

Tartu Ülikool
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Ökoloogia ja maateaduste instituut
Geograafia osakond

Bakalaureusetöö keskkonnatehnoloogia erialal (12 EAP)

**Muutused Peipsi järve jääoludes ja selle mõju veekogu temperatuurirežiimile ja
fütoplanktoni dünaamikale**

Aleksandra Rammul

Juhendajad: Krista Alikas, PhD
Ave Ansper-Toomsalu, MSc

Kaitsmisele lubatud:

Juhendaja:

.....

allkiri, kuupäev

Tartu 2022

SISSEJUHATUS

Kliimamuutused on üks suurimaid globaalseid probleeme, mis mõjutab kõiki geograafilisi üksusi ja põhjustab ka keemilisi ja bioloogilisi muutusi. 20. sajandi teisel poolel on õhutemperatuur tõusnud 1–1,7 °C (Nõges, 2001). Koos temperatuuriga tõuseb paljude keemiliste ja biokeemiliste protsesside kiirus, seega temperatuurimuutuste mõju veeökosüsteemidele on kõige intensiivsem kevadel, mis väljendub varasemas jääminekus, vegetatsiooniperioodi pikenedes ning veekogude produktiivsuse suurenemises; ka kõige märkimisväärses temperatuuri juurdekasv on toimunud kevadel (Haberman jt, 2008). Kuna järve elustik on tugevas sõltuvuses jääperioodi pikkusest ja veetemperatuurist, siis võimaldab termilise režiimi modelleerimine paremini hinnata järve keskkonnaseisundit ja prognoosida selle võimalikke muutusi. (Haberman jt, 2008)

Selles töös vaatame kliimamuutuste mõju just Peipsi järvele, sest Peipsi järv ja tema valgla on tugeva majandustegevuse mõju all ja selles piirkonnas toimuvad muutused mõjutavad väga paljude inimeste elukvaliteeti. Peipsi järve valgala pindala 47,800 km² ning on elupaigaks mitmele tuhandele inimesele. Lisaks, Peipsi järve vetest saavad Eesti elanikud ligi 95% mageveekalasaagist ning Peipsit on peetud Tallinna potentsiaalseks veevarustuse allikaks. (Nõges, 2001). Seega, Peipsi järv on oluline territoorium paljude inimeste jaoks ja kliimaga seotud muutusi tuleb jälgida ja analüüsida, et vajadusel saaks varakult midagi ette võtta ja probleeme vältida.

Bakalaureusetöö eesmärgi saavutamiseks analüüsitakse perioodil 2002-2019 olnud muutusi Peipsi järve jääkatte esinemissageduses. Eesmärk on aga välja selgitada, kas muutuvates jääoludes on muutunud ka Peipsi järve temperatuurirežiim; teha kindlaks, kas aastatel, mil on lühem jääkatteperiood, on märgata ka muutust fütoplanktoni elutegevuses; võrrelda omavahel kontaktmõõtmiseid ja satelliitandmeid ning välja selgitada, mil määral need on teineteist toetavad. Et saavutada eesmärki analüüsitakse 20 aasta jooksul olnud muutusi Peipsi järve jääkatte esinemissageduses.

SUMMARY

The paper studied changes in the duration of ice cover in the lake Peipsi, whether the temperature regime of the lake has changed under changing ice conditions, and whether the duration of ice cover and water temperature have any effect on phytoplankton activity. Data derived from satellite images provide information on products of interest at a higher frequency than conventional monitoring methods and describe the processes in the lake quite accurately, but due to certain limitations (atmosphere, cloudiness), satellite sensors cannot detect all changes in the lake. Also due to the lack of contact measurements, significant changes with the *in situ* method may go unnoticed. Therefore, when assessing the condition of the lake, it is reasonable to combine the results obtained by both methods, as they support each other, create a longer data series and provide a more comprehensive picture of what is happening. In order to better assess the state of the lake's environment and to anticipate possible changes, the quality of the data could first be improved, for example by increasing the frequency of stationary measurements or receiving signals from satellite sensors.

The result of the study shows that there has been a downward trend in the ice regime of recent years - the ice-free period has lengthened and the dates for the disappearance of ice cover have shifted to an earlier time. However, this does not mean a significant warming of the water temperature. In the course of the study, we found that in the years with a shorter ice cover period, the water temperature in April was also generally warmer, but it could be in the range of either 5 - 10 °C or 10 - 15 °C vs 0 - 5 °C in colder years.

In contrast, the dynamics of phytoplankton are less strongly related to water temperature or ice regime. Outbreaks of phytoplankton have spread in different years, which are not always explained by high water temperatures or the earlier disappearance of the ice cover. Generally the highest phytoplankton concentrations are typical of the lake Pihkva and Lämmijärv, which previous studies also confirm, where both average and maximum concentrations are higher than in the lake Suurjärv. Obviously, the indicators studied in the paper are not the only ones that affect the dynamics of phytoplankton: wind speed, the number of sunny days, the dominant species in the lake area, etc. can also play an important role. In order to better assess the state of the lake's environment and predict possible changes in it, these parameters could be included in the research in the future to better understand how the length of the ice cover period actually affects changes in phytoplankton life or what factors affect phytoplankton abundance.

SISUKORD

SISSEJUHATUS	2
SUMMARY	3
1 KIRJANDUSE ÜLEVAADE	5
1.1 Globaalsed klimamuutused	5
1.2 Kliimamuutused Eestis	5
1.3 Kliimamuutuste jälgimine	6
1.4 Järved, kui kliimamuutuste indikaatorid.....	7
1.4.1 Järvede CCI projekt.....	8
2 MATERJAL JA METOODIKA	9
2.1 Uuritav veekogu.....	9
2.1.1 Peipsi järve temperatuuri- ja jäärežiim	9
2.1.2 Fütoplankton.....	11
2.2 Satelliitkaugseire	12
2.2.1 Satelliitandmete kombineerimine	12
2.2.2 Pinnavee teetemperatuuri ja jääkatte mõõtmine	14
2.2.3 Fütoplanktoni ja klorofüllü a kontsentratsiooni mõõtmine.....	15
2.2.4 Analüüsitud tunnused	15
2.3 Kontaktmõõtmised	16
3 TULEMUSED JA ARUTELU	18
3.1 Chla andmete valideerimine.....	18
3.2 Jääolud	20
3.3 Veetemperatuur.....	23
3.4 Fütoplanktoni dünaamika	24
3.4.1 Lämmijärv	24
3.4.2 Pihkva järv	26
3.4.3 Suurjärv	28
KOKKUVÕTE	31
KASUTATUD KIRJANDUS	32

1 KIRJANDUSE ÜLEVAADE

1.1 Globaalsed klimamuutused

Geoloogiline ajaskaala annab tunnistust keskkonnamuutustest, mis on mõjutanud kõiki Maa piirkondi. Nii mereäärne linn geoloogilises minevikus, nõ muundus ühest keskkonnast teise: alates sügavast ookeanist kuni liivase kõrbeni, tihedast metsast jääajajärgse tühermaani. Selliste keskkonnamuutuste põhjusteks on olnud nähtused nagu kliimamuutused, mandrite ränne, mägede teke ja erosioon, ookeanide ümberkorraldamine, päikeseenergia võimsuse kõikumised ja isegi suurte meteoriitide katastroofilised põrkumised maapinnaga. Need nähtused on toonud kaasa muutusi kohalikul, piirkondlikul ja ülemaailmsel tasandil. Ent paljud keskkonnamuutused ei ole inimese kontrolli all mitmed uuringud ja vaatlusread aga kinnitavad, et meie planeedi kliima muutused on osaliselt tingitud inimtegevusest. Nende näideteks on tööstusest põhjustatud atmosfääri koostise muutused; ehitusest põhjustatud erosioon ja ladestumine, põllumajanduse poolt põhjustatud elukeskkonna keemiline reostus ja hüdrogeoloogilise tsükli häired. Kuna maailma rahvaarv kasvab ja tehnoloogia areneb, muutub inimtegevus üha tugevamaks keskkonna- ja kliimamuutuste teguriks ja need muutused toimuvad tõenäoliselt aina kiiremini nii piirkonna kui maakera tasandil. (Curran, Foody, 1994)

Globaalsed keskmised õhutemperatuurid on tõusnud viimase sajandi jooksul ning see tõus kiireneb iga aastaga. Arktilised piirkonnad sulavad praegu kuni kaks korda kiiremine, kuid nii arktiliste kui ka maismaal olevate jääliustike hulk kahaneb pidevalt. 2014. aastal „Valitsusvahelise kliimamuutuste paneeli“ (IPCC) aruandes leiduvate mudelite prognoosid ennustavad erinevate stsenaariumite korral paarikraadist temperatuuri tõusu ning maailmamere veetaseme tõusu ligikaudu 0,5 m võrra aastaks 2100. (Saul jt, 2014; IPCC, 2014)

1.2 Kliimamuutused Eestis

IPCC raporti järgi on Eestis aastane õhutemperatuur tõusnud 1,0 – 1,7 0C ja kuulub piirkonda, kus on viimastel aastakümnetel keskmine õhutemperatuur kõige rohkem tõusnud (IPCC, 2014). Muutuv kliima mõjutab oluliselt nii ilma, kui ka elukeskkonda. Eelmisel sajandil teisel poolel kõrgemad temperatuurid olid peamiselt tuvastatud jaanuarist maini ehk mõju on kõige intensiivsem talvel ja kevadel (Saul jt, 2014). Selliste nähtuste tulemuseks on pehmemad talved, varasem kevade saabumine ja vegetatsiooni perioodi pikenemine ja sellele tulenevad tagajärjed. Näiteks soojemate talvede tõttu on saagenenud äärmuslikud ilmastikunähtused nagu suurenenud tormisus, mis võib omakorda põhjustada sagedasemaid ning suuremaid üleujutusi

rannikualadel. Seevastu vegetatsiooniperioodi pikenemine võib põhjustada aastaegade pikkuse muutust, mis mõjutab kõige rohkem põllumajandust. Sellel võib olla nii positiivseid (saagikuse kasv tänu soojematele ilmadele) kui negatiivseid (põud, taimehaiguste levik jne.) tagajärgi. (Sepp jt, 2018; Saul jt, 2014)

1.3 Kliimamuutuste jälgimine

Kliimamuutuste tuvastamiseks tuleb hinnata keskkonnaseisundit, et mõista keskkonnategurite vastastikmõjusid. Arvesse tuleb võtta nii eluslooduse kui ka eluta looduse komponente, sest keskkonnaseisundi hindamisel tuleb vaadelda terviklikku keskkonnanäitajate süsteemi. (Saul jt, 2014)

Kliimamuutuste tuvastamiseks ja kirjeldamiseks kasutatakse Globaalse Kliimavaatluse Süsteemi (Global Climate Observing System, edaspidi GCOS) poolt määratud olulisi kliimamuutujaid ehk *Essential Climate Variables* (ECV). ECV on füüsikaline, keemiline või bioloogiline muutuja või seotud muutujate rühm, mis aitab kaasa Maa kliima ja kliimamuutuste iseloomustamisele. ECV andmestikud sisaldavad pikaajalisi empiirilisi andmeid, mis on vajalikud kliima kujunemise mõistmiseks ja prognoosimiseks, kliimasündmuste seostamiseks, riskide hindamiseks jne. GCOS andmete kohaselt on 54 atmosfääri, maa ja ookeani muutujat. (GCOS (a))

Inimeste suurenenud keskkonnateadlikkus pidevalt tõstab huvi keskkonnaseisundi teabe järele. Andmeidkeskkonnaseisundi või keskkonda mõjutavate tegurite kohta kogutakse palju, kuid sageli nende kättesaamine on raskendatud või need on tavakasutajatele arusaamatud jne. (Saul jt, 2014) Seetõttu on ECV-d teaduslikud terviklikud andmed, mis kajastavad mõõdetavate tegurite vahel põhjuslikke seoseid ja on üheselt mõistetavad (GCOS (a)).

ECV-d valitakse järgmiste kriteeriumite põhjal:

- a) asjakohasus: muutuja on kliimasüsteemi ja selle muutuste iseloomustamiseks kriitiline;
- b) teostatavus: muutuja andmete vaatlemine või tuletamine on tehniliselt teostatav, kasutades teaduslikult tõestatud meetodeid.
- c) kulutõhusus: muutuja andmete genereerimine ja arhiveerimine on taskukohane ja tugineb peamiselt koordineeritud teaduslikult tõestatud vaatlussüsteemidele ja tehnoloogiatele, kaasatakse võimalusel ka ajaloolisi andmekogumeid. (GCOS (a))

Käesolevas töös vaatame Euroopa Kosmoseagentuur CCI (Climate Change Initiative) projekti raames tuletatud olulisi kliimamuutujaid. CCI ECV-d on genereeritud satelliitandmetest, need on valideeritud sõltumatute andmekogumite alusel, neil on kõrge jälgitavus ja kooskõlalisus

ning need sisaldavad kvantitatiivseid mõõtemääramatuse hinnanguid. Kokku ESA CCI on välja töötanud 21 ECV-d, käesolev töö keskendub põhjalikumalt ainult järvede oluliste kliimamuutujate alamgruppi. (ESA Climate Office (a))

1.4 Järved, kui kliimamuutuste indikaatorid

Järved, sisemered ja nende veekogude vesikonnad on keskkonna- ja kliimamuutuste olulised karakteristikud. Järvesid on vaadeldud kliimamuutuste „markeritena“ nii otseselt kui ka kaudselt valgala toimuvate muutuste kaudu – suur osa järve ökoloogilisest seisundist oleneb sellest, mis toimub valglal. Vee hulga pikaajalised muutused suurtes ja suure valgala järvedes on üsna ilmekad integraalsed kliima muutumise näitajad nii oma valgala piires, kui ülemaailmses kliima regulatsioonis, seega tänapäeva kliimamuutuste diskussiooni arvestades eriti aktuaalsed. Seetõttu järvedes toimuvate protsesside mõistmine ning globaalne ja järjepidev kliimaandmete kogumine on järve ja kogu tema valga veekogude hea ökoloogilise seisundi saavutamiseks ja säilitamiseks ning kliimamuutuste mõjude hindamiseks ja leevendamiseks hädavajalik. (ESA Climate Office (b); Haberman jt, 2008) Ka Euroopa Liidu veepoliitika raamdirektiiv sätestatab, et kõik Euroopa riigid on kohustatud jälgima ja hindama järvede ökoloogilist seisundit. (EL veepoliitika raamdirektiiv (2000/60/EÜ)).

Kliimamuutuste tuvastamiseks tuleb hinnata veekogus selle ökoloogilist seisundit ehk teatud bioloogilisi ja füüsikalis-keemilisi omadusi (Alikas jt, 2015). Eestis seaduse järgi peab kasutatud kvaliteedinäitajate arv olema vähemalt seitse (Keskkonnaministeerium, määrused 2009). Järvede ökoloogilise seisundi hinnang põhineb fütoplanktoni, taimestiku ja põhjaloomastiku ning veekvaliteedi näitajatel. Fütoplanktoniga seotud muutusi, nagu klorofüll (chl-a) kontsentratsioon, fütoplanktoni kogubiomass (TBM) ja vee peegeldustegur, peetakse põhilisteks järvede ökoloogilise seisundi näitajateks (Alikas jt, 2015). Kalastiku seisundiklassi piirid ei ole veel selged ja kalastikku ei ole hinnangu andmisel arvestatud (Eesti keskkonnanäitajad 2012). Samas olud, mis valitsevad järve valglal, mõjutavad oluliselt järvevee koostist, kogust ja veerežiimi, samuti elustikku, seega peavad olema uuritud samamoodi. Näiteks metsast ja rabadest lisandub humiinained, põldudelt mullaosakesi, väetisi ja taimekaitsevahendeid, asulatest heitvett (Laarmaa jt, 2019).

Järveuurijate andmetel oli enamik meie järvedest eelmise sajandi alguses veel väga heas seisundis, järvede ökoloogilist seisundit peeti tasakaalulissks veel 1950.aastateni. Sealtmaalt alates suurenes eutrofeerumine inimtegevuse tõttu oluliselt. Kord järvedesse sattunud toitained jäävad suuremas osas järve ja põhjustavad järve vananemist. Üsna paljude

järvede seisund on praeguseks pöördumatult halvenenud ja järvesid tervendama pole veel korralikult asutud. (Kuresoo, 2015)

1.4.1 Järvede CCI projekt

Järvede CCI projekti üldeesmärk on koostada ja valideerida ühtne terviklik andmekogum, millega astutaks suur samm edasi Maa kaugseireandmete laiema kasutuselevõtu suunas limnoloogilistes uuringutes. Projekt on suunatud siamaani kõige pikaajalisema andmerea loomisele satelliitandmete pealt, võimaldamaks genereerida valitud järve ECV-de parameetreid, kontrollida nende headust valideerimise meetodil ja demonstreerida need andmed ka tavakasutajale saadaval kujul. Järvede oluliste kliimamuutujate tuletamine satelliitandmetest operatiivsete ja nendele eelnenud satelliidisensorite abil nõuab erinevate kaugseiretehnoloogiate, sealhulgas termilise ja optilise seire ning kõrguse mõõtmiseks altimeetri kasutamist. ECV-de genereerimiseks kasutatud tehnoloogia rakendab iga muutuja kalibreerimiseks ja valideerimiseks erinevaid andurite kombinatsioone ja metoodikaid. (ESA Climate Office (b))

Järvede oluliste muutujate andmestik koosneb kuuest parameetrist:

- **Järve veetase** – *Lake Water Level (LWL)*: fundamentaalne näitaja vee juurdetuleku ja veeкао vahelise tasakaalu mõistmiseks.
- **Järve vee hulk** – *Lake Water Extent (LWE)* : näitaja, mis kirjeldab veerežiimi liustiku piirkondades (järve laienemine) ja ariidsetes piirkondade (põud, veepuudus), vee hulk ja selle muutumine on seotud kohaliku kliima omadustega.
- **Järve pinnavee temperatuur** – *Lake Surface Water Temperature (LSWT)*: näitaja, mis on korreleeritud kohaliku õhutemperatuuriga ja kirjeldab järve temperatuurirežiimi ja sellest sõltuvaid biogeokeemilist tsüklit ja hooajalisust.
- **Järve jääkate** – *Lake Ice Cover (LIC)*: näitaja, mis kirjeldab järve jääolusid, tuvastades järkjärgulisi muutusi kliimamuustrites ja hooajalisuses.
- **Veepeegeldustegur** – *Lake Water-Leaving Reflectance (LWLR)*: otsene biogeokeemiliste protsesside ja elupaikade indikaator veesamba nähtavas osas (nt hooajalised fütoplanktoni biomassi kõikumised) ning ekstreemsete sündmuste sageduse indikaator (maapealse äravoolu tipphetk, vee segunemistingimuste muutumine).
- **Järve jääpaksus** – *Lake Ice Thickness* on samuti osa ECV-st, kuid pole veel projekti kaasatud. (ESA Climate Office (b))

2 MATERJAL JA METOODIKA

2.1 Uuritav veekogu

Peipsi järv on pindalalt Eesti suurim järv ning Euroopas pindalalt neljas järv. Peipsi järvest 1570 km² ehk 44% kuulub Eestile ning ülejäänud Venemaale. Peipsi järve valgla suurus koos järvega on 47 800 km², millest 16 323 km² jääb Eesti, 27 917 km² Venemaa, 3560 km² Läti ning väike osa lõunas Valgevene piiridesse. Peipsi järv tähendab nii Peipsi järvistut (põhjapoolne ja suurim osa – Suurjärv, lõunapoolne Pihkva järv ja neid ühendav väinaline Lämmijärv) kui ka ainult Suurjärve. Antud töös keskendutakse Peipsi järvistule. Peipsi järve veepeegli pindala on keskmise veetaseme juures 3555 km², veemaht 25 km³ (vesi vahetub seal kahe aasta jooksul) (Laarmaa jt, 2019), keskmine sügavus 7,1 m ja suurim sügavus 15,3 m (Lämmijärv). Pinnavee pH on viimastel aastatel olnud keskmiselt 8,28, vee värvus 30-80°, läbipaistvus 1,5 m ja keskmine hapnikusisaldus 10 mg/l. (Haberman jt, 2008)

Peipsi järv on kihistumata eutroofne järv, kus Suurjärv on mõõdukalt eutroofne, Pihkva järv tugevalt eutroofne või hüpertroofne ning Lämmijärv on Pihkva ja Suurjärve vahepealne. Peipsi vesi, eriti järve lõunaosas, on suhteliselt rikas biogeenidest ehk toiteainetest (viimastel aastatel üldfosforit keskmiselt 49 mg/m³ ja üldlämmastikku 710 mg/m³). Aastas kandub koos veega järve arvutuslikult 759 t fosforit ja 16 857 t lämmastikku. Peipsi järve seisundit mõjutab enim toiteainete sisaldus, mis on viimastel aastatel olnud suhteliselt stabiilne ja sõltunud pigem aasta veerohkusest ja suvisest temperatuurist kui inimõju muutustest (Eesti keskkonnanäitajad 2012). Sagedasemaks ja intensiivsemaks on muutunud planktonvetikate põhjustatud veeõitsengud; samal ajal vaesub loomne plankton. Muidu Peipsi on produktiivne järv. Fütoplanktoni biomass on viimastel aastatel olnud vegetatsiooniperioodil keskmiselt 10 g/ml, zooplanktoni biomass 1,5 g/m³, lisaks põhjaloomastiku biomass paljuaastase keskmisena 12,3 g/m². (Haberman jt, 2008)

2.1.1 Peipsi järve temperatuuri- ja jäärežiim

Peipsi järv asub parasvööndi põhjaosas väga muutlike ilmastikutingimustega piirkonnas. Aasta termineline tsükkel jagatakse siin viieks perioodiks: kevadine soojenemine, suvine soojenemine, sügisene jahtumine, talvine jahtumine ja talvine soojenemine. Soojus- ja jäärežiimi omapärasusi määravad peale asendi ka suur pindala ja väike sügavus. Käesolevas töös vaatame põhjalikumalt kevadist soojenemist.

Jää paksus kasvab kuni veebruari lõpuni-märtsi alguseni (saavutades siis ka oma maksimumi 50-60 cm) ja märtsi lõpus hakkab päikesekiirguse intensiivsuse suurenemise tõttu sulama. Veekiht hakkab soojenema ja veetase hakkab aeglaselt tõusma. Keskmiselt kulub jää sulamiseks 2-3 nädalat, mõnikord aga terve kuu. Tavaliselt sulab viimane jää lõplikult järve idakalda lähedal või kirdenurgas. Viimase 50 aasta jooksul soojemate talvede tõttu hakkas jää kaduma varem ja vähenes ka keskmine jääpäevade arv. Samas ei muuda üldine soojenemine jääkatte kestust külmadel talvedel, mõju avaldub ainult jääkatte paksusele, mis viimaste aastate jooksul hakkas vähenema.

Peipsi kolme osa soojus- ja jäärežiimis esineb mõningaid erinevusi. Nii Suurjärv olles suurim ja sügavaim osa akumulatsioon suvel kõige rohkem päikesesoojust, mistõttu ta jahtub aeglasemalt ja jäähtub kõige hiljem. Ka kevadine jääst vabanemine on hilisem, kevadine ja suvine soojenemine aeglasem ning temperatuurikihisus lainetuse mõjul väike ja ebastabiilne. Soojenemisperioodil on Suurjärv jahedam kui järve teised osad, jahtumisperioodil aga soojem. Pihkva järv soojeneb talvel rohkem kui Suurjärv, vabaneb kevadel jääst kiiremini ja veidi varem ning soojeneb kiiremini, aga jahtub samuti kiiremini. Lämmijärv on kõige madalam, tema soojusrežiim sarnaneb Pihkva järve omaga, kuid kahe ümbritseva järve arvelt toimub pidev veevahetus. Lämmijärv vabaneb jääst keskmiselt 20. aprilliks, Pihkva ja Suurjärv aprilli lõpuks. Mõnel aastal läheb kauem; mai esimestel päevadel on aga Peipsil jääd veel üsna tihti. Soojematel talvedel, mil jääminek satub märtsikuusse, lüheneb jääperiood kuni kahe nädala võrra. Karmidel talvedel ei ole kliima soojenemine jääpäevade arvu oluliselt muutnud. Varasema jää kadumisega suuri muutusi soojusrežiimis ega enneaegset veetemperatuuri tõusu tavaliselt ei tule.

Jääst vabanenud kaldaäärsetes piirkondades algab kohe intensiivne soojenemine. Need piirkonnad on Pihkva, Lämmijärv ja Suurjärve alumine osa, kuhu tuleb soojemat vett ka Pihkva ja Lämmijärvest. Suurjärve keskosa veemass nõuab soojenemiseks rohkem aega. Vahepeal võib veetemperatuur neis tõsta 5-8 °C-ni, kuigi mõne kilomeetri kaugusel on veel jää. Samas jää all võib kevadeks veetemperatuur ka tõusta 3-4 °C. Kevadise soojenemise perioodil on veetemperatuuri erinevused järve eri osade vahel suured – 8-10 °C.

Kevadel ületab veetemperatuur kaks olulist piiri. Esimene on 4 °C – see on piir, kui vesi veekogus saavutab oma maksimaalse tiheduse (vastavalt ka massi) ning hakkab vajuma põhja, mille tulemusena toimub sügavamate ja pinnapealsete veekihtide segunemine. Teine oluline piir on 10 °C – see on järve bioloogilise suve piir kevadega. Suureneb vetikate produktsioon, suurem vetikate kontsentratsioon suurendab omakorda päikesekiirguse

neeldumist vees. Siis asendub kevadine planktonikompleks suvisega ja hakkab intensiivselt arenema suurtaimestik.

Järgneva 50 aasta jooksul toimub nihe bioloogilise ärkamise ahelas, mis toob endaga kaasa ka fütoplanktoni õitsengute aegade nihkumist. Veetemperatuuri 5 °C ületamise piir hakkab kalendris ettepoole nihkuma (sest ka külmadel talvedel hakkab jää varem kaduma), kuid 10 °C saavutatakse ikka samal ajal. Need liigid, kelle bioaktiivsuse signaaliks on 5 °C, ärkavad varem, kuid teised, kelle signaaliks on 8-10 °C, oma ajastust ei muuda. (Haberman jt, 2008)

2.1.2 Fütoplankton

Väheliikuvaid ja/või mikroskoopilisi elanikke nimetatakse planktoniks ehk hõljumiks. Plankton jagatakse eluviisi järgi kolmeks suureks rühmaks: orgaanilist ainet tootev fütoplankton; fütoplanktonit, baktereid ja iseenast tarbiv zooplankton ning neid mõlemaid ja iseenda jäänuseid lagundav bakterplankton. Fotosünteesivad tsüanobakterid (sinivetikad) loetakse samuti fütoplanktoni koosseisu (Laarmaa jt, 2019). Vetikate ehk fütoplanktoni taseme mõõtmiseks kasutatakse tavaliselt kolme parameetrit: vee läbipaistvus; klorofüll a (vetikate rakkudes olev pigment); fosfor ja lämmastik (näitab veekogu toitelisust) (Phillips jt, 2003).

Vee läbipaistvus sõltub kõige rohkem valgustatusest ja vees lahustunud ainete ning lahustumata ainete ehk sestoni hulgast vees. Mida rohkem sestonit, seda väiksem on vee läbipaistvus ja vastavalt sellele ka peegeldustegur. Seston koosneb hõljuvatest osakestest, mis hajutavad valgust ja vähendavad vee läbipaistvust, suurendades hägusust. Seisuvetes koosneb seston peamiselt planktonist, muda- ja liivaosakestest. Läbipaistvusest sõltub, kui sügaval vees saab fotosüntees toimuda, kuna fütoplankton vajab päikeseenergiat fotosünteesi toimumiseks, elab ta veekeskkonna ülemistes kihtides, sest väga tumedas või häguses vees ei ulatu valgus meetrist-paarist sügavamale. (Haberman, Laugaste, 2005; Laarmaa jt, 2019)

Eesti rannikuvee kehva seisundi on peamiselt põhjustanud sinna aastakümnete jooksul heidetud ja kogunenud toit- ja reoained, mis on põhjustanud rannikuvee eutrofeerumise. Toitained satuvad veekeskkonda peamiselt punktreaustallikatest, nagu tööstustegevus, reoveepuhastusjaamad ja prügilad, ning hajusaallikatest, nagu väetised põllumajanduses. Veereostust põhjustavad veekogudes peamiselt fosfor ja lämmastik, mis kutsuvad esile massilisi vetikate õitsenguid ning vastavalt ka vee läbipaistvuse langust. Seeläbi taimestiku liigiline koosseis ja elustik hakkab vaesuma – zooplanktoni jaoks vajalikud elukohad vähenevad. Hetkel varasema tasakaalu saavutamine on keeruline kui mitte võimatu ning kui

veekogude toitainetega rikastumise tendents jätkub, kehv veekogude seisund võib alles süveneda. (Saul jt, 2014)

Samamoodi iseloomustab klorofüll a (chl a) kontsentratsioon elusaine hulka vees: mida suurem ta on, seda rohkem on vees fütoplanktonit. Klorofüll a on tunnistatud lihtsaimaks ja kasulikuks fütoplanktoni biomassi näitajaks. Chl a sisaldus näitab kõige selgemini väljendunud dünaamikat vegetatsiooniperioodi jooksul, selle keskmine kontsentratsioon pinnaveeproovides jääb tavaliselt vahemikku 4–38 mg/m³. (Nõges, 2001) Fütoplanktonis nagu ka teisteski fotosünteesiga tegelevates organismides neeldub valgus tänu pigmentidele. Kõige tähtsaimaks pigmendiks on klorofüll a, mis paikneb vetika rakkudes tülakoidi membraanis, ja mille neeldumismaksimumid on 440 ja 675 nm juures, mistõttu on see pigment roheline. (Nõges, 2001; Richardson, 1996)

2.2 Satelliitkaugseire

Mure keskkonna muutuste pärast on kasvamas ja on viinud vajaduseni jälgida ja iseloomustada mitmesuguseid keskkonnanähtusi piirkondlikul ja globaalsel tasandil. Nendel tasanditel on kaugseire sageli ainus praktiline lähenemisviis andmete hankimiseks. Lisaks pakub kaugseire üldjuhul digitaalset andmeid „kaardi-taolises“ formaadis, mis on asjakohane ja on kõige sobivam keskkonnamuutuste tuvastamiseks ja jälgimiseks. (Curran, Foody, 1994)

Alguses keskendus kaugseire kohalikule tasandile ehk väiksemale mastaabile ja ainult andis teavet, mida sai koguda ka traditsiooniliste vahendite abil, rõhuasetustega mugavusele, täpsusele ja kuludele. Erinevalt kontaktmõõtmistest, kui proovid võeti ainult teatud punktides ja kindla tihedusega, satelliitandmed võimaldasid seireandmete kvaliteeti oluliselt parandada tänu suuremale ruumilisele katvusele ja tihedamale andmete saamisele. Lisaks on suurte territooriumide korral kaugseireandmed võrreldes tavaliste seireandmetega kulutõhusamad. Tänapäeval liiguvad kaugseire tegevused põllu ja metsa mastaabist terve mandri mastaabi poole, kus kaugseire sensorid on võimelised väga täpselt tuvastama ja hinnangu andma paljudele keskkonna nähtustele. Veelgi olulisem on see, et kaugseire andmeid saab kasutada keskkonnamudelite koostamiseks. Teisisõnu on kohalikus mastaabis kaugseireandmed kasulikud, kuid piirkondlikul ja globaalsel tasandil need on ülitähtsad. (Curran, Foody, 1994) Sel põhjusel tänapäevaks on kosmoses juba ca 1000 suurt satelliiti, mis kannavad kaasa ka keskkonnaandmete saamise jaoks vajalikke andureid ja sensoreid (Zhu jt, 2017).

2.2.1 Satelliitandmete kombineerimine

Lakes CCI projekti üldeesmärk on koostada ühtne andmekogum, mis hõlmaks erinevatelt satelliitidelt saadud andmed perioodil aastast 1991 kuni tänaseni loomaks pikima olemasoleva kaugseireandmete andmerida (ESA Climate Office (b)).

Keskkonna kaugseire võtab alguse 1972. aastal, kui NASA saatis orbiidile esimese Maa-seire satelliidi Earth Resources Technology Satellite (ERTS) eesmärgiga uurida ja jälgida kõigepealt meie planeedi maismaad. Hiljem nimetati satelliit ümber Landsat-1ks. Landsat 1 töötas kuni 1978. aastani. (Landsat Science – Landsat 1) ERTS-1-le järgnesid juba spetsiaalselt merekeskkonna uurimiseks kohandatud sensorid, nt CZCS (Coastal Zone Color Scanner), OCTS (Ocean Color and Temperature Scanner), SeaWiFS (Sea-Viewing Wide Field-of-view Sensor), POLDER (Polarization and Directionality of Earth's Reflectances), MODIS (moderate resolution imaging spectroradiometer), GLI (Global Imager) ja MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer) (Mobley jt, 2015).

1980. aastate alguses ESA töötas välja esimese Euroopa kaugseiresatelliidi ja spetsiaalse instrumendi, mida nimetatakse SAR-ks (Synthetic Aperture Radar). ERS-1 SAR-sensoriga saadeti kosmoses 1991. aastal ja sellele järgnes ERS-2 1994. aastal. 2002. aastal saatis ESA orbiidile Envisati, Euroopa võimsaima Maa seire satelliidi, mille pardal paiknes MERIS sensor. Satelliidil ENVISAT paiknenud MERIS (*MEDium Resolution Imaging Spectrometer*) oli esimene siseveekogude seireks sobiv sensor just piisava spektraalse ja ruumilise lahutuse tõttu (täis- resolutsiooni piksel 300 m). Põhimõtteliselt Envisat oli järgmise kümne aasta jooksul Maa seire võtmelemendiks. (ESA – Remote Sensing Data) Järgmisena saadeti orbiidile 2013. aasta algul Landsat-8, mis koosnes kahest instrumendist: TIRS (Thermal Infrared Sensor) ja OLI (Operational Land Imager) sensor, mille parameetrid lubavad seda kasutada ka optiliselt keerukamate ranniku- ja sisevete uurimisel (Landsat Science – Landsat-8).

Sellele järgnesid Sentinel sarjast satelliidid, mis hõlmavad endas kuut missiooni. Järvede monitooringuks kasutatakse peamiselt ainult kolme Sentinel-1, Sentinel-2 ja Sentinel-3 missiooni (ESA – Sentinel Successful Stories, 2022). Esimene Sentinel-1A saadeti orbiidile 2014. aastal ja Sentinel-1B 2016. aastal. Tänu sellele, et nad võivad mõõta väga erinevates režiimides võib neid kasutada jääseireks, kiireks reageerimiseks hädaolukordades nt üleujutuste, maavärinate või muude looduskatastroofide korral. Kuigi MERIS on 2012. aasta alguses oma töö lõpetanud, on võimalik alates 2016. aastast saada andmeid spetsiaalselt veekogude jälgimiseks mõeldud satelliidilt Sentinel-3A, millele lisandus 2018. aastal Sentinel-3B. Need satelliidid võimaldavad peaaegu igapäevast ülevaadet siseveekogudest. Sentinel-3 täidab kõige keerukamat missiooni ja annab teavet ookeanidest, maapinnast, jääoludest ja

atmosfäärilise tervikuna, võimaldades mõista globaalseid muutusi Maa kliimas. 2020. aastal jõudis orbiidile ka Sentinel-6 sarjast satelliit (ESA – Sentinel-6), mis on mõeldud ookeanide veetaseme määramiseks radaraltimeetri abil ja Sentinel-3 abil veekogude jaoks kogutava info täiendamiseks. (Reinart, Vain, 2015, Dörnhöfer, Oppelt,

Veetemperatuuri mõõtmiseks kasutati järgmiste instrumentide kombinatsiooni: ATSR-2, AATSR, AVHRR-3. Jääkatte tuvastamiseks ja mõõtmiseks kasutati MODIS sensorit ja chl a mõõtmiseks kombinatsiooni SeaWiFS, MODIS, MERIS, VIIRS, OLCI sensoritest. (ESA: Lakes CCI, 2020)

Info selle kohta, mis satelliite ja mis sensoreid kasutati iga produkti tuletamiseks on koondatud tabelisse Tabel 1:

Produkt	Satelliit	Instrument	Lahutusvõime	Sagedus	Ajaline kestvus
LIC	Terra/Aqua	MODIS	250 m	Iga päev	2000 - tänapäev
	Suomi NPP	VIIRS			
	Sentinel-3	OLCI-SLSTR A/B			
	Sentinel-1	C-band SAR			
LSWT	ERS-2	ATSR-2	0.05 °C	Iga päev	1995 - tänapäev
	Envisat	AATSR			
	Metop-A/B	AVHRR			
	Terra	MODIS			
LWLR	Envisat	Meris	300 m -1100 m	1-3 päeva tagant	2002 - tänapäev
	Sentinel-3	OLCI A/B			
	Aqua	MODIS			
	Suomi NPP	VIIRS			
	Orbview-2	SeaWIFS			

Tabel 1. Satelliidisensorid kasutatud veekogude seireks

2.2.2 Pinnavee teetemperatuuri ja jääkatte mõõtmine

Satelliidisensorid mõõdavad looduslikku kiirgust, mis on peegeldunud uuritavatelt objektidelt või nende lähiümbrusest, näiteks maa, ookeani ja jää pinnalt. Peegeldunud päikese- ja soojuskiirgust nimetatakse passiivseteks sensoriteks ning nende detektorid on konstrueeritud mõõtma kiirgust kindlates elektromagnetkiirguse lainelades. (ESA Climate Office (a))

Landsat-8 satelliidi pardal asuv termoinfrapunasensor on peamine andmeallikas järvede pinnavee temperatuuri mõõtmiseks. See mõõdab soojusvoogusid ja aurustumiskiirust

väljastab lõpp-produktina järve pinnavee temperatuuri. (ESA - Algorithm Theoretical Basis Document, 2019)

Jääkatte tuvastamine on arvutuslikult lihtne lävepõhine algoritm, mis kasutab MODIS-i ribasid 2 (NIR e. lähiinfrapuna), 3 (sinine) ja 4 (roheline). Nende kolme sagedusriba lävi on optimeeritud tänu masinõppele. Kui kõik kolm tingimust on täidetud: riba 2 > 0,06, riba 3 > 0,11, riba 4 > 0,085 tegemist on jääga. (ESA - Algorithm Theoretical Basis Document, 2019)

2.2.3 Fütoplanktoni ja klorofüllü a kontsentratsiooni mõõtmine

Veekaugseire abil on võimalik saada informatsiooni ka vee värvuse kohta. Vee värvus on mõjutatud veekogus leiduvatest nn optiliselt aktiivsetest ainetest (lahustunud orgaaniline aine, mineraalne hõljum ja fütoplankton), mis neelavad ja hajutavad veesambasse tunginud kiirgust neile iseloomulikul viisil, kujundades veepinna kohal mõõdetava peegeldusspektri. Need optiliselt aktiivsed ained (OAA) neelavad intensiivsemalt lühema lainela valgust ning veekogu neeldumisspektri määravad lainepikkusest sõltuvad neeldumiskoefitsiendid defineeritakse suhtelise kiirgusvoo vähenemisega kindla ühikulise paksusega kihi kohta. Ühtlasi käsitletakse OAAsid veekaugseires ka kui vee kvaliteeti mõjutavaid aineid. (Kangro ja Asuküll, 2014)

Veekogude uurimisel eristatakse kahte veetüüpi: Case 1 ja Case 2. Esimesse tüüpi kuuluvad puhtamad ja selgemad veekogud, nt ookean, milles optiliselt aktiivsete ainete sisaldus on minimaalne ja mille optilisi omadusi määrab peamiselt ainult fütoplanktoni kontsentratsioon. Peipsi järv on Case 2 veekogu, kus vee optilisi omadusi mõjutavad märkimisväärselt lisaks fütoplanktonile veel muud koostisosad. (Mobley jt, 2015)

2.2.4 Analüüsitud tunnused

Alates satelliiti orbiidile saatmisest ja kogu selle eluea vältel registreeriti teatud sagedusega iga seirekoha andmed mitmete füüsikaliste, hüdrobioloogiliste, hüdrokeemiliste jt näitude kohta.

Andmeanalüüsis kasutame järgmiseid tunnuseid:

Veetemperatuur (lake_surface_water_temperature), mille väärtused varieeruvad vahemikus -200-st kuni 5000 K. Paralleelselt uuritakse ka temperatuuri kvaliteeditaset (lswt_quality_level), millel on 6 võimalikku väärtust: 0 – ei ole andmeid, 1 – halvad andmed, 2 – väga halb kvaliteet, 3 – madal kvaliteet, 4 – keskmine kvaliteet, 5 – hea kvaliteet. Vastavalt

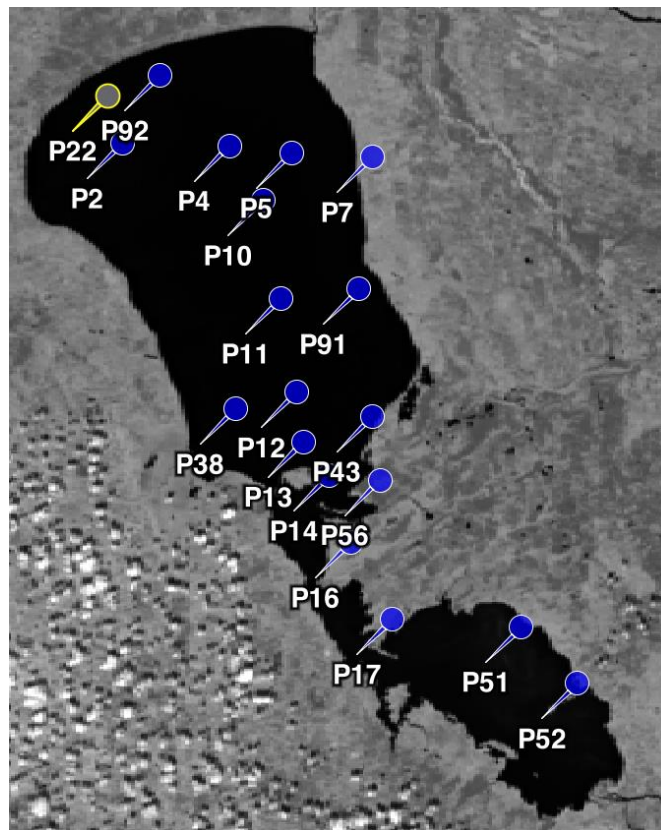
sellele kvaliteeditasemele kõlbavad edasisse uuringusse ainult need temperatuurinäitused, mille kvaliteeditase on 4 või 5. (ESA: Lakes CCI, 2019; 2020)

Jääkate (lake_ice_cover), millel on 4 võimalikku väärtust: 1 – vesi, 2 – jää, 3 – pilved, 4 – halb kvaliteet. Töös kasutati andmeid, mille väärtus on 2 (ESA: Lakes CCI, 2019). Kontrollimaks, kas teatud päeval teatud seirekohas esines jääd või mitte kasutasime taustakontrolliks veel NASA Worldview Snapshots MODIS RGB pilte, mis on vabalt kättesaadavad veebis.

Chl a kontsentratsioon (chla), mille väärtused varieeruvad vahemikus 0-st kuni 1000 mg/m³. Paralleelselt uuriti ka chl a määramatust (*chla_uncertainty*), mille väärtused varieeruvad 0-st lõpmatuseni (%). Töös kasutati chla andmeid, mille määramatuse protsent on vähem kui 50%. Esialgu määramatuse piiriks oli valitud 40%: need andmed olid küll kvaliteetsemad, kuid ei peegeldanud tõelist klorofüllit ja dünaamikat, kuna liiga palju informatiivseid vaatluseid said välja jäetud. Tööst eemaldati chl a väärtused, mis ületasid 200 mg/m³, sest need ei ole realistlikud väärtused Peipsi järves. (ESA: Lakes CCI, 2019; 2020)

2.3 Kontaktmõõtmised

Klorofüll ja statsionaarsete mõõtmiste andmeid päriti Keskkonnaseire Infosüsteemist (KESE), mis on saadud riikliku Peipsi järve hüdrobioloogilise keskkonnaseire käigus. *In situ* mõõtmisteostati sagedusega kord kuus, kokku 7 mõõtmist aastas ühes punktis. Pihkva järves tehti mõõtmisi ainult kord aastas augustis. Tegemist on integraalsete (keskmistatud) veeproovidega, kui proovid võetakse ühest kohast, kuid erinevatest sügavustest pinnakihist kuni põhjani ja mõõdetakse keskmine klorofüll ja kontsentratsioon. Mõõtmised hõlmavad endas kaks paralleelmõõtmist, andmetöötluses kasutati aritmeetilise keskmine neist kahest. Esiagsed andmed ei olnud kõige parema kvaliteediga, näitks sisaldasid negatiivseid klorofüll ja kontsentratsioonide väärtuseid, mis olid kõrvale jäetud. Kui kontaktmõõtmiste metodika on enamuse järvede puhul sama, siis kaugseire andmetes esineb nüansse sõltuvalt vee kvaliteedi tüübist, seega peaks veekogu olema veetübi ja ökoloogilise seisundi osas homogeenne (Alikas jt, 2015). Kuna Peipsi järve vee seisund ei ole terve järve territooriumil sama, jagatakse Peipsi järve kolmeks erinevaks osaks: Peipsi järv, Lämmijärv ja Pihkva järv ja analüüsitakse igaeraldi (Laugaste, Haberman, 2005). Proovipunktide asukohad on toodud joonisel 1.



Joonis 1. Proovivõtu kohtade asukohad Peipsi järvel

3 TULEMUSED JA ARUTELU

3.1 Chla andmete valideerimine

Veekeskkonda iseloomustavad nii ajalised kui ka ruumilised muutused, mille jälgimine on keeruline ja kulukas. Seetõttu on raske hinnata ka seisundi muutust. Eriti kehtib see suurte järvede puhul, kus veeproove saab võtta vaid mõnest üksikust punktist. Kuid ehkki kaugseirel on mitmeid eeliseid, esineb siiski ka olulisi piiranguid. Enne kui langev päikesekiirgus jõuab veekogu pinnale ja sealt tagasi satelliidiandurisse, peab see läbima atmosfääri, kus selle intensiivsus ja omadused muutuvad neeldumise ja hajumise tulemusel. Kokku pärineb umbes 90–98% sensori saadud signaalist veepinna ja atmosfääri andmetest. Ainult ülejäänud 2–10% sisaldavad veekaugseire jaoks huvipakkuvat signaali ehk veest lahkuvat kiirgust. Samuti on meie laiuskraadidel probleemiks pilvine taevast ning sellest tulenevalt kaugseireks sobilike ilmade vähesus. Sel põhjusel on atmosfäärist ja veepinnast tulenevate mõjude eraldamine ja minimiseerimine väga oluline. Selleks on olemas erinevad empiirilised ja analüütilised algoritmid ning need lähenemisviisid nõuavad huvipakkuva muutuja *in situ* mõõtmist, mis võimaldab erinevate andmete kombineerimisel saada täpsemaid tulemusi. (Kangro, Asuküll, 2014; Dörnhöfer, Oppelt, 2016)

In situ mõõtmised on sagedusega kord kuus, ideaalis kokku tuleb 7 mõõtmist aastas ühes punktis, kuid tihtipeale mõõdetakse ka väiksema sagedusega. Satelliidiandmeid on palju rohkem. Kõrgem mõõtmisagedus võimaldab tuvastadamuutusi, mis toimuvad lühema aja jooksul ja võivad seetõttu jääda tavamonitooringuga märkamata. Satelliidiandmete kättesaadavus sõltub aga ilmast ja pilvkatte olemasolust, iseloomustades pigem kõrgrõhuperioode. Optilise kaugseire probleemiks on piltide puudumine pilvkatte ajal, kuid sellest hoolimata on saadavate andmete hulk ikkagi suurem kui tavaseire käigus kogutud andmete hulk. Seega kontaktmõõtmised ja satelliidiandmed täiendavad teineteist, sellepärast on mõistlik käesolevas töös vaadata klorofüllil ja dünaamikas nii kontaktmõõtmiste kui satelliidiandmeid arvesse võttes. Lisaks sellele on aegade andmetes tekkis auk perioodil 2012–2016, kui ENVISAT/MERIS lõpetas oma töö ära ja S3/OLCI veel ei mõõtnud, ehkki kontaktmõõtmisi teostati.

In situ andmete sisendiks kasutasime riikliku keskkonnaseire käigus kogutud proovide põhjal mõõdetud klorofüllil ja andmeid. Saadud tulemuste põhjal valideerisime vastavaid 2000–2019 satelliiditulemeid. See hõlmas *in situ* ja satelliitproduktide omavahelise lineaarse seose uurimist ja selle seose tugevuse hindamist korrelatsioonikordaja abil.

Selleks, et töös uuritud satelliiditulemid oleksid *in situ* andmetega võrdvõimelised need on esmalt läbinud Eumetsati poolt välja töötatud korrigeerimise ja keskmistamise eeltöötlust. Kuna lahutusvõimeks (ROI) oli valitud 3x3 pikslit, siis kõigepealt oli vaja rakendada pikslitele kvaliteedimärgendeid (confidence flags) ehk välja jätta erindid ja vääramaks loetud pikslid. Nende eemaldamiseks oli kasutatud järgmine algoritm:

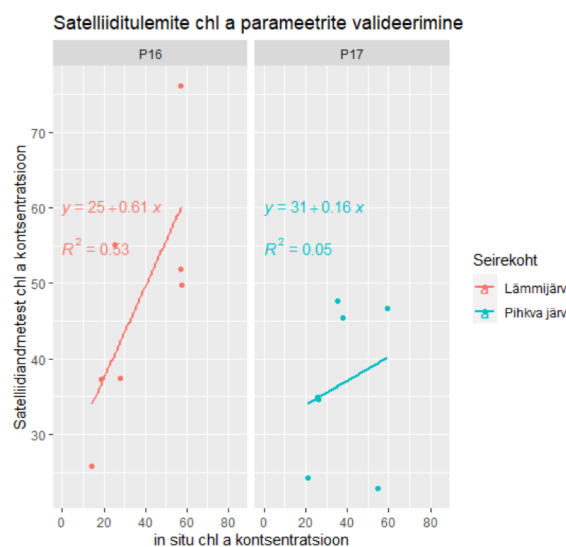
$$[\text{piksli väärtus}] < \mu - 1.5\sigma \text{ või } [\text{piksli väärtus}] > \mu + 1.5\sigma, \text{ kus } \mu \text{ on keskvärtus ja } \sigma \text{ on pikslite väärtuste standardhälve ROI piirkonnas.}$$

Sellele järgnes *full matchup* protseduur, mis tagaks ROI väärtuste homogeensust. Piksli väärtus eemaldatakse andmestikust, kui variatsiooni koefitsient (Coefficient of Variation) on suurem, kui 20%. CV arvutatakse järgmise valemi järgi:

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \times 100,$$

kus μ on keskvärtus ja σ on pikslite väärtuste standardhälve ROI piirkonnas.

Peale seda puhastatud andmete põhjal oli võimalik leida filtreeritud keskmise ROI piirkonnas, mida saaks võrrelda *in situ* väärtusega. Kuna vaadatud periood oli aprillist oktoobrini, kontaktmõõtmisi on tunduvalt vähem, kui satelliidiandmeid ning ka satelliidiandmetest mõned väärtused olid loetud ebasobilikuks, siis selliseid seirekohti, kus on järgi jäänud rohkem, kui 2 vaatlust sama kuupäeva kohta on ainult 2 : P16 ja P17 (vt Joonis 2).

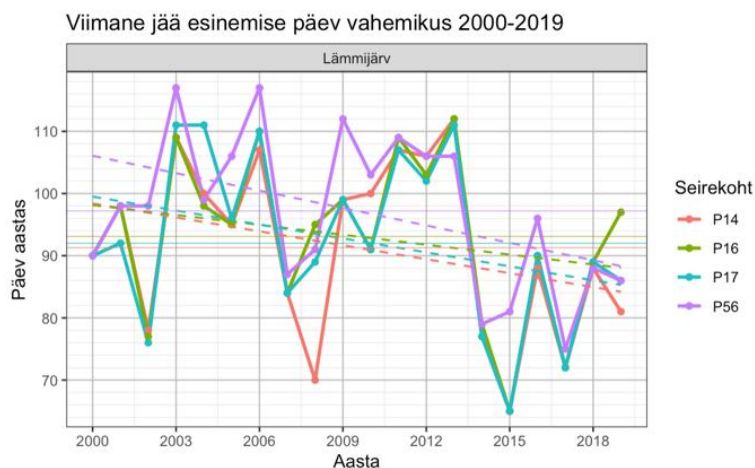


Joonis 2. Satelliiditulemite chl a parameetrite valideerimine

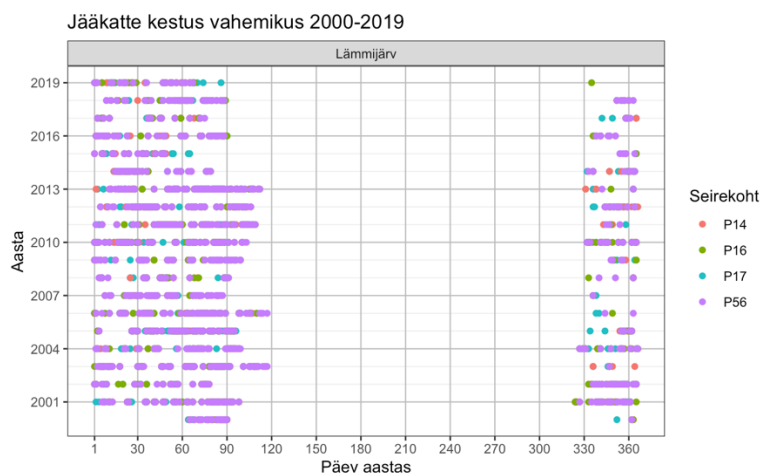
Punkti 16 korral, kus $|r| = 0.73$ ehk $r^2 \approx 0.53$ (53%), tegemist on tugeva seosega kahe tunnuse vahel (üks tunnus kirjeldab teisest ligikaudu 53%). Punkti 17 korral aga, kus $|r| = 0.22$ ehk $r^2 \approx 0.05$ (5%), tegemist on pigem nõrga seosega kahe tunnuse vahel (üks tunnus kirjeldab teisest ligikaudu 5%). Seega võib teha järelduse, et tõenäoliselt see, kuidas *in situ* ja kaugseire andmed suhestuvad sõltub nii satelliidi sensorite võimekust, kui ka andmete saamise asukohaks. Põhjuseks, et seos kahel erineval meetodil saadud andmete vahel on nõrk võib olla asjaolu, et ebapiisava proovivõtmise sageduse tõttu võib jääda fütoplanktoni õitseng tavamonitooringu meetoditega märkamata. Samas pilvkatte tõttu võivad vastupidi puududa olulised satelliidiandmed õitsengute kohta, mis mõõdeti tavamonitooringu käigus. Seega satelliidiandmed pigem toetavad *in situ* andmeid, kuid ei asenda neid täielikult.

3.2 Jääolud

Üks töö eesmärkidest on analüüsida viimase 20 aasta jooksul jääoludes toimunud muutusi. Joonistel 3, 5, 7 on toodud perioodi 2000. – 2019. aasta jääkatte kestus erinevate seirekohtade lõikes. Joonistel 4, 6, 8 on perioodi 2000 - 2019 igaastane kevadhooaja jääkatte lõpukuupäev koos lineaarse trendijoonega ja pikaajalise keskmisega.

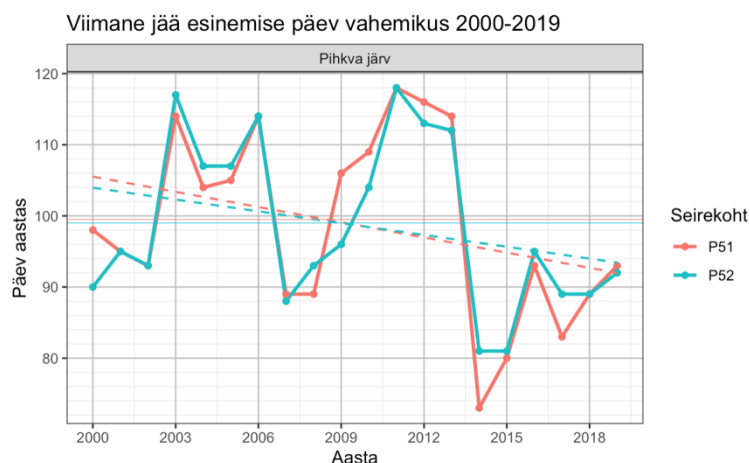


Joonis 3. Viimane jää esinemise päev kevadel Lämmijärves vahemikus 2000 - 2019

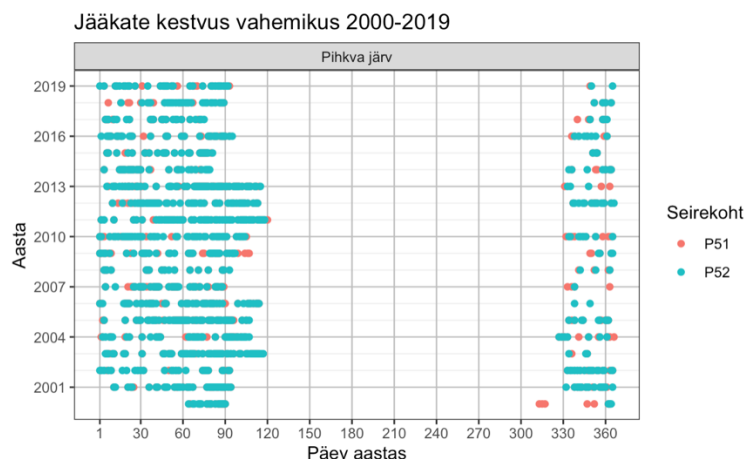


Joonis 4. Jäähõlme kestus Lämmijärves vahemikus 2000 - 2019

Peipsi järve puhul on chl a seireks oluline periood aprillist oktoobrini, millal järves esineb fütoplanktoni õitsenguid, seega keskendume selles töös kevadiste jäänähte esinemisele. Kuigi analüüsides Peipsi jäärežiimi üldiselt, võib jääfaaside muutumises jälgida järgmist tendentsi: esimeste sügiseste jäänähte kuupäevad aastatel 2014 – 2019 on nihkunud mõni...mõnikümnenä päeva hilisemaks ning kevadel Peipsi jääst vabanemine on nihkunud 5...15 päeva varasemaks võrreldes varasemate aastatega 2008 - 2013 (vt Joonised 4, 6, 8). Lineaarne trend näitab, et jääkattest vabanemise kuupäevad pikaajalises reas on nihkunud Peipsil varasemale ajale, mis omakorda tähendab, et jäävaba periood on pikenenud (vt Joonised 3, 5, 7).

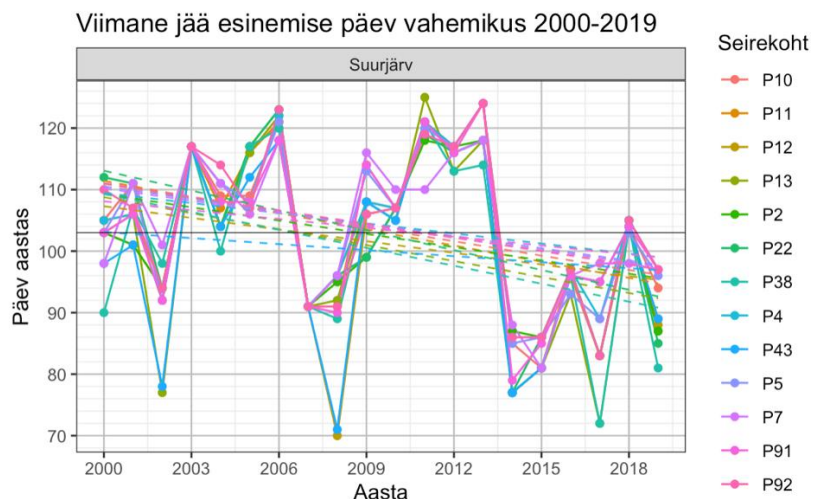


Joonis 5. Viimane jää esinemise päev kevadel Pihkva järves vahemikus 2000 - 2019

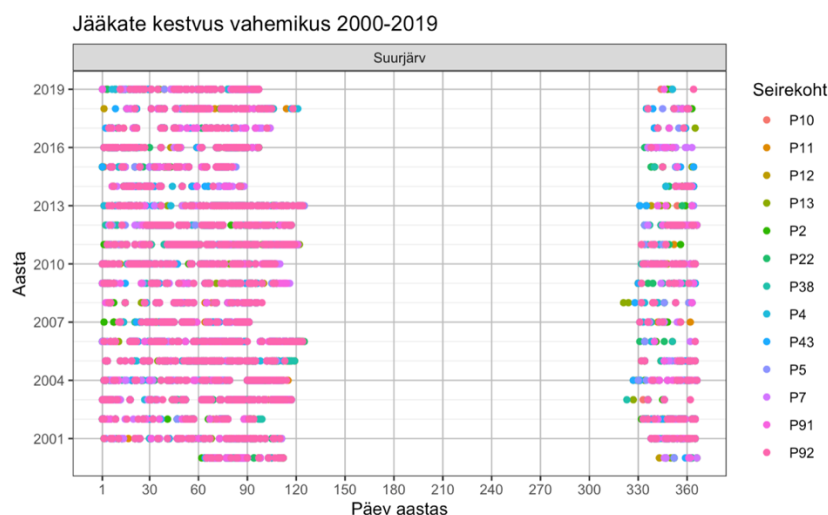


Joonis 6. Jääkate kestus Pihkva järves vahemikus 2000 - 2019

Jäärežiim on kõiges kolmes järve osas üsna sarnase mustriga. Nii on joonistelt näha, et jää kadus hiljem erinevates järve osades 2003, 2006, 2009 ja 2011-2013. aastatel. Kevadiste jäänähte esinemine on tavaliselt pikem pikaajalisest keskmisest neil aastatel Lämmijärves sõltuvalt asukohast 12...20 päeva (vt Joonis 3), Pihkva järves 8...19 päeva (vt Joonis 5) ja Suurjärves ca 10...20 päeva võrra (vt Joonis 7). Seega aastatel pikema jääkatteperioodiga jääst vabanemise kuupäev on nihkunud aprilli keskpaigast aprilli lõpu poole. Samuti alates 2014. aastast jääkate lagunemine hakkas toimuma varem ning jääkate lõpukuupäevad võrreldes pikaajalise keskmisega on nihkunud aprilli algusest märtsi lõpupoole.



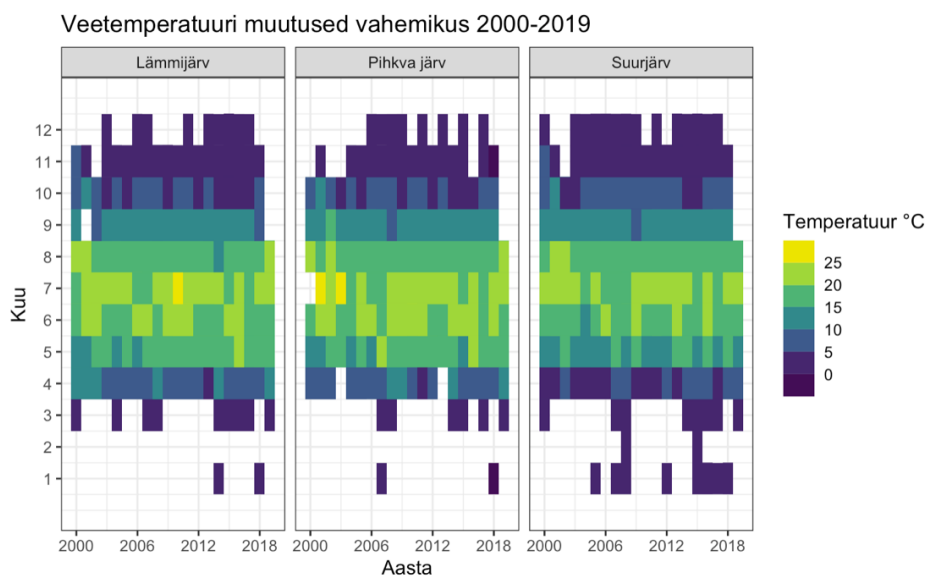
Joonis 7. Viimane jää esinemise päev kevadel Suurjärves vahemikus 2000 - 2019



Joonis 8. Jäätkestus Suurjärves vahemikus 2000 - 2019

3.3 Veetemperatuur

Joonisel 9 on toodud kuu keskmine veetemperatuur erinevates järve osades ja erinevate aastate lõikes. Samamoodi võib teha järelduse, et needsamad aastad, kus jää kadus hiljem olid ka külmemad. Aastatel 2003, 2006, 2009, 2011-2013 aprilli keskmine temperatuur oli külmem, kui ülejäänud aastatel: Pihkva ja Lämmijärves vahemikus 5 – 10 °C ja Suurjärves 0 – 5 °C. Soojemateks aastateks osutusid Lämmijärves 2002, 2008, 2014 ja 2019; Pihkva järves 2008, 2009, 2014 ja 2019 ja Suurjärves 2002, 2007, 2008, 2012, 2014-2016, 2018-2019.



Joonis 9. Veetemperatuuri muutused kuude lõikes erinevates Peipsi järve osades vahemikus 2000 - 2019

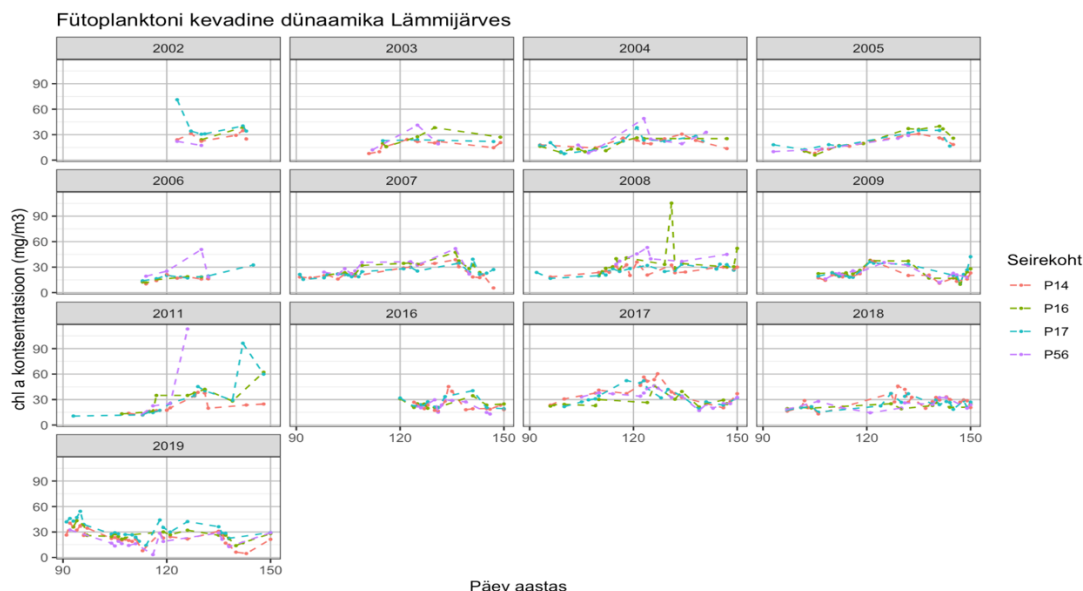
See fakt, et aprilli keskmine veetemperatuur Pihkva järves 2009. aastal jääb kõrgema aprilli veetemperatuuriga aastate hulka on seletatav sellega, et ühes punktis P52 jää sellel aastal kadus tegelikult võrreldes pikaajalise keskmisega varem (vt Joonis 5), mis on ilmselt kohane ka

suuremale piirkonnale, kui ainult ühe mõõtmispunkti alale. Samas 2011. aastal aprilli keskmine veetemperatuur oli külmem ($0 - 5^{\circ}\text{C}$), kui tavaliselt; ka jää lõplik sulamine toimus sel aastal rekordiliselt hilja 128. päeval ehk 28. aprillil. Lämmijärves kõige külmem aprill oli 2013. aastal, kui keskmine veetemperatuur oli $0 - 5^{\circ}\text{C}$, mis on tõenäoliselt ka tingitud sellest, et terve Lämmijärve ulatuses jää kadus pikaajalisest keskmisest oluliselt hiljem 18-22. aprillil. Suurjärves on temperatuur üldiselt külmem, kui teistes järve osades, mida tõestavad ka andmetöötluse käigus saadud tulemused.

3.4 Fütoplanktoni dünaamika

3.4.1 Lämmijärv

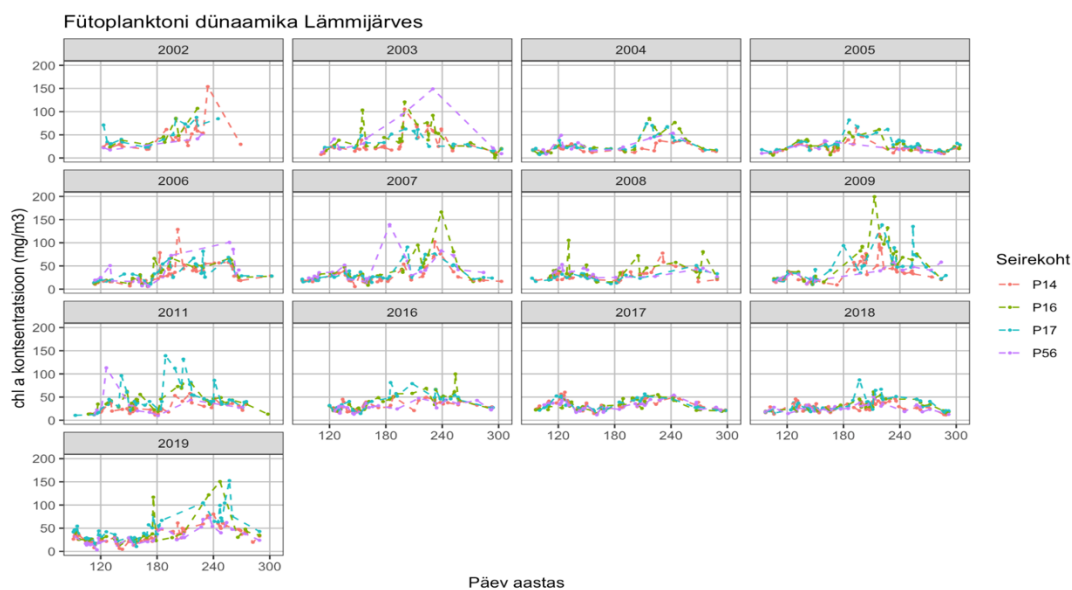
Selles peatükis vaadataksesuundumusi fütoplanktoni dünaamikas sõltuvalt kas tegemist on külmemaga või soojemaga aastaga. Kui vaadata Lämmijärve soojemaid aastaid (2002, 2008, 2014 ja 2019), siis neil aastatel on raske rääkida erinevustest klorofüll a sempoones dünaamikas (vt *Joonis 10*). Ei saa ka väita, et nendel aastatel klorofüll a sisaldus oli kuidagi suurem. On selgelt näha, et 2008. aasta mai alguses toimus üks järsk tõus fütoplanktoni dünaamikas (vt *Joonis 10*), ehkki sama tõus toimus ka näiteks ühel külmemal aastal 2011, seega võib ainult eeldada, et 2008. aastal kontsentratsiooni hüpet põhjustas soojem aprilli veetemperatuur, kuid see ei ole alati nii, mis tähendab, et veetemperatuur ei mõjuta fütoplanktoni dünaamikat nii suurel määral või ei ole ainuke faktor, mis mõjutab fütoplanktoni kasvu.



Joonis 10. Fütoplanktoni klorofüll a kevadine dünaamika (aprill - mai) Lämmijärves aastate lõikes

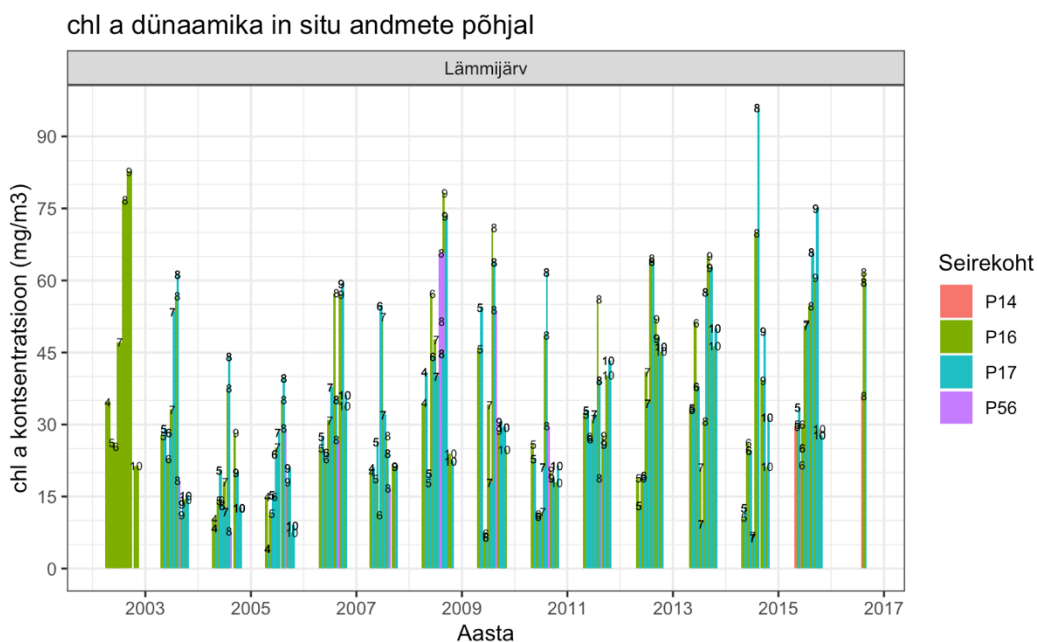
Üldiselt kevadine (aprill – mai) klorofülla kontsentratsioon jääb vahemikku 0 – 113 mg/m³ (aasta jooksul see võib ulatuda lausa 195 mg/m³), keskvärtusega 19 mg/m³ ja aasta keskmisega 23 mg/m³.

Samuti Lämmijärve kevadises fütoplanktoni dünaamikas on näha tendentsi, et fütoplanktoni kontsentratsioon saavutab oma maksimumi tavaliselt mais, v.a. 2019. aasta, kui kontsentratsioon oli suurem kohe aprilli alguses. Üleüldse fütoplanktoni hulk avavees muutub tavaliselt aastati ja aastaajati. Enamasti on fütoplanktoni biomassil Lämmijärves üks- kaks tippu ja enamikul aastatel on maksimum augustis (vt *Joonis 11*).



Joonis 11. Fütoplanktoni klorofüll a dünaamika (aprill - oktoober) Lämmijärves aastate lõikes

Samas in situ andmed osutavad sellele, et veetemperatuuri ja klorofülla kontsentratsiooni vahel võib olla seos olemas, sest aastad 2002, 2008 ja 2014 on suurimate klorofülla kontsentratsiooni näitajatega (vt *Joonis 12*). Klorofülla kontsentratsioonide kasvu tuleks aga suhtuda ettevaatusega, sest mõõtmissagedus pole kunagi olnud piisav.

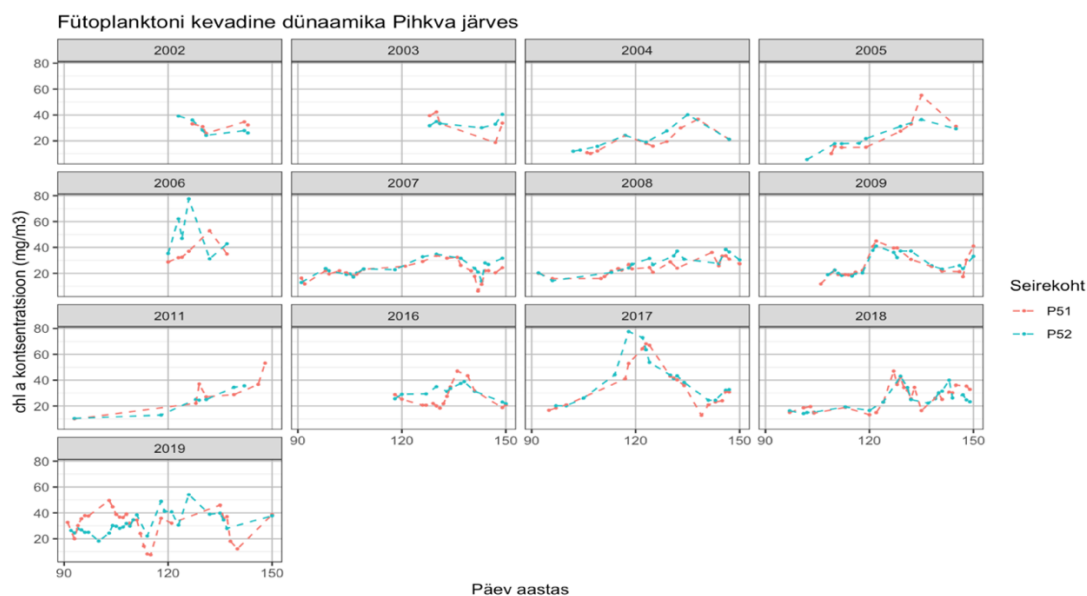


Joonis 12. Klorofüllü a in situ mõõtmiste tulemused Lämmijärves vahemikus 2002-2016 ning perioodil aprill-oktoober erinevate aastate ja kuude lõikes

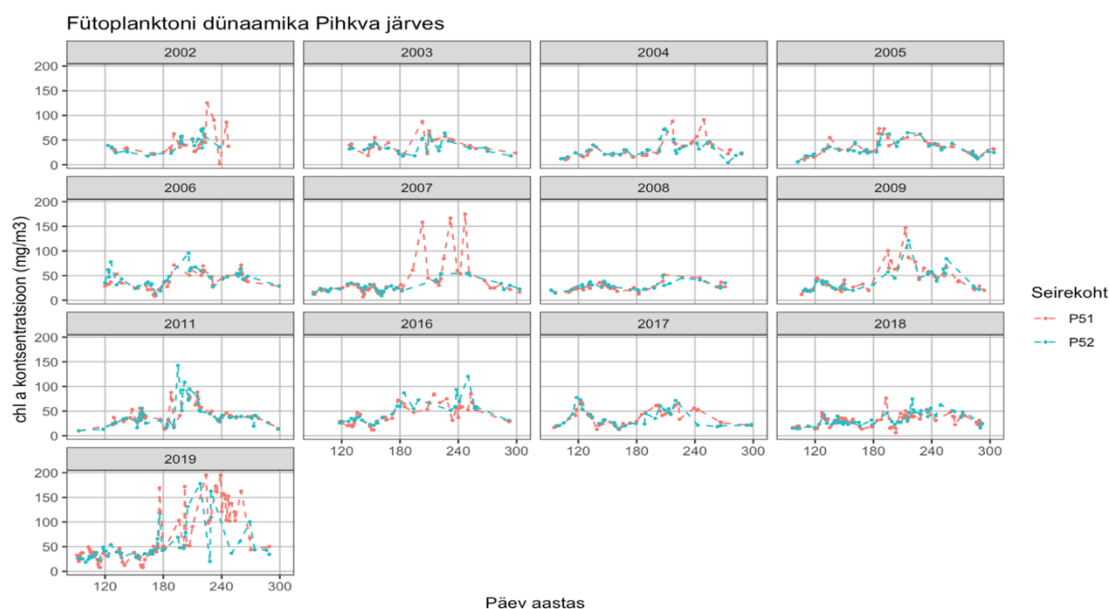
3.4.2 Pihkva järv

Pihkva järv on oma olemuselt sarnane Lämmijärvega, klorofüllü a kontsentratsioon aasta vältel varieerub tavaliselt samamoodi vahemikus 0 - 195 mg/m³, keskväärtusega 23 mg/m³, kuid kevadise perioodi kontsentratsiooni vahemik on suhteliselt väiksem 0 - 96 mg/m³, keskväärtusega 19 mg/m³. Vaatluses on aastad 2008, 2009, 2014, 2019, kus aprilli veetemperatuur oli soojem, kui teistel aastatel. 2008. – 2009. aastad on üsna sarnase muustriga aastad (vt Joonis 13), kus fütoplanktoni kasvu on märgata pigem maikuus ja mille kontsentratsioon on aprillis ca 20 mg/m³ ja mais 20-40 mg/m³ (2009. aastal kuni 45 mg/m³). 2019. aasta on natukene kontrastsem, fütoplanktoni kontsentratsioon on siin nii aprillis kui mais kõrgem, kui 2008. -2009. aastatel ja ulatub kuni 55 mg/m³, ka kevadine maksimum punktis P51 jääb aprillkuusse ning punktis P52 leiavad aset 2 tippu: aprilli lõpus ja mai alguses. Samas Pihkva järve pikaajalisest fütoplanktoni dünaamikast paistavad välja aastad 2006 ja 2017, kus klorofüllü a kontsentratsioon ulatub lausa 80 mg/m³. Neil aastatel nii keskmine kontsentratsioon kui ka maksimaalne kontsentratsioon oli kõrgeim. Seega soojematel aastael saadud klorofüllü a kontsentratsiooni tulemused ei näita seost veetemperatuuriga.

Vaadates aastast fütoplanktoni dünaamikat eristuvad enam aastad 2007, 2009, 2011 ja 2019 (vt Joonis 14). 2019. aastal fütoplanktoni sisaldus oli väga kõrge (kuni 200 mg/m³) praktiliselt terve kasvuperioodi jooksul. Teistel nimetatud aastatel kontsentratsioonide maksimumid olid märgatavalt suuremad (kuni 150 -170 mg/m³), kui ülejäänud aastatel.

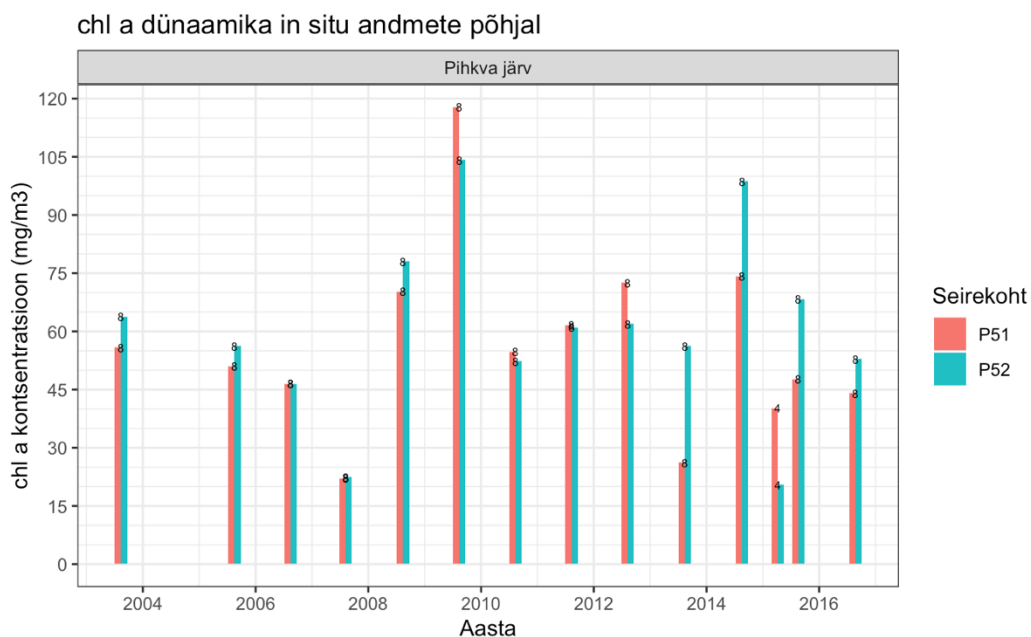


Joonis 13. Fütoplanktoni klorofüll a kevadine dünaamika (aprill - mai) Pihkva järves aastate lõikes



Joonis 14. Fütoplanktoni klorofüll a dünaamika (aprill - oktoober) Pihkva järves aastate lõikes

Kontaktmõõtmisi Pihkva järves teostati üks, mõnikord 2 korda aastas – augustis ja talvel/kevadest, seega antud juhul in situ andmed ei ole väga informatiivsed. Samas aastad suurima chl a-ga in situ andmete põhjal on 2008, 2009 ja 2014 (vt Joonis 15), mis läheb kokku teadmise, et neil aastatel ka aprilli veetemperatuur oli soojem; kuid antud juhul tegemist on tõenäoliselt juhusliku kokkulangemisega, vähemalt põhjusliku seose olemasolu väita ei tohiks.



Joonis 15. Klorofüll a in situ mõõtmiste tulemused Pihkva järves vahemikus 2002-2016 ning perioodil aprill-oktoober erinevate aastate ja kuude lõikes

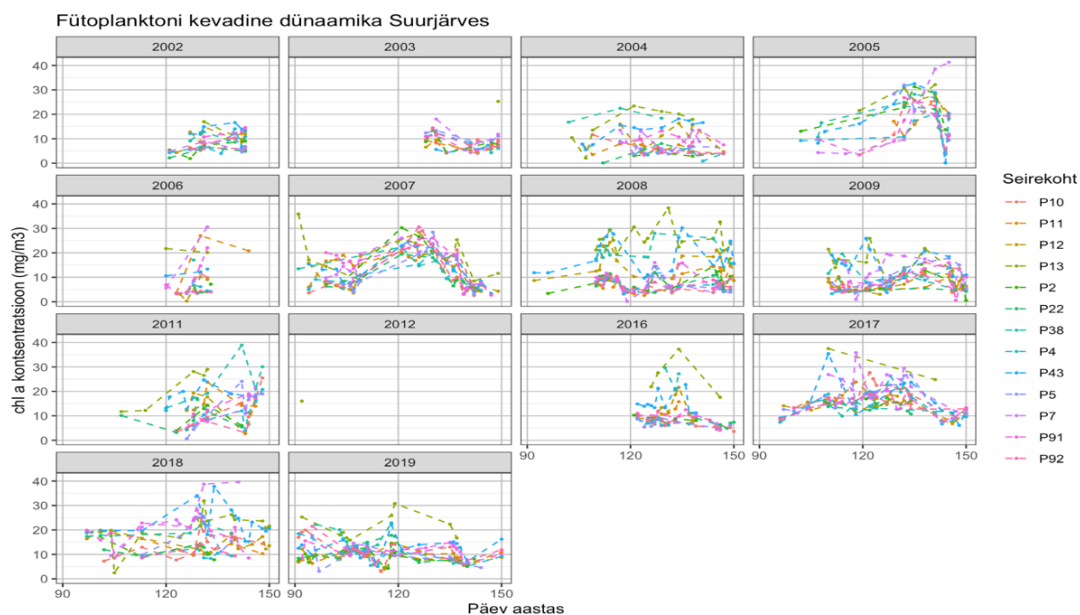
Analüüsides seost augusti veetemperatuuri ja augusti *in situ* klorofüll a mõõtmiste vahel, ei saa väita, et veetemperatuuril oli ka suur mõju fütoplanktoni dünaamikale. Augusti veetemperatuurid olid suuremad aastatel 2000, 2003 ja 2019 (vt Joonis 9), kuid suuremaid klorofüll a sisaldusi oli märgata pigem 2009. ja 2014. aastal, siis kui keskmine augusti veetemperatuur nagu ka kõigil teistel (v.a 2000, 2003 ja 2019) oli vahemikus 15-20 °C.

3.4.3 Suurjärv

Suurjärv on suurem ja sügavam, seega ta on ka vähem fütoplanktoni õitsengute poolt mõjutatud. Klorofüll a kontsentratsioon aasta vältel varieerub tavaliselt samamoodi vahemikus 0 - 195 mg/m³, kuid keskmine kontsentratsioon võrreldes Pihkva ja Lämmijärvega on ühe ühiku võrra madalam - 22 mg/m³, kuid kevadise perioodi fütoplanktoni sisaldus on vahemikus 0-113 mg/m³, keskväärtusega 18 mg/m³.

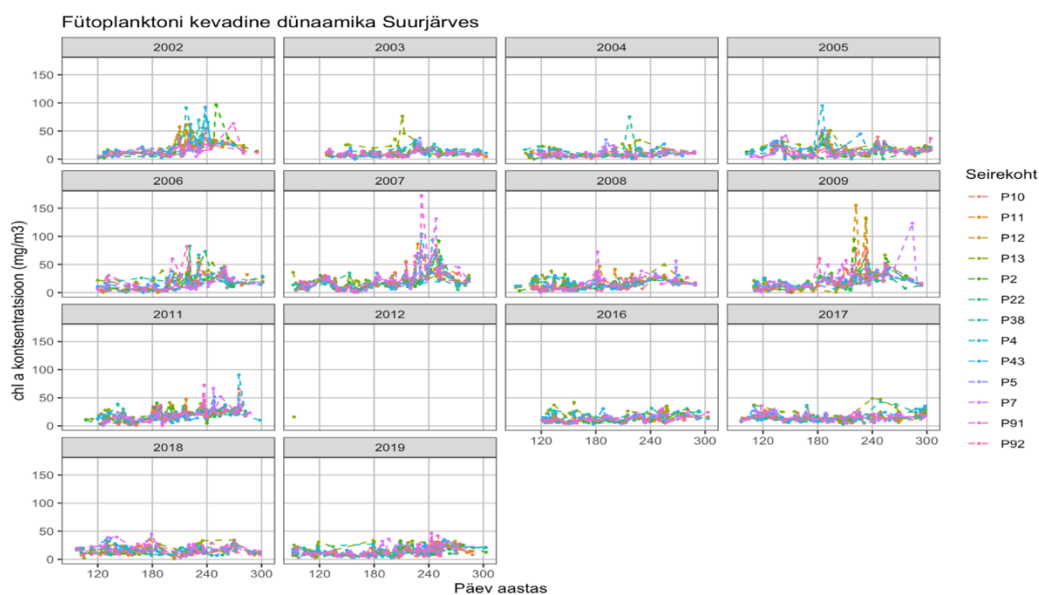
Vaatamata selle, et ka Suurjärves oli nii soojemaid kui külmemaid aastaid, kevadine fütoplanktoni dünaamika oli kõikidel aastatel päris sarnase mustriga (vt Joonis 16. Fütoplanktoni klorofüll a kevadine dünaamika (aprill - mai) Suurjärves aastate lõikes, raske on välja tuua aastaid, mis oluliselt eristuksid teistest, kevadine chla sisaldus on tavaliselt madal, ei tõuse üle 40 mg/m³, tõusud on küll erinevatel aastatel erineval ajal toimunud, kuid ka sellel ei ole olulist seost, kas tegemist oli aastaga, kui aprilli veetemperatuur oli soojem või kõrgem. Lisaks selle kõige kõrgemad väärtused on tavaliselt punktides P13 ja P43, mis asuvad Suurjärve

lõunapoolses osas ja neile on omased Lämmijärve karakteristikud, sh suuremad klorofüllilise kontsentratsioonid.



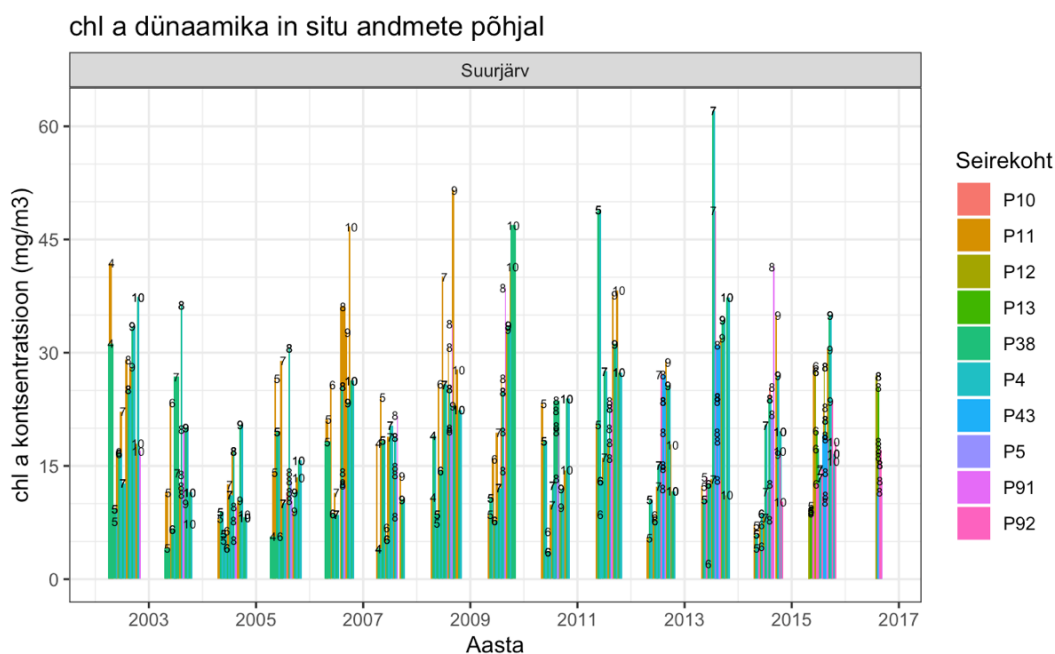
Joonis 16. Fütoplanktoni klorofüllilise a kevadine dünaamika (aprill - mai) Suurjärves aastate lõikes

Analüüsidest fütoplanktoni dünaamikat tervikuna võib jälgida järgmist vastuolu: aastad suurima klorofüllilise a sisaldusega olid soojem 2007 ja külmem 2009, mis oli ka pikema jääkatteperioodiga (vt Joonis 17). Neil aastatel klorofüllilise a sisaldus võis ületada 150 mg/m^3 piiri ja ka üldiselt oli neil kahel aastal võrreldes teistega suurem. Muidu tavaliselt klorofüllilise a kontsentratsioon jääb kasvuperioodi jooksul alla 50 mg/m^3 , v.a õitsengute ajal (juulis-augustis), kui kontsentratsioon jõuab maksimumi ja saavutab väärtuse vahemikus $50\text{-}100 \text{ mg/m}^3$, ehkki viimastel aastatel isegi maksimumide kontsentratsioon ei tõuse üle 50 mg/m^3 .



Joonis 17. Fütoplanktoni klorofüll a dünaamika (aprill - oktoober) Suurjärves aastate lõikes

Suurjärves teostatud kontaktmõõtmised antud juhul toetavad päris hästi satelliidiandmeid. Klorofüll a sisaldus erineb oluliselt sõltuvalt seirepunkti asukohast, kuid enamasti nii satelliidiki kui *in situ* andmed näitavad suuremaid klorofüll a kontsentratsioone samadel aastatel. Üks printsiipaalne erinevus kahel erineval meetodil saadud andmete vahel on see, et näiteks aastatel 2005, 2007, 2009, 2011 jäi fütoplanktoni õitseng kaugseire meetodiga märkamata, kuid tavamonitooringu andmetel on näha sisaldust 100-150 mg/m³ vahemikus (vt Joonis 18).



Joonis 18. Klorofüll a in situ mõõtmiste tulemused Suurjärves vahemikus 2002-2016 ning perioodil aprill-oktoober erinevate aastate ja kuude lõikes

KOKKUVÕTE

Töös uuriti muutusi järve jääkatte esinemissageduses, kas muutuvates jääoludes on muutunud ka järve temperatuurirežiim ning kas jääkatte kestus ja veetemperatuur mõjutavad mingil määral fütoplanktoni elutegevust. Satelliidipiltidelt tuletatud andmed annavad teavet huvipakkuvate produktide kohta suurema sagedusega, võrreldes tavamonitooringu meetoditega ning kirjeldavad järves aset leidvaid protsesse päris täpselt, kuid teatud piirangute tõttu (atmosfäär, pilvisus) ei suuda satelliidisensorid tuvastada kõiki järves toimuvaid muutusi. Ka kontaktmõõtmiste vähesuse tõttu võivad jääda ka *in situ* meetodiga olulised muutused märkamata. Seega järve seisundi hindamisel on mõistlik mõlemal meetodil saadud tulemusi kombineerida, sest nad toetavad teineteisi, tekitavad pikema andmerea ja kujutavad ammendavama pildi toimuvast.

Selle töö käigus oli leitud, et viimaste aastate jäärežiimis on märgata langustendentsi – jäävaba periood pikenes ja jääkatte kadumise kuupäevad on nihkunud varasemale ajale. See aga ei tähenda veetemperatuuri olulist soojenemist. Uuringu käigus avastasime, et aastatel, mil on lühem jääkatte periood aprilli veetemperatuur oli ka üldiselt soojem, ent see võis olla vahemikus kas või 5 – 10 °C või 10 – 15 °C vs 0 – 5 °C külmematel aastatel.

Seevastu fütoplanktoni dünaamika ei ole nii tugevas seoses veetemperatuuri- ega jäärežiimiga. Erinevatel aastatel esinevad fütoplanktoni leviku puhangud, mis ei ole alati seletatavad kõrge veetemperatuuriga või varase jääkatte kadumisega. Muidu suurimad fütoplanktoni sisaldused on omased Pihkva ja Lämmijärvele, mida tõestavad ka varasemad uuringud; seal on nii keskmised kui maksimaalsed kontsentratsioonid kõrgemad kui Suurjärves.

Ilmselt töös uuritud indikaatorid ei ole ainukesed, mis mõjutavad fütoplanktoni dünaamikat: olulist rolli võivad mängida ka tuulekiirus, päikesepaisteliste päevade arv, järveosa dominantliigid jne. Et paremini hinnata järve keskkonnaseisundit ja prognoosida selle võimalikke muutusi võiks ulevikus töösse kaasata ka neid parameetreid, et paremini mõista, kuidas jääkatte perioodi pikkus tegelikult mõjutab muutusi fütoplanktoni elutegevuses või siis mis tegurid mõjutavad fütoplanktoni arvukust.

KASUTATUD KIRJANDUS

Alikas, K., Kangro, K., Randoja, R., Philipson, P., Asuküll, E., Pisek, J., Reinart, A., (2015). Satellite-based products for monitoring optically complex inland waters in support of EU Water Framework Directive. *International Journal of Remote Sensing*, 17, 4446. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1083630>. (Vaadatud 24.11.2021)

Curran, P. J., Foody, G. M., (1994). Environmental remote sensing from regional to global scales. Chichester ; New York : Wiley.

Dörnhöfer K., Oppelt N., (2016). Remote sensing for lake research and monitoring – Recent advances. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.12.009> (Vaadatud 30.03.2022)

Eesti keskkonnanäitajad 2012. Tallinn: Keskkonnateabe keskus.

ESA Climate Office (a). How Are CCI ECVs Generated? URL: <https://climate.esa.int/en/explore/how-cci-ecvs-are-generated/> (Vaadatud 12.03.2022)

ESA Climate Office (b). About Lakes. URL: <https://climate.esa.int/en/projects/lakes/about/>. (Vaadatud 12.03.2022)

ESA: Lakes CCI, (2020). D1.1: Product Specification Document (PSD). URL: https://climate.esa.int/media/documents/CCI-LAKES-0016-PSD_V1.2_signed_CA.pdf (Vaadatud 12.03.2022)

ESA: Lakes CCI, (2019). Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD). URL: https://climate.esa.int/media/documents/CCI-LAKES-0024-ATBD_V1.0.pdf (Vaadatud 12.03.2022)

ESA – Remote Sensing Data. URL: https://www.esa.int/About_Us/Law_at_ESA/Intellectual_Property_Rights/Remote_sensing_data (Vaadatud 30.03.2022)

ESA – Sentinel-6. URL: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-6 (Vaadatud 30.03.2022)

ESA – Sentinel Successful Stories, 2022. Copernicus Sentinels help to create extended global lakes dataset. URL: <https://sentinel.esa.int/web/success-stories/-/copernicus-sentinels-help-to-create-extended-global-lakes-dataset> (Vaadatud 02.04.2022)

Eumetsat, (2022). Recommendations for Sentinel-3 OLCI Ocean Colour product validations in comparison with in situ measurements – Matchup Protocols. URL: <https://www.eumetsat.int/media/44087> (Vaadatud 12.04.2022)

Euroopa Parlamendi ja nõukogu veepoliitika raamdirektiiv 2000/60/EÜ. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/?uri=celex%3A32000L0060>. (Vaadatud 15.03.2022)

GCOS (a). About Essential Climate Variables. URL: <https://gcos.wmo.int/en/essential-climate-variables/about>. (Vaadatud 12.03.2022)

GCOS (b). Essential Climate Variables Table. URL: <https://gcos.wmo.int/en/essential-climate-variables/table>. (Vaadatud 12.03.2022)

GCOS (c). ECV Products and Requirements for Lakes. URL: <https://gcos.wmo.int/en/essential-climate-variables/lakes/ecv-requirements>. (Vaadatud 12.03.2022)

Haberman J. & Laugaste, R., (2005). Seasonality of zoo- and phytoplankton in Lake Peipsi (Estonia) as a function of water temperature. Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, Biology, Ecology, 54(1), 18–39. URL: <https://search-ebis.ee/utlib.ut.ee/login.aspx?direct=true&db=e5h&AN=16507968&site=eds-live>. (Vaadatud 27.11.2021)

Haberman J., Raukas A., Timm. T., (2008). Peipsi. Tartu : Eesti Loodusfoto.

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/> (Vaadatud 23.03.2022)

Kangro E., Asuküll E., (2014). MERIS satelliiditulemite neeldumisparameetrite valideerimine Eesti suurte järvede näitel. *Kaugseire Eestis 2014*, lk 74-83.

KESE. <https://kese.envir.ee/kese/listParameterValueNew.action> (kasutatud 21.05.2022)

Keskkonnaministeeriumi põhimäärus. Vastu võetud 10.12.2009 nr 186. URL: <https://www.riigiteataja.ee/akt/13243657>. (Vaadatud 25.10.2021)

Kuresoo R., (2015). Muutuv Eesti loodus. Tartu: Eestimaa Looduse Fond. – Tänuõnad, sissejuhatus, eutrofeerumine, Peipsi järve iseloomustus

Laarmaa R., Ott I., Timm H., Maileht K., Sepp M., Mäemets H., Palm A., Krause T., Saar K., (2019). Eesti järved. Tallinn : Varrak.

Landsat Science – Landsat 1. URL: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-1/> (Vaadatud 01.04.2022)

Landsat Science – Landsat 8. URL: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-8/> (Vaadatud 01.04.2022)

Mobley C. D., Stramski D., Bissett W. P., Boss E., (2015). Optical Modeling of Ocean Waters: Is the Case 1 - Case 2 Classification Still Useful? DOI: <https://doi.org/10.5670/oceanog.2004.48> (Vaadatud 31.03.2022)

NASA Worldview Snapshots, (2018-2022). https://wvs.earthdata.nasa.gov/?LAYERS=MODIS_Terra_CorrectedReflectance_TrueColor&CRS=EPSG:4326&TIME=2018-04-12&COORDINATES=57.661743,26.801147,59.243774,28.174438&FORMAT=image/jpeg&AUTOSCALE=TRUE&RESOLUTION=10km

Nõges, T., (2001). Lake Peipsi. Meteorology, hydrology, hydrochemistry. Tartu: Sulemees.

Phillips N., Kelly M., Taggart J., Reeder R., Flock G., Olem H., (2003). Järvede taskuraamat. Alexandria, VA : Terrene Institute. Tõlgitud: Võrumaa KKT.

Reinart, A., Vain A., (2015). Copernicus – Euroopa järgib Maad. *Kaugseire Eestis 2016*, lk 9-17. (Vaadatud 02.04.2022)

Richardson L. L., (1996). Remote Sensing of Algal Bloom Dynamics: New research fuses remote sensing of aquatic ecosystems with algal accessory pigment analysis, *BioScience*, Volume 46, Issue 7, July/August 1996, lk 492–501. DOI: <https://doi.org/10.2307/1312927> (Vaadatud 19.03.2022)

Saul M., Antso K., (2014). Eesti keskkonnaindikaatorid – arendustöö ja tulemused. Tallinn: Keskkonnaagentuur.

Zhu, L., Suomalainen, J., Liu, J., Hyypä, J., Harri Kaartinen, H., & Haggren, H., (2017). A Review: Remote Sensing Sensors. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.71049> (Vaadatud 30.03.2022)

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Aleksandra Rammul,
(*autori nimi*)

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose

**Muutused Peipsi järve jääoludes ja selle mõju veekogu temperatuurirežiimile ja
fütoplanktoni dünaamikale**,
(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendaja on Krista Alikas, PhD, Ave Ansper-Toomsalu, MSc,
(*juhendaja nimi*)

reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi Dspace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Aleksandra Rammul
27.05.2022