroa ja viittaavat myös lämpimän veden virtaamiseen syvälle alueelle päin.

Matalien alueiden rantavesien lisäksi myös rannalta valuvat sulamisvedet voivat olla järvivettä lämpimämpiä tai myös kylmempiä ja ne voivat osaltaan vaikuttaa ranta-alueilla syntyviin virtauksiin. Haukkalammesta virtaavan puron vesi oli 25.4. lämpötilaltaan noin 3,5 °C eli selvästi lämpimämpää kuin järvivesi. Purolle suuntautuvalla Purolinjalla ei kuitenkaan havaittu merkittävästi korkeampia lämpötiloja kuin Lahtilinjalla, joten puroveden vaikutus oli todennäköisesti melko vähäinen. Purolinjan matalimmassa, noin neljän metrin syvyisessä mittauspaiikassa oli kuitenkin selvästi muuta linjaa korkeampia lämpötiloja (Kuva 27), jotka todennäköisesti johtuivat lämpimämmästä purovedestä. Lahtilinjalla matalin mittauspaiikka oli noin kahdeksan metrin syvyinen, joten näitä lähimpänä rantaa olevia paikkoja ei voi syvyyseron takia vertailla Puro- ja Lahtilinjän välillä.

Matalilla alueilla havaittiin usein lämpötilaeroja vaakasuunnassa rannan ja ulapan välillä, kun taas syvillä alueilla vaakasuuntaisia eroja lämpötilassa ei juuri ollut (Kuvat 21, 22 ja 27) tai ne olivat vähäisempiä (Kuvat 18 ja 19). Pohjanmyötäiset virtaukset näyttävätkin syntyvän ja esiintyvän ensin lähinnä rannan lähellä matalilla alueilla. Syvillä alueilla taas sekoittuminen tapahtuu suurimmaksi osaksi pinnalta käsin tapahtuvan pystysuuntaisen konvektion kautta ainakin päällimmäisissä vesikerroksissa (Kuvat 10 ja 14). Pintaveden lämpeneminen syvällä alueella johtaa pystysuuntaiseen konvektioon, mutta rannan lähellä virtaus muodostuu vaakasuuntaiseksi syvännettä kohti kulkevaksi liikkeeksi alueellisten lämpötilaerojen seurauksena. Erityisesti lähempänä jäiden lähtöä pohjanmyötäiset virtaukset saattavat ulottua kauemminkin ranta-alueelta asettuen vaakasuuntaiseksi virtaukseksi lämpötilaansa vastaavalle tasolle. Näin molemmat konvektiosekoittumisen muodot vaikuttanevat siis yhdessä ja sekoittavat koko Ristinselän alueen tehokkaasti keväisin.

Ranta-alueen ja ulapan välisen eron lisäksi Ristinselällä on nähtävissä laajemmankin mittakaavan alueellisia eroja sekoittumismekanismeissa. Syvänteellä ja Rutalahdessa lämpötila alkoi hieman kohota yli 25 metriä syvissä kerroksissa jo ennen täydellistä sekoittumista (Kuvat 6 ja 8), mikä johtunee vaakasuoran virtauksen lämmittävästä vaikutuksesta. Ristinselän keskellä tällaista vähittäistä lämpenemistä ei havaittu (Kuva 7). Pohjanmyötäisestä virtauksesta johtunee myös lämpötilajakaumien taipuminen lämpimämpään suuntaan syvyyden suhteen Syvänteellä ja tätä selkeämmin Rutalahdessa. Vaakasuora sekoittuminen näyttää siis vaikuttavan sekoittumiseen vahvimmin Rutalahdessa ja jonkin verran myös Syvänteellä, kun taas Ristinselän keskellä pohjavirtauksen merkit ovat nähtävissä vasta juuri ennen jäiden lähtöä. Nämä erot selittynevät lähinnä matalien ranta-alueiden etäisyydellä mittauspaiikoihin. Ristinselän keskiosan mittauspaiikka on kaukana rannoista, kun taas Syvänteen ja Rutalahden mittauspaiikat ovat selvästi lähempänä niitä (Kuva 1). Lisäksi Rutalahdessa matalaa ranta-alueetta on laajemmalla alueella kuin Syvänteen lähellä. Ristinselän keskellä pystysuuntainen konvektio ja Päijänteen läpivirtaus vaikuttivat sen sijaan vahvemmin kuin kahdessa muussa paikassa.

Rutalahden mittauspaiikassa pohjan lähellä esiintyi myös vuorokausijaksoista lämpötilavaihtelua, joka oli vahvinta aivan pohjan lähellä (Kuva 13). Tämä johtunee syvemmälle päin suuntautuvasta lämpimän veden virtauksesta, joka on alkanut päivällä ja vaimennut yöllä. Kenneyn (1996) mukaan jääpeitteisissä järvissä tapahtuu matalien ja syvien

alueiden välillä vaakasuuntaista sekoittumista, joka voi johtua auringon säteilyn vaikutuksesta tai sedimentistä vapautuvasta lämmöstä. Rutalahdessa virtaus voi olla lähtöisin mittauspaikan lähistöllä olevilta matalammilta ranta-alueilta, joissa aurinko pääsee lämmittämään vettä nopeasti aiheuttaen selkeästi vuorokausittain vaihtelevan virtauksen. Rutalahden pohjukkaan tulee joki, josta lämpimämpi vesi voisi myös osittain olla peräisin. Tämä on kuitenkin epätodennäköistä, koska joen suu on kaukana mittauspaikasta, eikä syväne vie tasaisesti lahden pohjukasta mittauspaikalle. Rutalahden mittauspaikka on syvänteeseen rinnealueella, minkä vuoksi lämmin pohjavirtaus aiheuttaa vain hetkellistä lämpenemistä liikkuaan paikan ohi. Koska lämmin vesi ei kasaannu tähän paikkaan, niin lämpötilan hetkellisissä mittauksissa ei havaittu pohjan lähellä lämpimämmän veden kerrosta (Kuva 15). Syvänteelle ja Ristinselän keskiosaan lämmin vesi sen sijaan kasaantui lämpötilamittausten perusteella, mikä myös osaltaan tukee pohjavirtauksen olemassaoloa. Talvenaikainen lämpimämmän veden virtaus johtuu sedimentistä vapautuvasta lämmöstä (esim. Mortimer ja Mackereth 1958), mikä on seurausta sedimentin lämpenemisestä edellisen kesän aikana. Edellä mainitussa Rutalahden tapauksessa virtauksen täytyy kuitenkin johtua saman kevään aikaisesta auringonsäteilystä, joka jaksoittain lämmittäessään matalan alueen vettä ja pohjaa aiheuttaa myös jaksottaisen virtauksen. Sedimentistä tasaisesti vapautuvan lämmön aiheuttama virtaus ei olisi jaksollista. Rutalahden vuorokausijaksoisen lämpötilaheilahtelun jälkeen tapahtui myös pidempiä ja voimakkaampia heilahteluja, joista toisen sisällä on nähtävissä myös pienempää vuorokauden mittaista heilahtelua (Kuva 13). Nämä vahvemmat heilahtukset liittyivät virtauksen voimistumiseen ja mahdollisesti myös jokivesien lisääntyvään vaikutukseen jäiden lähdön tullessa yhä lähemmäs. Vuorokausittainen vaihtelu näytti tällöin jääneen näiden suurempien heilahtelujen varjoon. Tulkintaa hankaloittaa epätietoisuus tarkasta jäidenlähtöpäivästä Rutalahdessa, mutta ainakin viimeiset (8.-9.5.) lämpötilatiedot kuvassa 13 ovat sulan veden ajalta.

Kenneyn (1996) mukaan vaakasuuntainen sekoittuminen näkyy lahtien suuaukoissa kahdessa kerroksessa siten, että sisäänvirtaus tapahtuu pinnan lähellä ja voimakkaampi ulosvirtaus pohjan lähellä. Tutkimuksessa havaittiin pohjaa pitkin liikkuvassa virtauksessa myös jaksottaisia pulsseja, joiden jakso oli sama kuin kyseisessä paikassa havaitun sisäisen aallon jakso. Sisäinen aalto voisi olla eräs selitys myös Rutalahdessa havaitulle jaksollisuudelle. Yksisolmuisen sisäisen aallon heilahdusaika olisi Ristinselän syvänealueella (yli 50 m syvän alueen pituus noin 8,4 km) 14 tuntia tapauksessa, jossa yläpuolisen vesimassan syvyys olisi 70 metriä ja alapuolisen vesimassan syvyys viisi metriä. Kaksisolmuisen aallon heilahdusaika olisi vain seitsemän tuntia. Tasoitettaessa ylä- ja alapuolisten kerrosten syvyyksiä heilahdusaika muuttuu vielä lyhyemmäksi. Nämä tulokset laskettiin sisäisen aallon jakson kaavalla, joka huomioi altaan pituuden, päälly- ja aluskerroksen paksuudet sekä tiheyserot (Turner, 1973). Vuorokauden mittainen heilahdusaika sisäiselle aallolle olisikin mahdotonta altaassa, jonka pituus on alle 10 kilometriä ja syvyys alle 100 metriä. Altaan pituuden kasvaessa 20 kilometriin vuorokauden mittainen heilahtelu olisi mahdollista. Tällä perusteella Rutalahdessa havaittu heilahtelu ei voinut johtua sisäisestä aallosta. Muualla Ristinselällä ei myöskään havaittu samanaikaista ja -suuruista heilahtelua kuin Rutalahdessa.

4.3. Lämpötilan vuorokausivaihtelu

Sekoittuvassa kerroksessa havaittiin Ristinselällä lämpenemistä, jota tapahtui erityisesti päivän aikana auringon säteilyn lämmittäessä vettä ja paikallisen konvektiokierron levittäessä

lämmön koko sekoittuvaan kerrokseen (Kuvat 6 ja 9). Yön ajaksi lämpeneminen tavallisesti pysähtyi. Tämä päivän ja yön välinen ero lämpenemisnopeudessa näkyi erityisen hyvin alkukeväällä, jolloin lämpötilan nousu kohdistui pienempään sekoittuvan kerroksen vesitilavuuteen. Pinnan lähellä päivän ja yön välinen ero näkyi selkeämmin kuin syvemmillä, mikä voisi johtua pintakerroksen tehokkaammasta lämpenemisestä auringonsäteilyn takia. Vaikka sekoittuminen siirtää lämpöä syvemmällekkin, niin syvemmät kerrokset lämpenevät hieman pintakerroksia myöhemmin.

Erityisesti matalimmissa paikoissa Lahti- ja Purolinjalla havaittiin lämpenemistä päivisin ja lämpenemisen pysähtyminen tai lämpötilan laskemista yöaikaan (Kuvat 22, 23 ja 27). Päiväsaikaan tapahtuva lämpeneminen johtuu auringon säteilyn tunkeutumisesta ja absorboitumisesta veteen, ja yöllä tapahtuva viileneminen voi aiheutua jään sulamisesta sekä konvektion aiheuttamasta vastavirtauksesta järven keskeltä rantaan päin. Pintavesi voi myös jäähtyä lämmön siirtyessä vedestä ilmaan erityisesti ranta-alueen ollessa vapaa jäistä.

4.4. Happipitoisuus ja jäänalaiset virtaukset

Stefanovic ja Stefan (2001) totesivat, että matalissa rehevissä järvissä happipitoisuus on tavallisesti pienempi pohjan kuin pinnan lähellä, koska pystysuuntainen kulkeutuminen on vähäistä ja suurin osa hapenkulutuksesta tapahtuu sedimentin pintakerroksessa. Vaikka Ristinselkä ei ole rehevä eikä matala, niin myös siellä happipitoisuus oli pienin syvimmissä kerroksissa alkukeväällä. Koko vesipatsaassa ei kuitenkaan havaittu alle 7 g/m³ happipitoisuuksia, mikä kertoo järven karuudesta.

Happimääritysten tulokset Ristinselältä tukevat lämpötilamittauksista saatua kuvaa veden sekoittumisesta. Lahti- ja Purolinjoilla happi- ja lämpötilatulokset antoivat yhtenäisen kuvan siitä, oliko vesipatsas kokonaan kierrossa vai ei (Kuvat 23, 24, 28 ja 31). Happipitoisuudessa havaittiin kuitenkin herkemmin kuin lämpötilassa eroja myös sekoittuvan kerroksen alueella (Kuvat 14 ja 29). Sekä happi- että lämpötilatuloksissa näkyi pohjanläheisten arvojen ero Rutalahden mittaustaikojen sekä Syvänteen ja Ristinselän keskiosan mittaustaikkojen välillä (Kuvat 15 ja 30). Rutalahdessa happipitoisuus pohjan lähellä oli korkeampi kuin muissa paikoissa, eikä juurikaan pienentynyt lähellä pohjaa. Tämä johtuu paikan sijainnista syvänteen rinteessä, jolloin lämmin ja raskaampi vesi ei kerääny mittaustaikkaan vaan virtaa syvemmälle.

4.5. Lämpötilajakaumien epäjatkuvuus

Tasalämpöisen konvektiokerroksen alapuolella lämpötilan jakauma näytti useissa Ristinselän mittauksissa olevan portaittainen tai muulla tavoin epätasainen muutaman metrin matkalla. Tämä viittaa siihen, että konvektiokerroksen alapuolella veden kerrostumisessa oli jonkinlaista epävakautta. Epävakaa lämpötilan muutosvyöhyke voi Jonaksen ym. (2003) mukaan syntyä sekoittuvan kerroksen alapuolelle, kun sinne virtaa lämpimämpää ja vähäsuolaisempaa vettä vesipatsaan yläosista sekoittuvan tasalämpöisen kerroksen läpi. Tällöin konvektiokerroksen alapuolelle syntyy alue, jossa tiheyskerrostumisen määrittelevät voimistuneet erot suolaisuudessa, ei lämpötilassa. Tällaisen kerrostumisen syntymiselle on välttämätöntä vesipatsaan yläosassa oleva suolaisuusero, joka syntyy vain silloin, kun vesimassan suolaisuus on selvästi suurempi kuin jään suolaisuus. Jonaksen ym. (2003) tutkimassa karjalalaisessa Vendyurskoe-nimisessä järvessä sekoittuvan kerroksen suolaisuus oli noin 0,02 psu. Ristinselällä lämpötilan ja sähkönjohtavuuden avulla laskettu suolaisuus oli

CTD-luotausten mukaan noin 0,04 psu, joten tällä perusteella Ristinselän suolaisuus on tarpeeksi suuri kyseisen ilmiön syntymiselle. Konvektiokerroksen alapuolella oleva korkeampi suolaisuus voi syrjäyttää lämpötilaerojen vaikutuksen tiheyskerrostumiseen vain vahvan konvektion loppuvaiheessa, jolloin nosteen eli tiheyserojen aiheuttaman kulkeutumisen vaikutus on tarpeeksi pieni. Ristinselällä tähän viittaavaa epävakautta havaittiin 24.-25.4., jolloin sekoittuva kerros ulottui alle 20 metriin, ja 2.-3.5., jolloin se ulottui 40 metriin asti. Ainakin heti konvektiokerroksen alapuolella havaitut ilmiöt voisivat siis johtua tällaisesta suolaisuuden aiheuttamasta kerrostumisesta.

Eräs vaihtoehto epätasaisten lämpötilajakaumien syntymissyiksi voisi olla kaksoisdifфуusio. Turnerin (1973) mukaan kaksoisdifфуusiota voi ilmetä, kun kahden ominaisuuden erilaiset molekulaariset difфуusiot aiheuttavat tiheyseroja, jotka vaikuttavat veden pystysuuntaiseen tiheysjakaumaan. Esimerkiksi lämmöllä on suurempi molekulaarinen difфуusio kuin veteen liuenneilla suoloilla, joten kaksoisdifфуusio voi aiheutua lämmön ja suolaisuuden hetkellisistä jakaumista. Kaksoisdifфуusion liikkeen aiheuttaa toisen ominaisuuden energia ja ilmiön seurauksena vastaavasti toinen ominaisuus voi levitä väliaineessa nopeammin kuin tavallisen molekulaarisen difфуusion avulla. Kaksoisdifфуusiota voi ilmetä kahdessa erilaisessa muodossa, ”sormialueella”, joka kuljettaa nopeammin pienemmän difфуusiokyvyn ominaisuutta, ja ”difфуusiivisella alueella” (Turner 1973), joka kuljettaa nopeammin suuremman difфуusiokyvyn ominaisuutta. Esimerkiksi lämpö kulkeutuu vedessä tavallisesti suoloja nopeammin, mutta sormialueen kaksoisdifфуusion avulla suolat kulkeutuvat lämpöä nopeammin.

Kaksoisdifфуusiota voi Turnerin (1973) mukaan ilmetä luonnonvesissä konvektiivisten kerrosten välisillä rajapinnoilla joko sormi- tai difфуusiivisella alueella. Jos esimerkiksi kyseessä ovat difфуusiiviset rajapinnat sekä suolaisuuden ja lämpötilan yhteisvaikutus, niin suolaisuuden jakaumassa on tiheyshyppy yli rajapintojen, joissa kaksoisdifфуusio kuljettaa lämmön nopeasti rajapinnan poikki pitäen samalla yllä tavallista lämpötilakonvektiota ympäröivissä kerroksissa. Myös sormialueen rajapintoja voi esiintyä tämän tyyppisten konvektiokerrosten välissä, mutta ne syntyvät eri tavalla ja niiden poikki suola kulkeutuu nopeammin kuin lämpö. Kaksoisdifфуusio onkin merkittävä ainesten kuljetusmekanismi, ja sen syntymistä ja toimintaa on selvitetty tarkemmin esimerkiksi Turnerin (1973) teoksessa.

Portaittaisia lämpötilajakaumia on havaittu merissä tai suolajärvissä kaksoisdifфуusion yhteydessä (Turner 1973). Ristinselällä lämpötilajakaumissa havaitut epätasaisuudet ovat kuitenkin melko harvinaisia ja vähäisiä verrattuna näihin tutkimuksiin, minkä vuoksi ne eivät välttämättä johdu kaksoisdifфуusiosta. Myös suolapitoisuuden erot ovat Ristinselällä erittäin pieniä, joten kaksoisdifфуusion mahdollisuuden on suhtauduttava varauksella. Koska jääpeite eristää vesimassan tehokkaasti ilmakehästä, voisi kaksoisdifфуusiota kuitenkin tapahtua huomattavasti pienemmillä suolaisuuden eroilla kuin esimerkiksi merissä. Valtamerissä kaksoisdifфуusiolla on suuri merkitys etenkin napojen läheisten alueiden ilmaston muotoutumiselle. Vastaavan ilmiön mahdollinen esiintyminen makeavetisissä järvissä voisi olla tärkeä havainto isojen järvien veden keväisen sekoittumisen ymmärtämiseksi. Toisaalta lämpötilaportaiden esiintyminen aikaisempiin havaintoihin verrattuna aivan uudella tavalla ympäristössä todennäköisesti edesauttaa myös koko ilmiön perusteellisempaa ymmärtämistä.

4.6. Tutkimusmahdollisuuksia jatkossa

Tässä työssä mitattiin lämpötilaa kolmessa syvänteessä useilla syvyyksillä. Rannan läheisiä ilmiöitä tutkittiin erillisillä CTD-luotauksilla, joita kuitenkin pystyttiin tekemään vain kahtena eri vuorokautena, jotka eivät välttämättä tuottaneet kevätkautta hyvin edustavia tuloksia. Matalien alueiden lämpötilan kehittymistä olisikin helpompi seurata, jos myös rannan läheltä saataisiin lämpötilan aikasarjoja esimerkiksi tallentavilla lämpötila-anturiketjuilla. Tällöin myös vuorokausivaihtelua matalilla alueilla voitaisiin seurata useamman vuorokauden aikana. CTD-luotauksia voitaisiin lisäksi tehdä tarkemman lämpötilajakauman selvittämiseksi joistakin paikoista tiheästi säännöllisin väliajoin.

Ristinselän keskellä päällysvesi oli kylmempää kuin Syvänteellä ja Rutalahdessa (Kuva 15). Tämä saattaa selittyä jatkuvasti pohjoisesta tulevalla järven läpivirtauksella, joka ei vaikuta yhtä vahvasti pääuomasta sivussa oleviin paikkoihin. Selän keskellä sekoittuvan kerroksen alapuolella esiintyi myös pysyviä kerroksia, joiden lämpötila oli alhaisempi kuin Syvänteellä. Nämä lämpötilaerot voivat kuitenkin läpivirtauksen ohella johtua paikallisemmistakin virtausolosuhteista. Läpivirtauksen vaikutusta pystyttäisiin selvittämään tarkemmin, jos järven pääuoman alueella olisi useampia mittauspaikkoja. Ne voisivat sijaita Ristinselän keskellä ja sen pohjoispuolella aukeavalla selällä ja jopa Vaajakoskella tulovirtauksen kohdalla asti.

Lämpötilamittausten ohella talven aikaisia veden liikkeitä voitaisiin tutkia myös suorilla virtausmittauksilla. Avannosta tehtävillä uimurimittauksilla voitaisiin selvittää virtauksia eri syvyyksillä esimerkiksi läpivirtauksen vaikutusalueella. Uimurimittauksilla pystytään havaitsemaan hyvin hitaitakin virtauksia (Sarkkula, 1989). Pohjaan asetettava ADCP-virtaustutka (Acoustic Doppler Current Profiler) olisi eräs mahdollisuus selvittää talvenaikaisia virtauksia useassa vesikerroksessa yhtä aikaa. ADCP-mittauksia onkin tehty Suomessa talviaikaan (T. Huttula, suull. tied.) Ongelmana on kuitenkin talviajalle tyypillisten hitaitten virtausten heikko näkyminen tuloksissa ja mahdollisesti myös liian vähäinen hiukkasten esiintyminen vedessä. Myös RCM-virtausmittareita (Recording current meter) on käytetty talvella, mutta niissäkin hitaimmat virtaukset jäävät havaitsematta (Sarkkula, 1989). Avovesikaudella RCM-mittarit selvittävät luotettavasti vaakasuuntaisia virtauksia, mutta pystysuuntaisten virtausten suhteen ne eivät ole yhtä tarkkoja. Pystysuuntaisen liikkeen selvittämiseen soveltuvat laitteet olisivat hyödyllisiä talven mittauksissa. Erityisesti hyvin hitaita veden liikkeitä niin pysty- kuin vaakasuunnassakin voitaisiin seurata merkkiainekokeilla, joissa merkkiainetta lisätään veteen tietylle syvyydelle ja sen kulkeutumista seurataan esimerkiksi CTD-luotauksen avulla. Muun muassa Likens ja Hasler (1962) tutkivat veden liikkeitä jään alla radioaktiivisen natriumin avulla. Nykyään merkkiainekokeisiin käytetään erityisesti fluoromerkkiaineita. Esimerkiksi Suijlen ja Buyse (1994) seurasivat rodamiinin leviämistä hollantilaisissa järvissä 19 kuukauden ajan ja totesivat sen sopivan hyvin merkkiainekokeisiin. Merkkiainetta seuraamalla voitaisiin muun muassa sekoittuvan kerroksen ja syvemmän alueen rajalla tapahtuvia liikkeitä selvittää luotettavammin kuin pelkkien lämpötilajakaumien perusteella.

KIITOKSET

Kiitos Prof. Kalevi Saloselle hyvästä gradun ohjauksesta ja FM Merja Pulkkaselle neuvoista ja tuesta koko projektin ajan. Kiitos Dos. Timo Huttulalle neuvoista ja työn tarkastamisesta.

KIRJALLISUUS

- Baehr M.M. & DeGrandpre M.D. 2004. In situ pCO₂ and O₂ measurements in a lake during turnover and stratification: Observations and modelling. *Limnol. Oceanogr.* 49:330-340.
- Bengtsson L. 1996. Mixing in ice-covered lakes. *Hydrobiologia* 322: 91-97.
- Hakkari L. & Saukkonen S. 1998. *Päijänne - suomalainen suurjärvi*. Gummerus Kirjapaino Oy, Jyväskylä, 249 s.
- Jonas T., Terzhevik A.Y., Mironov D.V. & Wüest A. 2003. Radiatively driven convection in an ice-covered lake investigated by using temperature microstructure technique. *Journal of Geophysical Research* 108, NO C6, doi:10.1029/2002JC001316.
- Kalff J. 2002. *Limnology*. Prentice-Hall, New Jersey, 536 s.
- Kelley D.E. 1997. Convection in ice-covered lakes: effects on algal suspension. *Journal of Plankton Research* 19: 1859-1880.
- Kenney B.C. 1996. Physical limnological processes under ice. *Hydrobiologia* 322: 85-90.
- Likens G.E. & Hasler A.D. 1962. Movements of radiosodium (Na²⁴) within an ice-covered lake. *Limnol. Oceanogr.* 7:48-56.
- Matthews P.C. 1988. Convection and mixing in ice-covered lakes. Ph. D. Thesis. Cambridge University.
- Matthews P.C. & Heaney S.I. 1987. Solar heating and its influence on mixing in ice-covered lakes. *Freshwater biology* 18: 135-149.
- Mortimer C.H. & Mackereth F.J.H. 1958. Convection and its consequences in ice-covered lakes. *Verh. internat. Ver. Limnol.* 8: 923-932.
- Sarkkula J. 1989. *Measuring and modelling flow and water quality in Finland*. Water Resources Research Center, Budapest, 32 s.
- Stefanovic D.L. & Stefan H.G. 2001. Two-dimensional temperature and dissolved oxygen dynamics in the littoral region of an ice-covered lake. *Cold Regions Science and Technology* 34: 159-178.
- Suijlen J.M. & Buyse J.J. 1994. Potentials of photolytic rhodamine WT as a large-scale water tracer assessed in a long-term experiment in the Loosdrecht Lakes. *Limnol. Oceanogr.* 39: 1411-1423.
- Turner J.S. 1973. *Buoyancy effects in fluids*. Cambridge University Press, Cambridge, 367 s.