

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

Bakalaureusetöö keskkonnatehnoloogias (12 EAP)

**Peipsi järve vetikaõitsenguid esilekutsuvate ja pärssivate parameetrite uuring kaugseire  
abil**

**Max Sebastian Segerkrantz**

Juhendajad: Krista Alikas,  
Ian-Andreas Rahn, Erko  
Jakobson

Tartu 2024

## **Peipsi järve vetikaõitsenguid esilekutsuvate ja pärssivate parameetrite uuring kaugseire abil**

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli uurida Peipsi järve ja selle kolme alajärve: Peipsi Suurjärve, Lämmijärve ja Pihkva järve vetikaõitsenguid kaugseire abil, ja selgitada välja, kas vetikaõitsengute ja ilma- ning veeparameetrite vahel on seosed, mis aitaksid meil põhjendada vetikaõitsengute dünaamikat. Uuring teostati Lakes\_cci (*Climate Change Initiative* – Kliima muutuste initsiatiiv) andmestiku ja ERA5 atmosfääri järelanalüüsi abiga. Uuringu tulemused näitasid, et kõigis kolmes järve osas mõjutavad klorofüll-a kontsentratsiooni nii veetaseme kõrgus kui ka veepinna temperatuur. Erinevalt Suurjärvest, olid nii Lämmi- kui ka Pihkva järves positiivsed korrelatsioonid 2 meetri kõrguselt mõõdetud õhutemperatuuri ja klorofüll-a kontsentratsiooni vahel. Tulemused ei näidanud veenvat tõendusmaterjali tuulevaikse ilma otsese positiivse mõju kohta vetikaõitsengutele ning ei leitud ka otsest seost klorofüll-a kontsentratsiooni ja sademete hulga vahel. Tuulekiirus oli mõõdetud 10 meetri kõrguselt.

Märksõnad: Kaugseire, Vetikaõitsengud, Peipsi Järv, Lakes\_cci, ERA5

CERCS kood: T181, Kaugseire

## **Study of the parameters inducing and inhibiting algal blooms in Lake Peipsi using remote sensing**

The aim of this bachelor's thesis was to investigate the algal blooms of Lake Peipsi and its three sub-lakes: Lake Peipsi *s.s.*, Lake Lämmijärv, and Lake Pihkva, using remote sensing, and to elucidate the relationships between algal blooms and meteorological and hydrological parameters to understand the dynamics of algal blooms. The study was conducted using the Lakes\_cci (*Climate Change Initiative*) dataset and ERA5 atmospheric reanalysis. The results indicated that both water level and water surface temperature influence chlorophyll-a concentration in all three lakes. Unlike Lake Peipsi *s.s.*, positive correlations between 2-metre air temperature and chlorophyll-a concentration were observed in Lake Lämmijärv and Lake Pihkva. The results did not provide convincing evidence of a direct positive impact of calm weather on algal blooms, nor was a correlation found between chlorophyll-a concentration and precipitation. Wind speed was measured at 10 metres.

Keywords: Remote sensing, Algal blooms, Lake Peipsi, Lakes\_cci, ERA5

CERCS code: T181, Remote sensing

## Sisukord

<b>1. Sissejuhatus .....</b>	<b>5</b>
<b>2. Teoreetiline taust.....</b>	<b>6</b>
2.1 Peipsi järve tutvustus .....	6
2.1.1 Peipsi järve füüsikalised omadused .....	6
2.1.2 Peipsi järve keemilised omadused .....	6
2.1.3 Vetikaõitsengud Peipsi järves .....	6
2.2 Kaugseire .....	7
2.2.1 Satelliitkaugseire .....	7
2.2.2 Klorofüll-a kasutamine vetikaõitsengute seiramiseks .....	7
2.2.3 Kaugseire rakendamine vetikaõitsengute uurimiseks .....	7
<b>3. Materjal ja meetodika .....</b>	<b>9</b>
3.1 Kasutatud andmestikud .....	9
3.1.1 ERA5 andmestik .....	9
3.1.2 Lakes_cci andmestik .....	10
3.2 Kasutatud tarkvara .....	11
3.3 Andmete analüüs .....	12
<b>4. Tulemused.....</b>	<b>14</b>
4.1 Vetikaõitsengud aastate võrdluses .....	14
4.1.1 Vetikaõitsengud Peipsi Suurjärves .....	14
4.1.2 Vetikaõitsengud Lämmijärves .....	16
4.1.3 Vetikaõitsengud Pihkva järves .....	18
4.2 Vetikaõitsenguid esilekutsuvad ja pärssivad tingimused .....	20
4.2.1 Peipsi Suurjärv .....	21
4.2.2 Lämmijärv .....	22
4.2.3 Pihkva järv .....	23
<b>5. Arutelu .....</b>	<b>25</b>
5.1 Suurjärv .....	25
5.2 Lämmijärv .....	27
5.3 Pihkva järv .....	28
5.4 Edasine uurimissuund .....	29
<b>6. Kokkuvõte.....</b>	<b>30</b>

<b>Summary.....</b>	<b>32</b>
<b>Tänuavaldused .....</b>	<b>34</b>
<b>Kasutatud kirjandus.....</b>	<b>35</b>
<b>Lisad.....</b>	<b>39</b>

## 1. Sissejuhatus

Vetikaõitsengute jälgimine on oluline, sest see mõjutab suurel määral nii loodust kui ka inimesi. Õitsengute tagajärjel tarbitakse vees olevat hapnikku suurel määral ning seetõttu võib hukkuda vetikaõitsengute järel suur hulk kalasid. Osad vetikaliigid on mürgised ning võivad mõjuda ka inimestele mürgiselt (Anderson, 2007). Inimesed võivad vetikatoksiinidega kokku puutuda näiteks ujudes või tarbides saastunud kalu.

Peipsi järve vetikaõitsenguid jälgitakse jäävabal perioodil, kuid enamjaolt *in situ* mõõtmiste abil. Käesoleva bakalaureusetöö eesmärk on välja selgitada, millal toimusid suurimad vetikaõitsengud Peipsi järves, määrata kaugseire abil samal ajal olnud ilmaparameetrid ning võrrelda, kas vetikaõitsengute ja ilmaparameetrite vahel joonistub välja seos, mille põhjal saaks seletada vetikaõitsengute dünaamikat. Uuring hõlmab aastaid 2002 kuni 2011 ning 2016 kuni 2020.

Enamjaolt seostatakse vetikaõitsenguid kuuma, tuulevaikse ilmaga, kuid tähtis on ka toitainete, fosfori ja lämmastiku, olemasolu (Pihu, 2001). Töö siht on välja selgitada, kas eelmainitud ilma parameetrid kehtivad ka Peipsi järve vetikaõitsengute kohta ning kas vetikaõitsengutel leidub seos ka veetaseme kõrguse ja sademete hulgaga.

## **2. Teoreetiline taust**

### **2.1 Peipsi järve tutvustus**

#### **2.1.1 Peipsi järve füüsikalised omadused**

Peipsi järve pindala on 3555km<sup>2</sup>, mis teeb sellest Eesti suurima ning Euroopas suuruselt 5. järve. Peipsi järv jagatakse kolmeks alajärveks: Peipsi Suurjärv, Lämmijärv ning Pihkva järv. Pindala poolest suurim alajärv on Peipsi Suurjärve, mille suurus on 2611km<sup>2</sup> ning keskmine sügavus 8,4 meetrit. Suurjärve ja Pihkva järve ühendab kitsas ja keskmiselt 2,6 meetrit sügav Lämmijärv. Peipsi järve suubub umbes 240 vooluveekogu, millest suurimad on Emajõgi, Võhandu, Velikaja ja Želtša jõed. (Nõges, 2001)

#### **2.1.2 Peipsi järve keemilised omadused**

Peipsi järv on toitainerikas järv, kuid troofiline seisund on järve kolmel osal erinev. Suurjärve liigitatakse eutroofseks, Lämmijärve düstroofseks ning Pihkva järve hüpertroofseks. Järve põhiline toitainerikkus tuleneb suurest fosfori ja lämmastiku kogusest. Toitainete kontsentratsioon suureneb Peipsi järves põhja-lõuna suunas. Põhiline osa Peipsi järve fosforist ja lämmastikust pärineb Velikaja ja Emajõest. (Nõges, 2001)

#### **2.1.3 Vetikaõitsengud Peipsi järves**

Peipsi järves esineb enamjaolt kaks või kolm eristatavat vetikaõitsengute perioodi: kevadine või sügisene ränivetikate õitseng ja suvine sini-rohevetikate õitseng. Ränivetikate õitseng on lühem ning esineb harvemini kui suvine sinivetikate õitseng. Suviseid vetikaõitsenguid on Peipsi järves märgatud juba üle-eelmisel sajandil ning need on esinenud igal suvel alates 1959. aastast. (Pihu, 2001)

## 2.2 Kaugseire

### 2.2.1 Satelliitkaugseire

James B. Campbell (1987, 2) on sõnastanud kaugseire kui teadusharu, mis kasutab kaugelt saadud pilte maapealse ja veealase keskkonna kohta, mõõtes peegeldunud kiirgust.

Satelliitkaugseire jaguneb kaheks alaliigiks: passiivne ning aktiivne kaugseire. Passiivse kaugseire sensorid kasutavad valgusallikana peegeldunud päikesekiirgust või maapinnast kiiratud energiat. Aktiivse kaugseire sensorid kasutavad aga radar ja lidar tehnoloogiaid ja ei sõltu välistest energiaallikatest. (Lillesand *et al.* 2015)

Antud uurimuses rakendatakse passiivset kaugseiremeetodit, mis toob endaga kaasa teatud piirangud seoses andmete kättesaadavusega. Üheks peamiseks väljakutseks on pilvkatte olemasolu, mis võib katta uuritavat ala ning mõjutada oluliselt andmete kvaliteeti ja kättesaadavust. Kuna passiivsed kaugseire sensorid ei näe läbi tihedate pilvede, ei saa me informatsiooni soovitava maa- või veepinna kohta (Shastry *et al.*, 2023).

### 2.2.2 Klorofüll-a kasutamine vetikaõitsengute seiramiseks

Klorofüllid leidub peaaegu kõigis fotosünteesilistes organismides, samuti ka vetikates ja tsüanobakterites. Klorofüll on fotosünteesi tähtsaim pigment, mis neelab valgust ja muudab selle abil süsinikdioksiidid süsivesinikeks. Klorofüllid leidub erinevates vormides, vetikates on kõige levinumad klorofüll-a ja klorofüll-b, kuid nendega koos võib leiduda ka klorofüll-c ja -d. (Britannica, T., 2024)

Rohevetikate ja taimede tõhus valguse neelamine toimub sinises (~450 nm) ja punases (~650 nm) valguses (Van Grondelle & Boeker, 2017). Kui jälgida valguse neeldumist nendel lainepikkustel, saame arvutada klorofüll-a kontsentratsiooni.

Töös kasutatakse satelliitsensorite MERIS ja OLCI andmeid, mille spektri ulatus jääb vahemikku 400 nm kuni 1040 nm, mis võimaldab meil analüüsida valguse neeldumist klorofüll-i tõttu ja selle abil vetikaõitsenguid uurida (*Meris overview*, n.d.; *Olci Applications*, n.d.).

### 2.2.3 Kaugseire rakendamine vetikaõitsengute uurimiseks

Liisa Metsamaa 2005. aasta magistritöö tulemused näitavad, et kui klorofüll-a kontsentratsioon on alla  $10 \text{ mg/m}^3$ , peab klorofüll-a kontsentratsiooni muutus peab olema vähemalt  $3 \text{ mg/m}^3$ , et

seada oleks võimalik tuvastada kaugseire abil. Suhteline viga on väikese vetikahulga korral suur ning see väheneb klorofüll-i kontsentratsiooni kasvades. (Metsamaa, 2005)

Silja Põldma rakendas oma 2016. aasta magistritöös passiivset satelliitkaugseiret, et võrrelda *in situ* mõõtmistulemusi kaugseire abil saadud tulemustega. Tulemused näitasid, et klorofüll-a sobib vetikaõitsengute iseloomustamiseks Peipsi järves ja aegread näitasid, et satelliitandmed järgisid *in situ* tulemusi. Kuigi satelliidid koguvad infot suure ala kohta, saab nendega uurida ainult veekogu pindmist kihti. (Põldma, 2016)

2021. aastal Eesti kaugseirekogumikus ilmunud artikkel sinivetikate õitsengutest Peipsi järves, kasutasid Kangro jt. Sentinel-3 A ja B OLCI sensori pilte. Uuringu eesmärk oli hinnata vetikaõitsengute ruumilist paiknemist. Õitsengute määramiseks kasutati pikaajalist klorofüll-a mediaanväärtust, mis arvutati kolmele järve osale eraldi aastatel 1984 kuni 2015 juuni ja septembri vahel kogutud andmete põhjal, ning saadud andmetele liideti 5% pikaajalisest mediaanist. Teise meetodina kasutati Peeter Nõgese (2020) hinnangu alusel soovitatud sinivetikate osakaalu protsenti (CY%), et määratleda kesise ja hea seisundi piir VRD (veepoliitika raamdirektiiv) hinnangus.

Kangro (2022) Uuringu käigus tuvastati, et õitsengud olid intensiivsemad Lämmijärves ja Pihkva järves, alates juuni keskpaigast kuni septembrini. Suurjärves algas õitseng hiljem, juuni lõpust oktoobrini. Kõige intensiivsemad õitsengud olid aastal 2019, mil õitseng kestis Pihkva ja Lämmijärves juuni keskelt üle 80 päeva, ning Suurjärves juuni lõpust üle 90 päeva. Kokkuvõttes näitas uuring, satelliitandmetega on võimalik sinivetikaõitsenguid Peipsi järves uurida ning õitsengute määramiseks sobib pikaajalise keskmise klorofüll-i mediaanväärtuse kasutamine. (Kangro et al., 2022)

2022. aastal Eesti kaugseirekogumikus ilmunud artiklis uuriti Peipsi järve sinivetikaõitsenguid kaugseire meetodite abil aastatel 2003–2011 ja 2016–2022. Tulemused näitasid, et Peipsi järves mõjutavad sinivetikaõitsenguid oluliselt ilmastikuolud, näiteks veetemperatuur ja veetaseme kõrgus. Samuti kinnitati, et Peipsi Suurjärves algavad õitsengud tavaliselt paar nädalat hiljem kui Lämmi- või Pihkva järves, ning kestavad ka kauem. Lisaks leiti, et alates 2016. aastast on õitsengute kõrgaeg nihkunud augustist septembrisse. (Pall et al., 2023)

### 3. Materjal ja metoodika

#### 3.1 Kasutatud andmestikud

Andmeanalüüsi tegemiseks kasutati töös kahte andmestiku: ERA5 (Hersbach, H. et al., 2023) ja Lakes\_cci (Carrea et al., 2022). ERA5 andmestikust saadi ilmaparameetrid ning Lakes\_cci (*Climate Change Initiative* – Kliima muutuste initsiatiiv) andmestikust saadi veeparameetrid.

##### 3.1.1 ERA5 andmestik

ERA5 on ECMWFi (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* - Euroopa Keskpika Ilmaennustuse Keskus) 5. generatsiooni atmosfääri järelanalüüs (Hersbach, H. et al., 2023). Atmosfääri järelanalüüsi on ECMWF teinud alates aastast 1979 (Hersbach, H. et al., 2020). Järelanalüüsi mudelis kasutatakse ilmaparameetrit, mida korrigeeritakse olemasolevate mõõtmisandmetega, et luua ilmastikuandmete arhiivid, mis vastavad võimalikult täpselt tegelikule ilmastikule (Hersbach, H. et al., 2023).

Esimene atmosfääri järelanalüüs toimus FGGE (*First GARP Global Experiment* - Esimene globaalse atmosfääriuringute programmi ülemaailmne eksperiment) projekti raames, mille eesmärk oli koguda detailseid mõõtmisi atmosfääri kohta ülemaailmselt. FGGE projekt seadis endale neli eesmärki (FGGE: First GARP Global Experiment — AOSS Library, n.d.):

1. Saada parem arusaamine atmosfääri liikumisest, mille abil oleks võimalik välja töötada realistlikumad mudelid ilma ennustamiseks
2. Hinnata ilmaprognooside limiite
3. Töötada välja paremad meetodid meteoroloogiliste mõõtmiste assimileerimiseks
4. Kujundada meteoroloogiline vaatlussüsteem ilmaennustuste juhtimiseks.

FGGE projektile järgnesid ERA järelanalüüsid: ERA-15 (1979-1994), ERA-40 (1957-2002), ERA-Interim (1979-2019) ja ERA5 (1950-olevik). Kuna ERA5 ruumiline eraldusvõime on ERA-interimiga võrreldes parem (31 km, 80 km) ja ajaline lahutus 1 tund, võimaldab see analüüsida Peipsi järve erinevaid osi paremini. (Hersbach et al., 2020)

ERA5 järelanalüüsi abil võrreldakse vetikaõitsenguid 2 meetri kõrgusel oleva õhutemperatuuriga (°C), kogusademete arvuga (mm) ja 10 meetri kõrgusel oleva tuulekiirusega (m/s). ERA5

(Hersbach, H. et al., 2023) järelanalüüsi andmed tõmmati alla Copernicuse kliimaandmete teenusest (*Copernicus Climate Change Service, 2024*).

### 3.1.2 Lakes\_cci andmestik

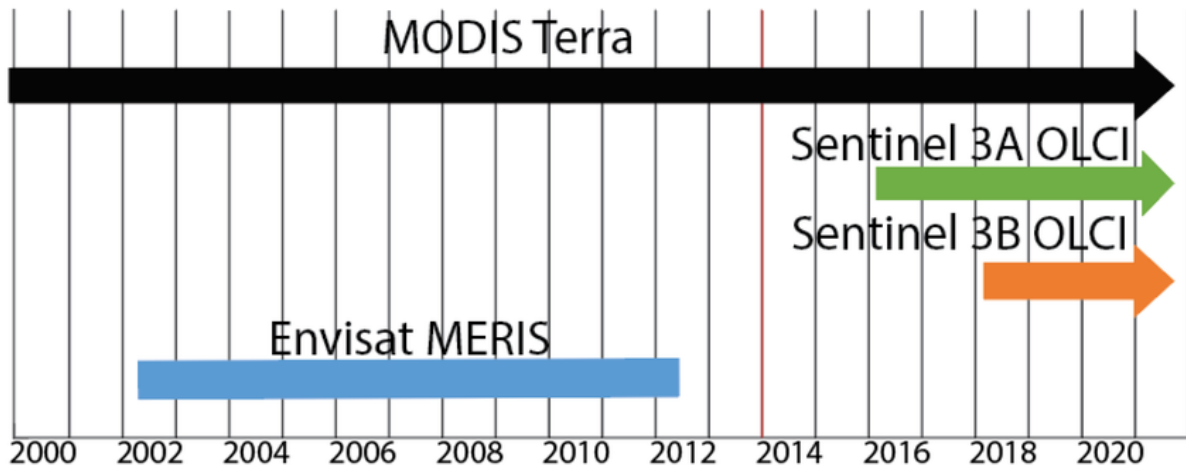
Lakes\_cci (Carrea et al., 2022) (*Climate Change Initiative – Kliima muutuste initsiatiiv*) on järvedele suunatud Euroopa Kosmoseagentuuri projekt, mille abil koguti ülemaailmselt üle 2000 järve kohta erinevaid andmeid, näiteks pinnavee temperatuur, jää katvus, klorofüll-a kontsentratsioon, hägusus jms. Andmestik sisaldab andmeid aastast 1992 kuni 2020. Lakes\_cci projekti eesmärk on toota ja valideerida ECV (*Essential Climate Variable – Oluline kliima muutuja*) alla kuuluvaid kliimamuutujaid. (Lakes, n.d.)

Lakes\_cci andmestikust kasutati selles töös parameetreid:

1. Klorofüll-a kontsentratsioon
2. Järve pinnavee temperatuur
3. Järvevee pinna kõrgus võrdlustasemest

Klorofüll-a kontsentratsioonid Lakes\_cci andmestikust on kättesaadaval alates 2002. aastast, kui Envisati missioon algas ja sellega MERIS (*Medium Resolution Imaging Spectrometer - kesklahutusega pildispektromeeter*) sensor orbiidile saadeti. MERIS töötas kogu Envisati missiooni aja ning seetõttu on meil klorofüll-a andmed aastani 2011 (joonis 1). (*Meris overview, n.d.*)

Kui Envisati missioon lõpetas töötamise 2012. aastal, kasutati Lakes\_cci andmestiku täitmiseks MODIS-e (keskmise lahutusvõimega pildi spektroradiomeeter) sensori andmeid, mis oli kahe satelliidi peal: Terra (alates 1999) ja Aqua (alates mai 2002). 2016. aastal lennutas Euroopa Kosmoseagentuur orbiidile Sentinel 3A satelliidi ning koos sellega MERIS-e sensori järelkäija – OLCI (*Ocean and Land Colour Instrument - ookeani ja maismaa värvuse mõõtja*) sensori, mis asub alates 2018. aastast ka Sentinel 3B satelliidi pardal, pärast selle orbiidile lennutamist. (Wynne et al., 2021)



**Joonis 1.** Lakes\_cci andmestikus kasutatavate sensorite andmete kogumise perioodid. Noolega on toodud sensorid, mis on jätkuvalt töös (Wynne et al., 2021).

Töös kasutatud Lakes\_cci versioonis 2.02 ei ole aastatel 2012 kuni 2015 Peipsi järve kohta andmeid, ehk vetikaõitsengute analüüsimiseks kasutatakse andmeid aastatest 2002 kuni 2011 ja 2016 kuni 2020.

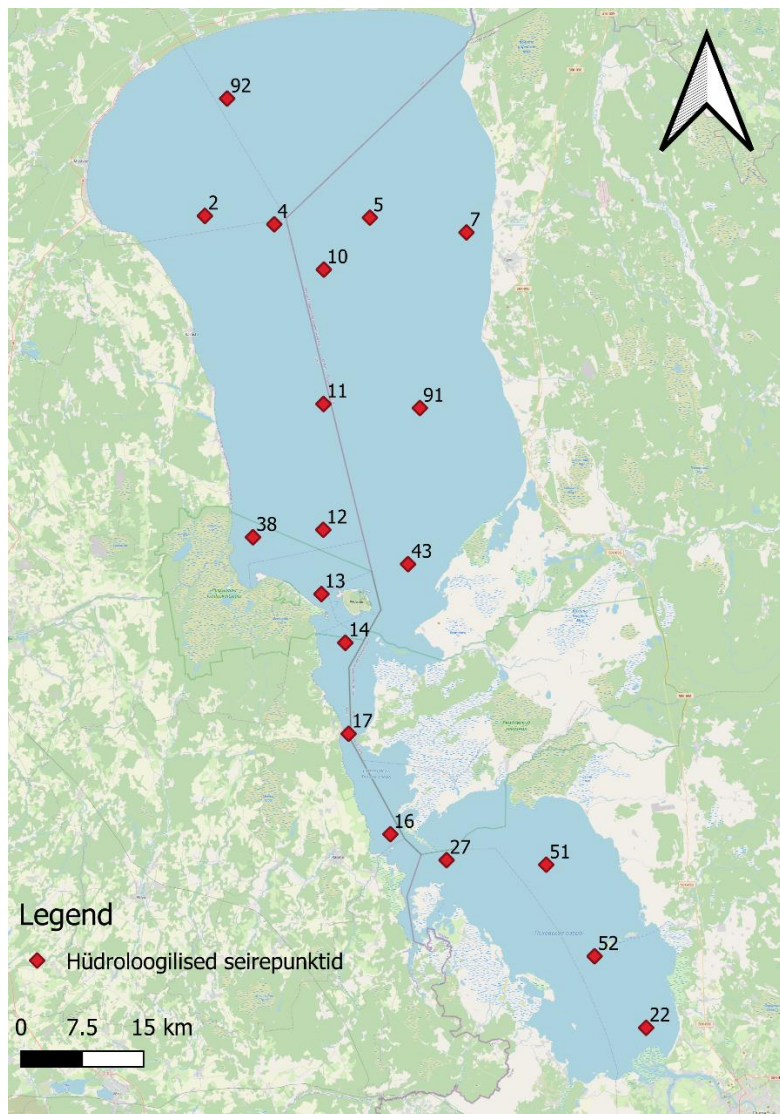
### 3.2 Kasutatud tarkvara

Andmeanalüüsi tegemiseks kasutati kahte erinevat platvormi. Töö esimeses osas kasutati pilditöötlusprogrammi SNAP (*The Sentinel Application Platform*, versioon 9.0.0), et eksportida Lakes\_cci andmestiku tooteid ning valmistada neid ette analüüsimiseks. Euroopa Kosmoseagentuuri poolt tootetud pilditöötlusprogrammi SNAP võimaldab inimestel vaadata ja analüüsida erinevate satelliitide kaugseireandmeid („SNAP Spurs Earth Observation Innovation with One Million Downloads,“ 2022)

Töö teises osas kasutati andmeanalüüsi tarkvara R (versioon 4.3.1) ja RStudio Desktopi (versioon 2023.12.0), et analüüsida Lakes\_cci ja ERA5 andmeid koos. R on statistilise andmete analüüsimiseks kasutatav vaba ja avatud lähtekoodiga tarkvara ning programmeerimiskeel ja RStudio Desktop on avatud lähtekoodiga integreeritud arenduskeskkond (IDE) R-ile (Yeager, 2023). RStudios kasutati kahte välist paketti graafikute tegemiseks: ggplot2 (versioon 3.5.0), mille abil tehti tõusu- ja languseperioodi graafikuid, ning BruceR (versioon 2023.9), mille abiga tehti korrelatsioonigraafikuid.

### 3.3 Andmete analüüs

Klorofüll-a, vee pinnatemperatuuri ja veetaseme kõrguse andmete kättesaamiseks Lakes\_cci andmestikust kasutati pilditöötlusprogrammi SNAP, kust tööriistade abiga saadi soovitud koordinaatidelt andmed kätte. Koordinaadid, kust andmeid koguti, võeti vastavalt Peipsi järve seirepunktide järgi (joonis 2). Rohkemate andmete saamiseks sai määrata akna suuruse (*window size*), mis võimaldas iga punkti kohta saada mõõtmiste piirkonna suuruseks 3x3 pikslit. See tähendas, et iga punkti keskme ümber võeti arvesse ümbritsevat 3x3 pikslite ala.



**Joonis 2.** Peipsi järve hüdroloogilised seirepunktid, OpenStreetMap.

Seejärel filtreeriti R-i abiga välja mõõtmised, kus klorofüll-a määramatuse protsent oli üle 50%, mille tagajärjel jäi andmestikust 90% alles, kuid filtreeriti välja enamus ebatäpseid mõõtmisi.

Kuna saadud andmete aegread olid auklikud, rakendati klorofüll-a, pinnavee temperatuuri ja veetaseme kõrguse andmetele aegridade täitmiseks lineaarset regressioonimudelit *loess (locally estimated scatterplot smoothing* – lokaalselt hinnatud hajuvusdiagrammi silumine), kus liikuva akna laius (*span*) oli 0,27°. ERA5 Atmosfääri järelanalüüsi andmete aegridadel auke ei olnud ning andmed oli võimalik koheaselt analüüsida.

Kuna Peipsi järve troofiline seisund on järve kolmes osas erinev (Nõges, 2001), jagati andmete analüüsimisel Peipsi järv kolmeks alajärveks: Peipsi Suurjärv, Lämmijärv ja Pihkva järv. Alajärvede siseselt ruumilist jaotust ei hinnatud. Kuna Lakes\_cci andmestik kogub veetaseme kõrguseid järve kohta olid veetaseme kõrgused Peipsi alamjärvedes samad.

Vetikaõitsengute tuvastamiseks seati piirmääraks klorofüll-a pikaajalise (1989-2019, juuni-september) kontsentratsiooni mediaanväärtused mille väärtustele lisati 5% (tabel 1), järgides Kangro et al., (2022) metoodikat.

**Tabel 1.** Vetikaõitsengute piirmääraks kasutatud klorofüll-a kontsentratsioonid (Kangro et al., 2022).

Järve osa	Pikaajalise klorofüll-a kontsentratsioon	+ 5%
Suurjärv	17,1 µg/L	18,0 µg/L
Lämmijärv	34,0 µg/L	35,7 µg/L
Pihkva järv	44,4 µg/L	46,6 µg/L

Klorofüll-a kontsentratsiooni tõusu- ja languseperioodide võrdlemiseks vaadati igal järve osal eraldi perioode, millal klorofüll-a kontsentratsioon oli tõusmas või langemas, ning jagati selle järel kahte rühma, kust arvutati välja parameetrite keskmised väärtused klorofüll-a kontsentratsiooni tõusu- ja languseperioodidel.

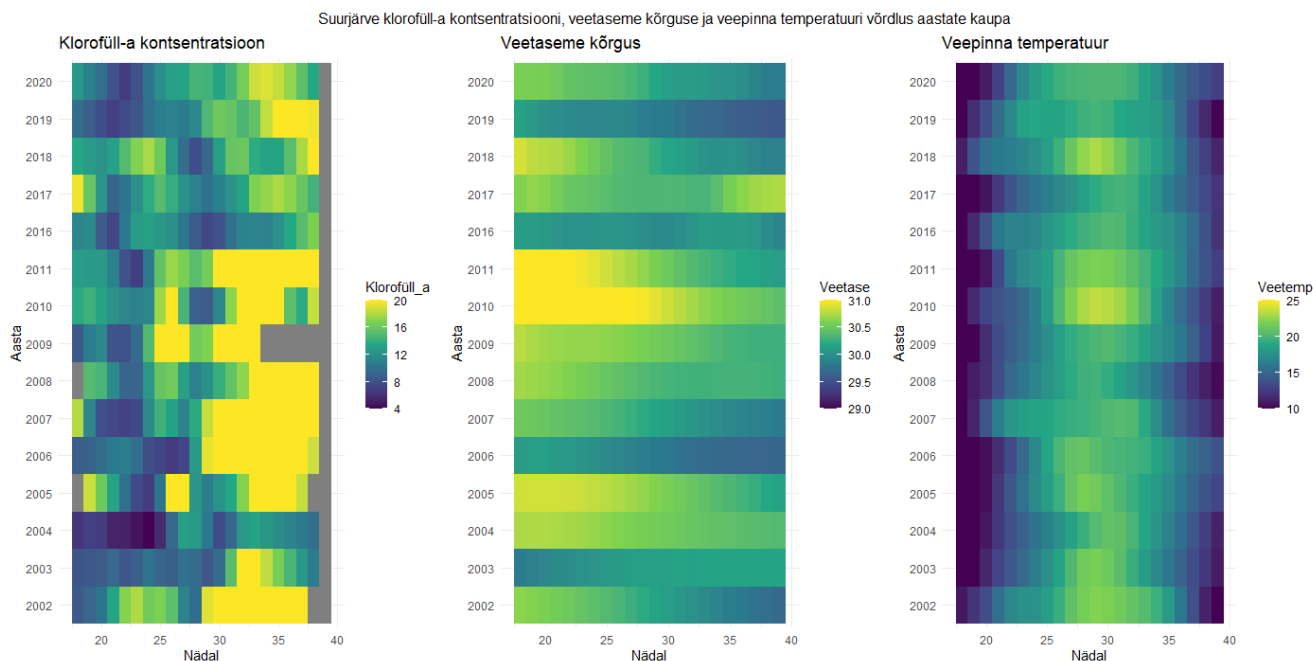
## 4. Tulemused

### 4.1 Vetikaõitsengud aastate võrdluses

Eelolevas peatükis analüüsitakse kolmes eri järve osas klorofüll-a kontsentratsiooni aastate lõikes ning võrreldakse erinevate ilma- ja veeparameetrite korrelatsioone klorofüll-a kontsentratsiooniga.

#### 4.1.1 Vetikaõitsengud Peipsi Suurjärves

Suurjärve keskmine klorofüll-a kontsentratsioon vegetatsiooniperioodil (mai-september) oli 15,5 µg/L. Vegetatsiooniperioodi keskmine klorofüll-a kontsentratsioon on alates 2011. aastast olnud languses. Suurim keskmine klorofüll-a kontsentratsioon oli 2007. aastal, mil kontsentratsioon oli 22,7 µg/L, väikseim oli aastal 2004 (8,9 µg/L). Vetikaõitsenguid ei esinenud ainsana 2004. aastal. 2016. aastal tõusis klorofüll-a tase üle õitsengu piirmäära alles septembri lõpus. Muudel aastatel olid vetikaõitsengud Suurjärves vähemalt ühel korral aastas. Vaadates joonist 3, on näha trendi, et vetikaõitsengud toimuvad vegetatsiooniperioodi teises pooles, siis kui pinnavee temperatuur on läinud soojemaks.

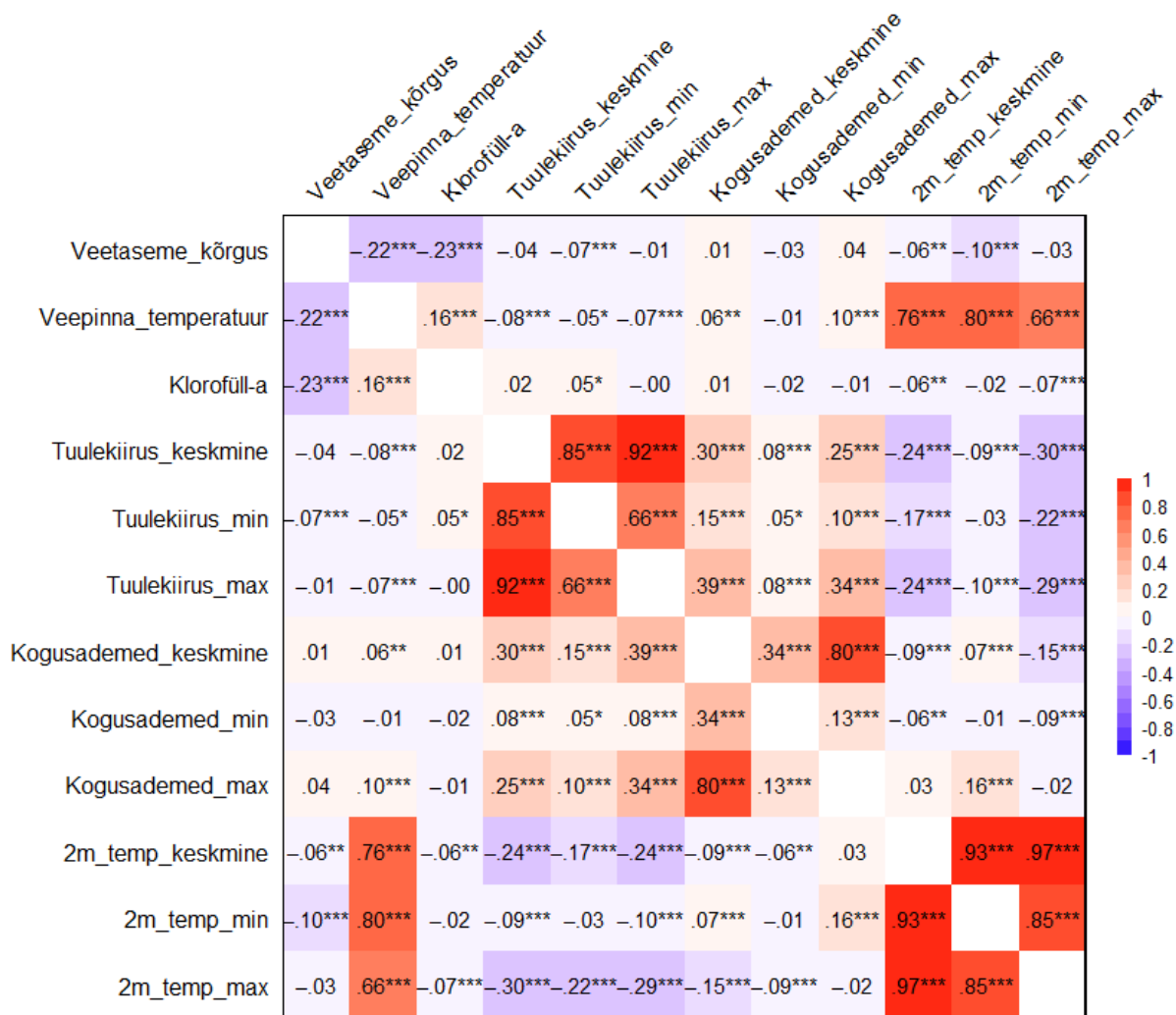


**Joonis 3.** Veetaseme kõrguse, veepinna temperatuuri ja klorofüll-a kontsentratsiooni võrdlus Suurjärves aastate kaupa.

Jooniselt 3 näeme ka, et vegetatsiooniperioodi alguses on veetaseme kõrgus suurem ning langeb aja möödudes. Kõrgematel veetaseme perioodidel ei ole ka esinenud õitsenguid ning õitsengud hakkavad esinema veetaseme langedes. Vaadates 2004. aastat, millal klorofüll-a keskmine kontsentratsioon oli aastate võrdluses väiksem, oli veetaseme kõrgus 30,6 m, mis oli keskmisest (30,3 m) 0,3 meetrit kõrgem. Pinnavee temperatuur oli 15,6 °C, mis oli keskmisest (16,3 °C) 0,7 °C kraadi külmem. Lisaks oli 2-meetri õhutemperatuur 0,8 °C keskmisest (15,6) külmem ja tuulekiirus 0,2 m/s keskmisest (4,2 m/s) kiirem.

Uurides 2007. aastat lähemalt mil klorofüll-a keskmine kontsentratsioon oli aastate võrdluses suurim, leiame, et veetaseme kõrgus oli 0,1 meetrit madalam, veepinna temperatuur 0,1 °C soojem, 2-meetri õhutemperatuur 0,2 °C soojem, keskmine tuulekiirus 0,1 m/s kiirem aastate keskmisest.

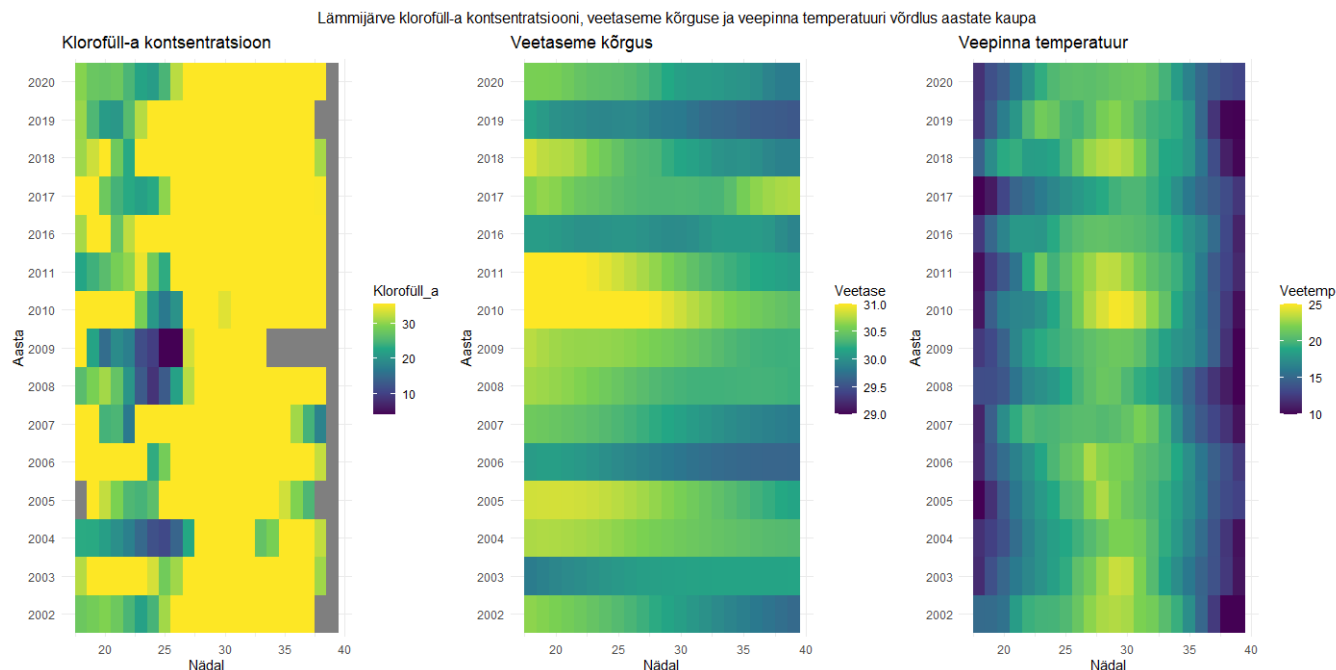
Kui vaadata Suurjärve parameetrite korrelatsioonitabelit (joonis 4), näeme, et klorofüll-a kontsentratsioonil on statistiliselt oluline negatiivne korrelatsioon veetaseme kõrgusega ( $p < 0,001$ ). Statistiliselt oluline positiivne korrelatsioon esines ka veepinna temperatuuri ja klorofüll-a kontsentratsiooni vahel ( $p < 0,001$ ). Klorofüll-a kontsentratsiooni ja 2-meetri keskmise temperatuuri ning 2-meetri keskmise maksimaalse temperatuuri vahel esineb statistiliselt oluline negatiivne korrelatsioon (vastavalt  $p < 0,05$  ja  $p < 0,001$ ). Samuti esineb statistiliselt oluline positiivne korrelatsioon ( $p < 0,05$ ) klorofüll-a kontsentratsioonil päevase minimaalse tuulekiiruse keskmise parameetriga.



**Joonis 4.** Suurjärve kõikide mõõtmispunktide ilma- ja veeparameetrite korrelatsioonigraafik (\*  $p < 0,05$ , \*\*  $p < 0,01$ , \*\*\*  $p < 0,001$ ), mida punasem seda suurem positiivne korrelatsioonikordaja.

#### 4.1.2 Vetikaõitsengud Lämmijärves

Lämmijärve keskmine klorofüll-a kontsentratsioon vegetatsiooniperioodil oli 50,4  $\mu\text{g/L}$ . Keskmine kontsentratsioon oli suurim aastal 2003 (64,6  $\mu\text{g/L}$ ) ja väikseim aastal 2004 (31,2  $\mu\text{g/L}$ ). Jooniselt 5 on näha, et Lämmijärves algavad vetikaõitsengud juuni keskel. Vetikaõitsengud toimusid igal aastal. Tihti oli lisaks suviste vetikaõitsengutele märgata ka vegetatsiooniperioodi alguses ehk maikuu toimuvat õitsengut.

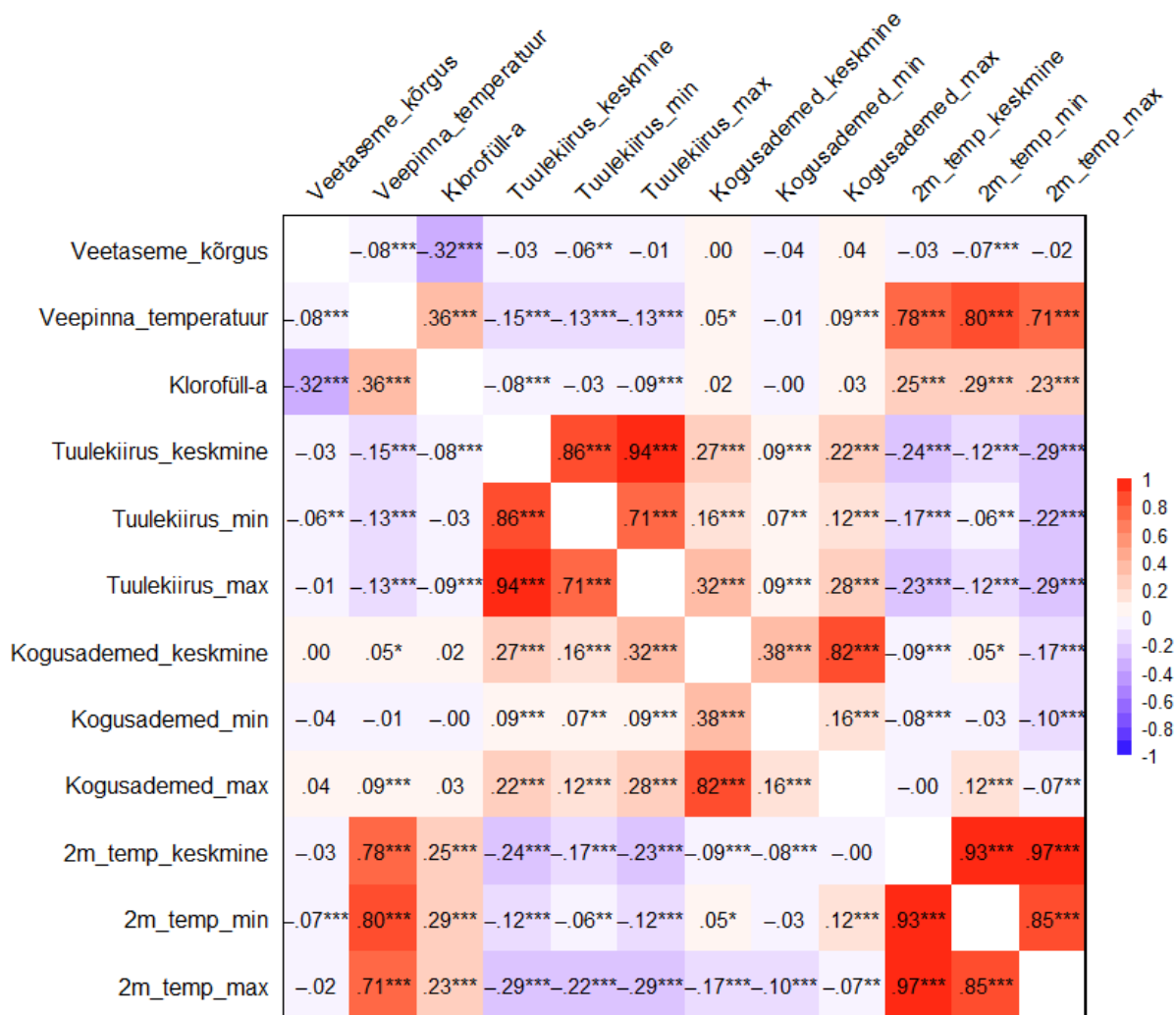


**Joonis 5.** Veetaseme kõrguse, veepinna temperatuuri ja klorofüll-a kontsentratsiooni võrdlus Lämmijärves aastate kaupa.

Uurides lähemalt aastat 2003, mil klorofüll-a keskmine kontsentratsioon oli aastate võrdluses suurim, oli veetaseme kõrgus 0,2 meetrit madalamal aastate keskmisest (30,3 m) ja veepinna temperatuur oli 17,6 °C, mis oli 0,1 °C külmem aastate keskmisest. 2-meetri temperatuur oli 15,3 °C, mis oli 0,4 °C külmem aastate keskmisest. Tuulekiirus oli 3,9 m/s, mis oli aastate keskmisest 0,1 m/s kiirem.

Aastal 2004, mil klorofüll-a keskmine kontsentratsioon oli Lämmijärves väikseim, oli veetase 30,6 meetrit, mis oli keskmisest 0,3 meetrit kõrgem. Veepinna temperatuur oli 17,2 °C, mis oli keskmisest 0,5 °C madalam. 2-meetri temperatuur oli 15 °C, mis oli keskmisest 0,7 °C külmem. Tuulekiirus oli 4,0 m/s, mis oli aasta keskmisest 0,2 m/s kiirem.

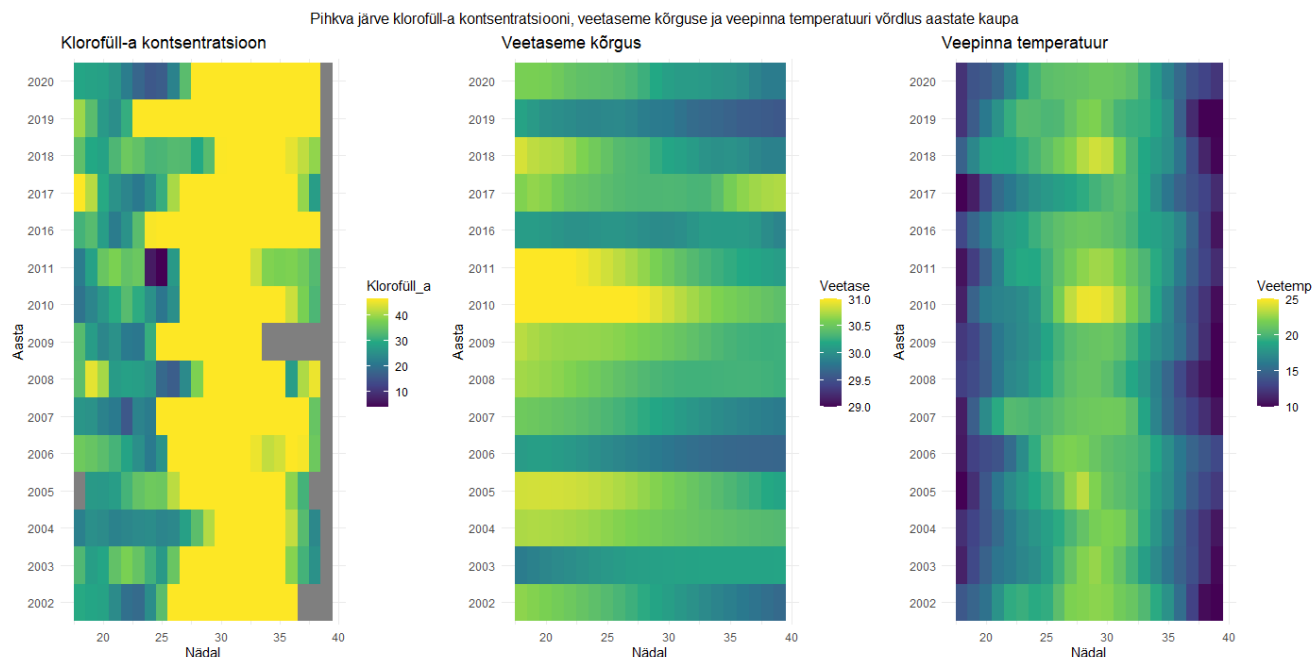
Vaadates Lämmijärve parameetrite korrelatsioonigraafikut (joonis 6), näeme statistiliselt olulist negatiivset seost klorofüll-a kontsentratsioonil veetaseme kõrguse ja keskmise- ja maksimaalse tuulekiiruse parameetritega ( $p < 0,001$ ). Märkatav statistiliselt oluline positiivne seos on ka klorofüll-a kontsentratsioonil Lämmijärves veepinna temperatuuriga ja 2-meetri õhutemperatuuri parameetrite vahel ( $p < 0,001$ ). Suurim positiivne korrelatsioon õhutemperatuuri parameetritest oli klorofüll-a tasemel 2-meetri õhutemperatuuri miinimumiga.



**Joonis 6.** Lämmijärve kõikide mõõtmispunktide ilma- ja veeparameetrite korrelatsioonigraafik (\*  $p < 0,05$ , \*\*  $p < 0,01$ , \*\*\*  $p < 0,001$ ), mida punasem seda suurem positiivne korrelatsioonikordaja.

#### 4.1.3 Vetikaõitsengud Pihkva järves

Pihkva järves oli vegetatsiooniperioodi ajal klorofüll-a keskmine kontsentratsioon 61,1  $\mu\text{g/L}$ . Suurim keskmine kontsentratsioon oli aastal 2007 (98,8  $\mu\text{g/L}$ ) ja väikseim 2004. aastal (33,2  $\mu\text{g/L}$ ). Jooniselt 7 on näha, et õitsengud algavad peamiselt juuli alguses.

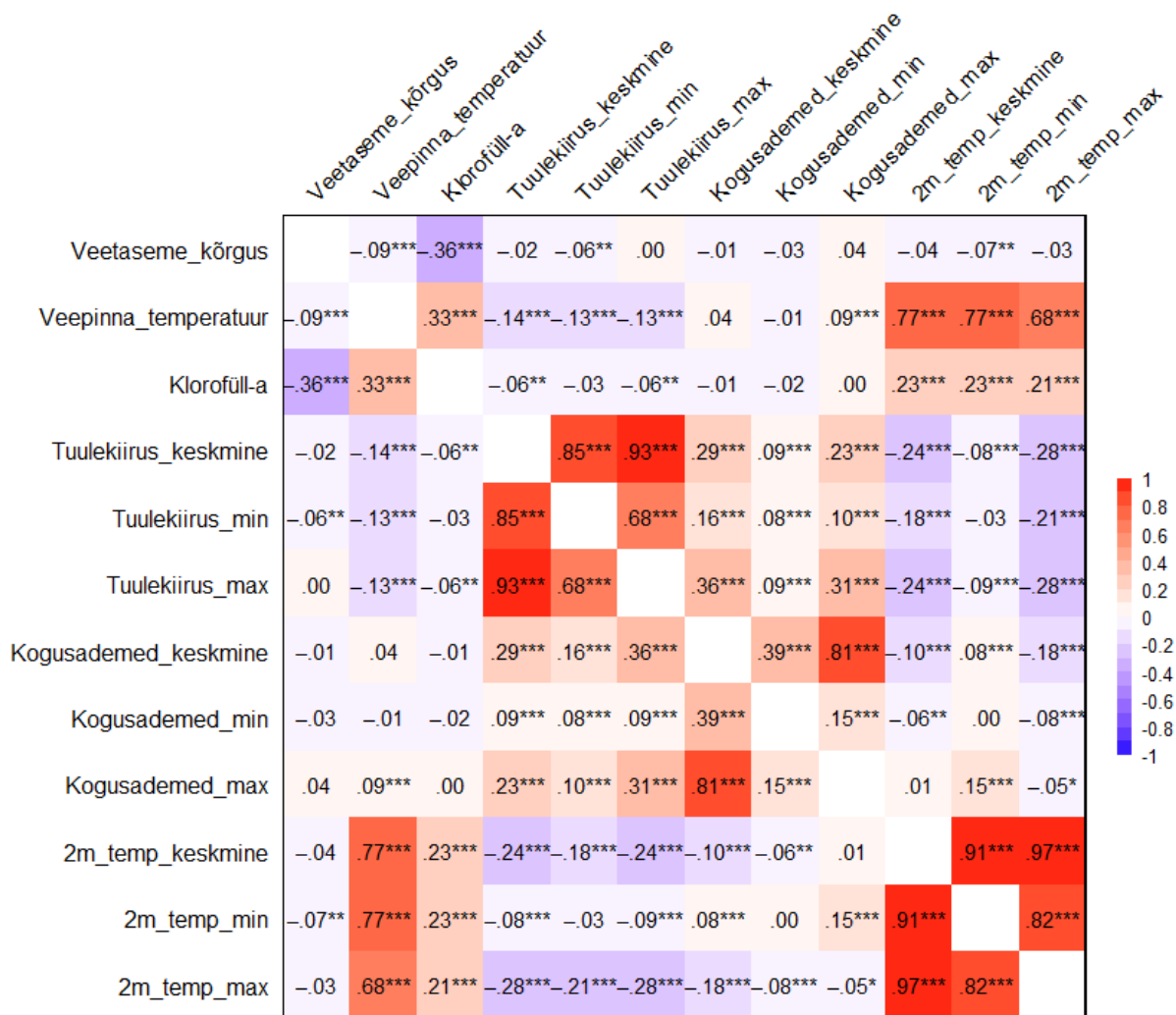


**Joonis 7.** Veetaseme kõrguse, veepinna temperatuuri ja klorofüll-a kontsentratsiooni võrdlus Pihkva järves aastate kaupa.

Aastal 2007, mil klorofüll-a kontsentratsioon oli suurim, oli veetaseme kõrgus 30,2 m, mis oli 0,1 meetrit madalam kui aastate keskmine. Veepinna temperatuur oli 17,7 °C, mis oli 0,2 °C soojem kui keskmine. Samuti oli ka 2-meetri temperatuur 0,2 °C soojem kui aastate keskmine (17,6 °C). Tuulekiirus oli 0,2 m/s kiirem kui aastate keskmine (5,6 m/s).

Aastal 2004, mil klorofüll-a kontsentratsioon oli väikseim, oli veetaseme kõrgus 30,6 m, mis oli 0,3 meetrit kõrgem kui aastate keskmine, veepinna temperatuur 0,5 °C külmem ning 2-meetri õhutemperatuur 0,8 °C külmem kui aastate keskmine. Tuulekiirus oli 0,2 m/s kiirem kui ülejäänutel aastatel keskmiselt.

Vaadates Pihkva järve parameetrite korrelatsioonigraafikut (joonis 8), näeme klorofüll-a kontsentratsioonil statistiliselt olulist negatiivset seost veetaseme kõrgusega ( $p < 0,001$ ) ja päevase keskmise- ja minimaalse tuulekiirusega ( $p < 0,01$ ). Statistiliselt oluline positiivne korrelatsioon on klorofüll-a kontsentratsioonil ka veepinna temperatuuriga ( $p < 0,001$ ) ja 2-meetri õhutemperatuuri parameetritega ( $p < 0,001$ ).



**Joonis 8.** Pihkva järve kõikide mõõtmispunktide ilma- ja veeparameetrite korrelatsioonigraafik (\*  $p < 0,05$ , \*\*  $p < 0,01$ , \*\*\*  $p < 0,001$ ), mida punasem seda suurem positiivne korrelatsioonikordaja.

#### 4.2 Vetikaõitsenguid esilekutsuvad ja pärssivad tingimused

Eelolevas peatükis analüüsitakse kolmes eri järve osas perioode, mil klorofüll-a kontsentratsioon suurenes või vähenes ning võrreldakse erinevate ilma- ja veeparameetrite tulemusi nendel perioodidel.

#### 4.2.1 Peipsi Suurjärv

Peipsi Suurjärves olid klorofüll-a tõusu- ja languseperioodidel ilmaparameetrites märgatavad erinevused, mis on toodud tabelis 2. Kui klorofüll-a kontsentratsioon suurenes, oli keskmine veetaseme kõrgus 0,1 meetrit madalam kui languseperioodidel. Samuti oli 2-meetri õhutemperatuuri päevane keskmine-, minimaalne- ja maksimaalne temperatuur soojem klorofüll-a tõusuperioodidel, vastavalt 1,7 °C, 1,5 °C, 1,9 °C. Soojem oli ka veepinna temperatuur, mis oli tõusuperioodidel keskmiselt 1,6 kraadi kõrgem. Keskmine tuulekiirus oli tõusu- ja languseperioodidel sama suur, kuid tõusuperioodidel oli päevane minimaalne tuulekiirus 0,1 m/s aeglasem ja päevane maksimaalne tuulekiirus keskmiselt 0,1 m/s suurem kui languseperioodidel. Kogusademetekeskmine oli mõlemal perioodil 0,1 mm ja minimaalne 0,0 mm. Kogusademetekeskmine päevase maksimumi keskmine oli klorofüll-a tõusuperioodidel 0,1 mm suurem kui languseperioodidel.

**Tabel 2.** Suurjärve ilma- ja veeparameetrite võrdlus klorofüll-a kontsentratsiooni tõusu- ja languseperioodidel.

Parameeter	Tõusuperiood	Languseperiood	P-väärtus	Statistiliselt oluline?
Veetaseme kõrgus (m)	30,3	30,4	0,05892	
Veepinna temperatuur (°C)	17,3	15,7	$< 2,2 \times 10^{-16}$	*
2-meetri temperatuuri päevane keskmine (°C)	16,7	15,0	$< 2,2 \times 10^{-16}$	*
2-meetri temperatuuri min (°C)	12,3	10,8	$< 2,2 \times 10^{-16}$	*
2-meetri temperatuuri max (°C)	20,0	18,1	$< 2,2 \times 10^{-16}$	*
Tuulekiirus keskmine (m/s)	4,2	4,2	0,6914	
Tuulekiirus min (m/s)	2,1	2,2	0,271	
Tuulekiirus max (m/s)	6,4	6,3	0,6017	
Kogusademed keskmine	0,1	0,1	0,01614	*

(mm)				
Kogusademed min (mm)	0,0	0,0	0,07653	
Kogusademed max (mm)	0,9	0,8	0,0003894	*

Andmetele tehtud t-testide põhjal on näha, et statistiliselt olulised erinevused ( $p < 0,05$ ) tõusu- ja languseperioodide parameetrite vahel on veepinna temperatuuril, 2-meetri õhutemperatuuril (keskmine, minimaalne ja maksimaalne) ja kogusademetes maksimaalsel- ja keskmisel parameetritel. Statistiliselt olulisi erinevusi ei tuvastatud tuulekiiruse parameetritel (keskmine, minimaalne ja maksimaalne), veetaseme kõrgusel ja kogusademetes minimaalsel keskmisel ( $p > 0,05$ ).

#### 4.2.2 Lämmijärv

Lämmijärves olid klorofüll-a tõusu- ja languseperioodidel parameetrites erinevusi, mis on toodud tabelis 3. Klorofüll-a tõusuperioodil oli veetaseme vastavalt 0,1 meetrit madalam kui languseperioodil. Veepinna temperatuur oli tõusuperioodidel 1,2 °C soojem kui languseperioodidel. 2-meetri õhutemperatuuri päevane keskmine-, minimaalne- ja maksimaalne temperatuur olid vastavalt 1,6 °C, 1,4 °C ja 1,6 °C soojemad kui languseperioodi temperatuurid. Tuulekiiruse päevane keskmine-, minimaalne- ja maksimaalne kiirus oli tõusuperioodil 0,1 m/s aeglasem kui languseperioodil. Kogusademetes päevased keskmised olid klorofüll-a tõusu- ja languseperioodidel sama suured.

**Tabel 3.** Lämmijärve ilma- ja veeparameetrite võrdlus Klorofüll-a kontsentratsiooni tõusu- ja languseperioodidel.

Parameeter	Tõusuperiood	Languseperiood	P-väärtus	Statistiliselt oluline?
Veetaseme kõrgus (m)	30,3	30,4	$3,463 \times 10^{-5}$	*
Veepinna temperatuur (°C)	18,7	17,5	$9,747 \times 10^{-15}$	*
2-meetri temperatuuri päevane keskmine (°C)	16,8	15,2	$< 2,2 \times 10^{-16}$	*
2-meetri temperatuuri min	12,9	11,5	$6,693 \times 10^{-16}$	*

(°C)				
2-meetri temperatuuri max (°C)	20,1	18,5	$< 2,2 \times 10^{-16}$	*
Tuulekiirus keskmine (m/s)	3,8	3,9	0,03844	*
Tuulekiirus min (m/s)	2,2	2,3	0,08452	
Tuulekiirus max (m/s)	5,3	5,4	0,05778	
Kogusademed keskmine (mm)	0,1	0,1	0,8333	
Kogusademed min (mm)	0,0	0,0	0,3889	
Kogusademed max (mm)	0,6	0,6	0,9391	

Statistiliselt oluline erinevus ( $p < 0,05$ ) parameetrites esines klorofüll-a tõusu ja languseperioodidel veetaseme kõrgusel, veepinna temperatuuril, 2-meetri õhutemperatuuril (keskmine, minimaalne, maksimaalne) ja päevase keskmise tuulekiiruse parameetril. Statistiliselt ebaoluline erinevus oli päevase tuulekiiruse minimaalse- ja maksimaalse keskmise parameetritel ja kogusademetete päevase keskmise (keskmine, minimaalne, maksimaalne) parameetritel.

#### 4.2.3 Pihkva järv

Pihkva järve klorofüll-a tõusu- ja languseperioodide parameetrite erinevusi näitab tabelis 4 toodud statistika. Veetase oli klorofüll-a tõusuperioodidel 0,1 meetrit kõrgem kui languseperioodidel. Veepinna temperatuur oli tõusuperioodidel 2,2 °C soojem kui languseperioodidel. Samuti oli 2-meetri õhutemperatuuri päevane keskmine-, minimaalne- ja maksimaalne temperatuur vastavalt 2,2 °C , 1,9 °C ja 2,3 °C soojemad tõusuperioodidel kui languseperioodidel. Tuulekiiruse päevane keskmine kiirus oli tõusuperioodidel 0,2 m/s aeglasem võrreldes languseperioodidega. Samuti olid tõusuperioodidel minimaalse- ja maksimaalse päevase tuulekiiruse keskmised aeglasemad kui languseperioodidel. Mõlemad olid 0,2 m/s aeglasemad. Kogusademetete päevased keskmised olid eri perioodidel samad. Ainsana erines kogusademetete päevase maksimaalse keskmise kogus, mis oli tõusuperioodidel 0,1 mm suurem kui languseperioodidel.

**Tabel 4.** Pihkva järve ilma- ja veeparameetrite võrdlus Klorofüll-a kontsentratsiooni tõusu -ja languseperioodidel.

Parameeter	Tõusuperiood	Languseperiood	P-väärtus	Statistiliselt oluline?
Veetaseme kõrgus (m)	30,4	30,3	$9,685 \times 10^{-5}$	*
Veepinna temperatuur (°C)	19,1	16,9	$< 2,2 \times 10^{-16}$	*
2-meetri temperatuuri keskmine (°C)	17,4	15,2	$< 2,2 \times 10^{-16}$	*
2-meetri temperatuuri min (°C)	12,5	10,6	$< 2,2 \times 10^{-16}$	*
2-meetri temperatuuri max (°C)	20,9	18,6	$< 2,2 \times 10^{-16}$	*
Tuulekiirus keskmine (m/s)	3,8	4,0	0,001288	*
Tuulekiirus min (m/s)	2,0	2,2	0,009289	*
Tuulekiirus max (m/s)	5,5	5,7	0,0006328	*
Kogusademed keskmine (mm)	0,1	0,1	0,2564	
Kogusademed min (mm)	0,0	0,0	0,1565	
Kogusademed max (mm)	0,8	0,7	0,5126	

Statistiliselt olulised erinevused ( $p < 0,05$ ) klorofüll-a tõusu- ja languseperioodidel olid veetaseme kõrgusel, veepinna temperatuuril, 2-meetri õhutemperatuuri päevastel keskmistel (keskmine, minimaalne, maksimaalne) ja tuulekiiruse päevastel keskmistel (keskmine, minimaalne, maksimaalne). Statistiliselt ebaoluline erinevus oli kogusademetel päevaste keskmiste parameetritel (keskmine, minimaalne, maksimaalne).

## 5. Arutelu

### 5.1 Suurjärv

Peipsi Suurjärves oli aastate võrdluses märgata statistiliselt olulisi korrelatsioone klorofüll-a ja vee- ning ilmaparameetrite vahel, kuid kõik korrelatsioonid olid nõrgad ( $|R| < 0,3$ ). Klorofüll-a kontsentratsioonil oli nullilähedane negatiivne seos 2-meetri temperatuuri päevase keskmise ( $R^2 = -0,06$ ) ja päevase maksimaalse keskmise temperatuuriga ( $R^2 = -0,07$ ) ning statistiliselt oluline positiivne seos päevase tuulekiiruse minimaalse keskmisega ( $R^2 = -0,05$ ). Vastupidiselt (Pihu, 2001) tööle, kus seostati vetikaõitsenguid tuulevaikse, kuuma ilmaga, leiti käesolevas töös klorofüll-a kontsentratsioonil negatiivne korrelatsioon 2-meetri temperatuuri parameetrite vahel ning positiivne korrelatsioon tuulekiiruse päevase minimaalse keskmise vahel. 2-meetri temperatuuri parameetrite ja klorofüll-a negatiivse korrelatsiooni üheks põhjenduseks võib olla Suurjärve vetikaõitsengute omapära, kus vetikaõitsengud kestavad oktoobrini. Samal ajal aga hakkab juba 2-meetri õhutemperatuur langema ning tulemus võib tuua endaga kaasa negatiivse korrelatsiooni. Lisaks tuleks arvestada, et keskmistades teatud punktide andmeid ja uurides järveosa kui tervikut, ei pruugi alati konkreetset tugevat seost esile tulla, kuna nii klorofüll-a kui ka ilmaparameetrite osas on suur ruumiline varieeruvus, eriti õitsengu ajal. Seega, edaspidi peaks kaaluma teatud seirepunktide eraldi uurimist või järveosa jaotamist väiksemateks osadeks, et tuvastada täpsemaid ja selgemaid seoseid.

Statistiliselt oluliste, kuid siiski nõrkade seoste ilmumine klorofüll-a kontsentratsioonil veetaseme kõrguse ( $R^2 = -0,23$ ) ja veepinna temperatuuriga ( $R^2 = 0,16$ ) olid oodatavad kuna ka 2022. aasta kaugseire kogumikus (Pall et al., 2023) leiti klorofüll-a kontsentratsioonil negatiivne korrelatsioon veetaseme kõrgusega ja positiivne korrelatsioon veepinna temperatuuriga. Seoste nõrkuse üheks põhjenduseks võib olla veetaseme märkimisväärne kõikumine aastate lõikes (joonis 3) ning teiseks põhjenduseks see, et veetaseme kõrgus on küll oluline parameeter madalas järves, aga ei ole ainus, mis klorofüll-a kontsentratsiooni mõjutab.

Kui vaadata tabelit 2, kus võrreldakse klorofüll-a tõusu- ja languseperioodidel erinevaid parameetreid, näeme, et statistiliselt erinevad on ( $p < 0,05$ ) nii pinnavee temperatuur kui ka 2-meetri temperatuuri parameetrid, mis on paari kraadi võrra soojemad perioodidel, mil klorofüll-a kontsentratsioon on tõusmas. See informatsioon kinnitab eelnevalt mainitud klorofüll-a

kontsentratsiooni ja veepinna temperatuuri positiivset korrelatsiooni (Pall et al., 2023), andes täiendavat toetust nende kahe muutuja omavahelisele seosele. Samuti kehtestab see vastupidist nõrgale negatiivsele korrelatsioonile 2-meetri õhutemperatuuri ja klorofüll-a kontsentratsiooni vahel, kuna klorofüll-a tõusuperioodidel on täheldatud 1-2 °C soojemat õhutemperatuuri kui languseperioodidel.

Tabelist 2 ilmneb, et tuulekiiruse päevased keskmised-, maksimaalsed- ja minimaalsed kiirused ei erine oluliselt klorofüll-a tõusuperioodidel võrreldes languseperioodidega, olles keskmiselt kas 0,1 m/s kiiremad või aeglasemad. Kuna tuulekiiruse parameeter on võetud 10 meetri kõrguselt, ning see oli madalaim kõrgus, mis leidis ERA5 andmestikus, ei pruugi see väljendada veepinnal toimuvat. Samuti on tuulekiiruse varieeruvus vegetatsiooniperioodil suur, mistõttu on otsesed tuulekiiruse ja klorofüll-a kontsentratsiooni vahelised seosed nõrgad. Varasemad uuringud Peipsi järvel on osutanud, et tuulevaikne ilm soodustab vetikaõitsengute tekkimist (Pihu, 2001).

Reichwaldt ja Ghadouani (2012) uurimusest selgub, et tuulekiirus võib mõjutada vetikaõitsenguid mitmel viisil. Kõrged tuulekiirused võivad põhjustada vee segunemist ja kihistumise katkemist, mis võib ajutiselt vähendada vetikate kontsentratsiooni, kuna toitained ja vetikad segunevad kogu veekogus. See segunemine võib pärssida sinivetikate, mis vajavad stabiilset kihistumist, levikut. Teisest küljest võivad madalad tuulekiirused soodustada vee kihistumist, luues soodsad tingimused sinivetikate kasvuks ja õitsengute tekkeks. (Reichwaldt ja Ghadouani, 2012)

Haldna jt. (2008) on kirjeldanud Peipsi järve kui madalt ehk polümiktilist järve, kus tuule ja lainete tõttu on veemassid segunenud hästi ning veetemperatuuri kihistumist ei ole. Nõges jt. (2008) on leidnud, et madala veetaseme korral tõstavad lained Peipsi järves põhjaseteid, vabastades aja jooksul kogunenud toitained, mis viib vetikate vohamiseni. Seetõttu võib järeldada, et tuulekiirus võib vetikaõitsenguid mõjutada erinevatel viisidel, toimides nii pärssivalt kui ka esilekutsuvalt.

Kuigi päevaste maksimaalsete ja keskmiste sademete hulkade väärtused olid statistiliselt erinevad, viib nende väärtuste ümardamine samale tasemele ning tegelik erinevus on ebaoluline, mistõttu võib oletada, et sademete kogused ei mõjuta otseselt vetikaõitsenguid ehk klorofüll-a kontsentratsiooni tõusmist Peipsi Suurjärves. Samas on Silja Pöldma (2016) oma magistritöös märkinud, et kevadise lumikatte sulamisega kaasneb ränivetikate tõusust tulenev klorofüll-a

konsentratsiooni suurenemine Peipsi järves, kuna lumesulamisvesi kannab valgalalt toitaineid järve. Sellisele järeldusele jõudsid ka Reichwaldt ja Ghadouani (2012), kelle uurimusest selgus, et raskete vihmasadude ajal saabuv suur toitainete hulk kiirendab eutrofeerumist, samas kui pikemad kuivad perioodid põhjustavad aurustumist ja kihistumist. Lühiajaliselt võivad tugevad vihmajärgsed vetikaõitsenguid pärssida, kuna kihistumine katkeb.

Seega võib järeldada, et sademed võivad suurendada klorofüll-a kontsentratsiooni Peipsi järves. Vegetatsiooniperioodi alguses võib kõrge klorofüll-a kontsentratsioon olla tingitud lume sulamisest ja suurveest, mille tagajärjel satuvad veekogusse toitained.

## **5.2 Lämmijärv**

Lämmijärves olid klorofüll-a kontsentratsioonil statistiliselt olulised seosed ( $p < 0.05$ ) tugevamad kui Suurjärves. Klorofüll-a kontsentratsioonil oli keskmise tugevusega seosed ( $|R| > 0,3$ ) veetaseme kõrgusega ( $R^2 = -0,32$ ) ja veepinna temperatuuriga ( $R^2 = 0,36$ ). Nõrgad, kuid märgatavad seosed olid klorofüll-a kontsentratsioonil 2-meetri õhutemperatuuri parameetritega, kus korrelatsioonikordajad olid 2-meetri õhutemperatuuri päevasel keskmisel  $R^2 = 0,25$  ja päevase miinimumi keskmisel  $R^2 = 0,29$ . 2-meetri õhutemperatuuri päevase maksimumi keskmisel oli klorofüll-a kontsentratsiooniga positiivne korrelatsioon  $R^2 = 0,23$ . Samuti olid statistiliselt olulised kuid väike korrelatsioonikordajaga negatiivsed seosed klorofüll-a kontsentratsioonil tuulekiiruse päevase minimaalse- ja keskmise kiirusega, vastavalt  $R^2 = -0,09$  ja  $R^2 = -0,08$ . Kõik eelmainitud korrelatsioonid olid oodatavad ning kinnitavad varasemate teadmiste alust (Pihu, 2001; Pall et al., 2023), et vetikaõitsengutele soodsad tingimused hõlmavad madalamat veetaset, sooja veetemperatuuri ning tuulevaikset kuuma ilma.

Vaadates tabelit 3 näeme, et Lämmijärves esinevad klorofüll-a tõusu ja languseperioodidel andmed, mis kinnitavad korrelatsioonitabelis toodud statistika põhjal tehtud järeldusi. Statistiliselt erinevad ( $p < 0,05$ ) veepinna temperatuur ja 2-meetri õhutemperatuuri päevased keskmised, mis on mõlemad 1-2 °C võrra soojemad klorofüll-a tõusuperioodidel võrreldes languseperioodidega. Samuti erinevad statistiliselt tuulekiiruse päevane keskmine kiirus, mis on 0,1 m/s aeglasem klorofüll-a tõusuperioodidel, ja veetaseme kõrgus, mis on keskmiselt 0,1 meetrit madalam olnud klorofüll-a tõusuperioodidel. Statistiliselt ebaolulised olid kogusademete päevased keskmised ja tuulekiiruse minimaalne- ja maksimaalne päevase keskmise parameetrid.

Kuna tuulekiiruse parameetrid ei erine märkimisväärselt üksteisest, võib ka Lämmijärves järeldada, et selline meetodika ja tuulekiiruse parameetri kõrgus on ebatäpne viis klorofüll-a kontsentratsiooni ja tuulekiiruse vaheliste seoste leidmiseks.

### 5.3 Pihkva järv

Ka Pihkva järves esines klorofüll-a ja erinevate ilma- ja veeparameetrite vahel statistiliselt olulisi seoseid. Statistiliselt olulised kuid nõrgad seosed ( $|R| < 0,3$ ) esinesid klorofüll-a kontsentratsioonil tuulekiiruse päevase minimaalse- ja maksimaalse keskmise kiirusega, korrelatsioonikordaja mõlemal  $R^2 = -0,06$ . Lisaks esinesid nõrgad seosed ka klorofüll-a kontsentratsioonil 2-meetri õhutemperatuuri parameetritega – päevase minimaalse- ja maksimaalse õhutemperatuuri keskmisega (vastavalt  $R^2 = 0,23$  ja  $R^2 = 0,21$ ) ning päevase keskmise õhutemperatuuriga ( $R^2 = 0,23$ ). Statistiliselt olulised keskmise tugevusega seosed ( $|R| > 0,3$ ) esinesid klorofüll-a kontsentratsioonil veetaseme kõrguse ( $R^2 = -0,36$ ) ja veepinna temperatuuriga ( $R^2 = 0,33$ ).

Haldna jt (2008) leidsid oma uuringu käigus, et veetaseme kõrgus mõjutab klorofüll-a kontsentratsiooni rohkem Peipsi järve madalamates alajärvedes, Pihkva- ja Lämmijärves, kui Peipsi Suurjärves. Enim oli näha veetaseme kõrguse mõju Pihkva järves, kus sooja veetemperatuuri ja madala veetaseme kõrguse kombinatsioon viis toitainete kontsentratsiooni suurenemiseni, mis omakorda toetas tsüanobakterite ja fütoplanktonite kasvu.

Kuna Pihkva järv on hüpertroofne järv tähendab see, et järves on väga suur toitainete sisaldus, mis mõjutab ka vetikaõitsenguid (Nõges, 2001). Suure toitainete sisalduse tõttu võib ka järeldada, et Pihkva järves ei mõjuta klorofüll-a taset nii suurel määral ilma- ja veeparameetrid võrreldes Suurjärve ja Lämmijärvega.

Lisaks esinesid ka Pihkva järves klorofüll-a tõusu- ja languseperioodidel ilma- ja veeparameetrites erinevusi. Statistiliselt olulised erinevused ( $p < 0,05$ ) tõusu- ja languseperioodide vahel olid: veetaseme kõrgusel, veepinna temperatuuril, 2-meetri õhutemperatuuri parameetritel ja tuulekiiruse parameetritel. Klorofüll-a tõusuperioodil oli veetaseme kõrgus 0,1 meetrit kõrgem kui languseperioodidel. Üks võimalik põhjus veetaseme suuremale kõrgusele tõusuperioodidel võib olla see, et klorofüll-a kontsentratsiooni muutused on mõjutatud erinevatest teguritest, mitte ainult veetasemest. Seetõttu võisid olla kõrgema veetasemega perioodil soojemad veetemperatuuri ja ilmingimused, mida toetas ka klorofüll-a

tõusu- ja languseperioodide parameetrite tabelis (tabel 4) toodud statistika, kus veepinna temperatuurid oli tõusuperioodidel 2,2 °C ja 2-meetri õhutemperatuuri parameetrid keskmiselt 2 °C soojemad kui languseperioodidel. Samuti olid ka tuulekiiruse päevased minimaalsed-, maksimaalsed- ja keskmised kiirused 0,2 m/s aeglasemad klorofüll-a tõusuperioodidel võrreldes languseperioodidega.

Statistiliselt ebaolulised erinevused ( $p > 0,05$ ) ilmnemise kogusademetel parameetritel, mis toetavad teiste järveosade tulemusi, et andmete alusel ei ole sademetel olulist otsest mõju vetikaõitsengutele, kuid võivad mõjutada vetikaõitsengute levikut kaudselt (Reichwaldt ja Ghadouani 2012; Silja Põldma 2016).

#### **5.4 Edasine uurimissuund**

Analüüsid erinevate järveosade korrelatsioonigraafikuid selgub, et ilma- ja veeparameetrid on tihti tihedamalt seotud omavahel kui seda otse klorofüll-a kontsentratsiooniga. Näiteks vaadates Suurjärve korrelatsioonigraafikut (joonis 4), ilmneb, et 2-meetri õhutemperatuuri minimaalne- ja päevane keskmine on statistiliselt olulises ja tugevas positiivses seoses ( $|R| > 0,7$ ) veepinna temperatuuriga. Veepinna temperatuur omakorda aga positiivses seoses klorofüll-a kontsentratsiooniga, mis võib viidata sellele, et 2-meetri õhutemperatuuri positiivne mõju ei pruugi olla otsene, vaid kaudne. Samasugune kaudne mõju joonistub välja ka tuulekiirusega, kus päevane keskmine tuulekiirus on statistiliselt olulises negatiivses seoses 2-meetri õhutemperatuuri päevase maksimaalse- ja keskmisega ning ka veepinna temperatuuriga.

Eelmainitud mustrid joonistuvad lisaks Peipsi Suurjärvele välja ka Lämmi- ja Pihkva järves, mis viitab sellele, et tugevamate tuultega võib tekkida järvevee segunemine mis omakorda võib põhjustada pinnavee temperatuur languse ning sellega seoses klorofüll-a kontsentratsiooni mõjutada. Järvevee segunemise korral võivad vetikad olla segatud veemassi sisse, mistõttu ei pruugi nad veepinnal esineda ja seega jäävad satelliidiandmetest varjatuks. Tuulekiiruse ja sademete mõju hindamiseks tuleks uurida kindlamat ajavahemikku ning kasutada paremat ruumilist lahutust, et leida kinnitust eelmainitud seostele.

Kokkuvõtvalt viitavad tulemused sellele, et erinevatel ilma- ja veeparameetritel võivad olla klorofüll-a kontsentratsioonile kaudsed mõjud. Edasistes uuringutes tuleks keskenduda just parameetrite koosmõju uurimisele.

## 6. Kokkuvõte

Töö käigus uuriti Peipsi Suurjärves, Lämmijärves ja Pihkva järves vetikaõitsenguid. Töö eesmärk oli välja selgitada, millised ilma- ja veeparameetrid kutsuvad esile vetikaõitsenguid Peipsi järves. Analüüsi aluseks olid Lakes\_cci (*Climate Change Initiative* – Kliima muutuste initsiatiiv) ja ERA5 atmosfääri järelanalüüsi andmestikud. Uuring hõlmas aastaid 2002 kuni 2011 ning 2016 kuni 2020.

Analüüsi tulemusena ilmnes, et vetikaõitsengud esinesid Peipsi Suurjärves igal uurimisperioodi aastal, välja arvatud aastal 2004. Üldise trendina täheldati, et Suurjärves oli klorofüll-a tase on langenud alates 2011. aastast. Pihkva- ja Lämmijärves esines vetikaõitsenguid igal uurimisperioodi aastal, kuid vastupidiselt Suurjärvele, ei olnud klorofüll-a langustrendis.

Statistilise analüüsi põhjal selgus, et kõigis kolmes järve osas mõjutavad klorofüll-a kontsentratsiooni nii veetaseme kõrgus kui ka veepinna temperatuur. Samuti oli näha nii Lämmijärves kui ka Pihkva järves, et 2-meetri õhutemperatuuri soojenemisega tõusis klorofüll-a kontsentratsioon järvevees. Lämmijärves oli kõige märgatavam statistiliselt oluline positiivne korrelatsioon seotud 2-meetri õhutemperatuuri päevase minimaalse keskmisega ( $R^2= 0,29$ ), mis näitab, et just õhutemperatuuri miinimum võib olla määravam faktor vetikaõitsengute tekkes võrreldes keskmise temperatuuriga. Peipsi Suurjärves oli 2-meetri õhutemperatuur nõrgas negatiivses seoses klorofüll-a kontsentratsiooniga ( $R^2= -0,06$ ), kuid võrreldes klorofüll-a kontsentratsiooni tõusu- ja languseperioode oli näha, et 2-meetri õhutemperatuur oli klorofüll-a kontsentratsiooni tõusmise ajal keskmiselt 1-2 °C soojem kui klorofüll-a langemise ajal.

Analüüsi tulemustest ei tulenenud veenvat tõendusmaterjali tuulevaikse ilma märgatavast otsesest positiivsest mõjust vetikaõitsengutele. Tuule kiiruse mõju täpsemaks uurimiseks on vaja kasutada paremat ruumilist lahutusvõimet ja väiksemaid ajavahemikke. Eelnevad uuringud on näidanud, et tuulevaikne ilm soodustab vetikaõitsenguid, samas kui tugev tuul võib põhjustada resuspensiooni, mille tagajärjel tõusevad põhjast üles toitained. Lisaks ei leitud olulist seost klorofüll-a kontsentratsiooni ja sademete taseme vahel. Kuid varasemad uuringud on näidanud, et sademed võivad tuua järve rohkem toitaineid ja seeläbi soodustada vetikate õitsengut.

Edasiste uuringute raames oleks oluline uurida erinevate ilma- ja veeparameetrite kombineeritud mõju vetikaõitsengutele.

# Study of the parameters inducing and inhibiting algal blooms in Lake Peipsi using remote sensing

Max Sebastian Segerkrantz

## Summary

The aim of this bachelor's thesis was to examine the factors contributing to algae blooms in Lake Peipsi and its sub-lakes, Lake Peipsi *s.s* (*sensu stricto*), Lake Lämmijärv, and Lake Pihkva, by analysing weather and water conditions. Previous studies conducted by (Pihu, 2001) and (Pall et al., 2023) demonstrate that weather and water parameters, such as air and water temperature, wind speeds, and water level, have a significant impact on algal blooms in Lake Peipsi.

The study utilized remote sensing data from the European Space Agency Lakes Climate Change Initiative dataset, which provided information on Lake Peipsi's chlorophyll-a concentration, water level and surface temperature from the years 2002 to 2011 and 2016 to 2020. The weather data was sourced from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) and its ERA5 global atmospheric reanalysis (Hersbach, H. et al., 2023), which provided us with hourly data of the 2-metre air temperature, 10-metre wind components and precipitation levels. The Lakes\_cci dataset (Carrea et al., 2022) was exported and analysed using the Sentinel Application platform (SNAP) and was combined with ERA5 data in the R-studio environment for an in-depth analysis.

Utilizing the long-term chlorophyll-a levels, as conducted by (Kangro et al., 2022), a threshold for identifying algal blooms was established by determining the median values of chlorophyll-a concentrations spanning from 1989 to 2019 (June-September), to which a 5% increment was applied. Analysis revealed that algal blooms occurred in Lake Peipsi *s.s* every year of the study period, except for 2004. Furthermore, a consistent trend was observed wherein chlorophyll-a levels in Lake Peipsi *s.s* showed a decline since 2011. In contrast, algal blooms were consistently observed in Lake Pihkva and Lake Lämmijärv throughout the study period, with no significant decline in chlorophyll-a levels noted, diverging from the trend observed in Lake Peipsi *s.s*.

Statistical analysis indicated that both water level and water surface temperature influenced chlorophyll-a concentration in all three sub-lakes. Additionally, in Lake Lämmijärv and Lake Pihkva, a positive correlation was observed between chlorophyll-a concentration and 2-metre air temperature, with the most notable correlation found with the daily minimum 2-metre air temperature ( $R^2= 0,29$ ) in Lake Lämmijärv. This suggests that minimum air temperature may play a crucial role in algal bloom formation compared to average temperature. Conversely, in Lake Peipsi s.s, a weak negative correlation was observed between chlorophyll-a concentration and 2-metre air temperature ( $R^2= -0,06$ ). However, when comparing periods of increasing and decreasing chlorophyll-a concentrations, it was noted that 2-metre air temperature was on average 1-2 °C warmer during periods of chlorophyll-a increase compared to periods of decrease.

The analysis did not provide conclusive evidence of a direct positive impact of calm weather on algal blooms, possibly due to limitations in wind parameter data collected at 10 meters, which may not accurately reflect conditions at the water surface. To observe the effect of wind speeds more accurately, it is necessary to use better spatial resolution and shorter time intervals. Previous studies have shown that calm weather promotes algal blooms, while strong winds can cause resuspension, bringing nutrients up from the bottom. Additionally, no significant relationship was found between chlorophyll-a concentration and precipitation levels. However, past research has demonstrated that precipitation can contribute to algal blooms by introducing more nutrients into the lake.

Further research is warranted to investigate the combined effects of various weather and water parameters on algal blooms, as it is hypothesized that a combination of favourable factors may exert a stronger influence than individual parameters alone.

## **Tänuavaldused**

Töö autor soovib tänada juhendajaid Krista Alikast, Ian-Andreas Rahni ning Erko Jakobsoni ja matemaatilise statistika üliõpilast Lotta-Lorette Kalmarut, kes aitas leida inglisekeelsetele statistilistele terminitele eestikeelsed vasted.

## Kasutatud kirjandus

Anderson, D. M. (2007). *The ecology and oceanography of harmful algal blooms: Multidisciplinary approaches to research and management*. UNESCO. IOC/2007/TS/74, SC.2007/WS/19.

Britannica, T. Editors of Encyclopaedia. (2024, April 10). Chlorophyll. *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/chlorophyll>. (Vaadatud 20.04.2024).

Campbell, J. B. (1987). *Introduction to remote sensing* (2nd ed.). The Guilford Press.

Carrea, L., Crétaux, J.-F., Liu, X., Wu, Y., Bergé-Nguyen, M., Calmettes, B., Duguay, C., Jiang, D., Merchant, C. J., Mueller, D., Selmes, N., Simis, S., Spyrakos, E., Stelzer, K., Warren, M., Yesou, H., & Zhang, D. (2022). ESA Lakes Climate Change Initiative (Lakes\_cci): Lake products, Version 2.0.2 [Application/xml]. NERC EDS Centre for Environmental Data Analysis. <https://doi.org/10.5285/A07DEACAFFB8453E93D57EE214676304>.

Copernicus Climate Change Service. (2024). ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). <https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47>. (Vaadatud 05.01.2024).

FGGE: First GARP Global Experiment — AOSS Library. (n.d.). <https://library.ssec.wisc.edu/digital-collections/research-history/fgge-1973/>. (Vaadatud 22.04.2024).

Haldna, M., Milius, A., Laugaste, R., & Kangur, K. (2008). Nutrients and phytoplankton in Lake Peipsi during two periods that differed in water level and temperature. *Hydrobiologia*, 599(1), 3-11. <https://doi.org/10.1007/s10750-007-9208-9>

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., & Thépaut, J.-N. (2023). ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). <https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47>. (Vaadatud 05.01.2024).

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., ... Thépaut, J. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *146*(730), 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.

Kangro, K., Pall, A., & Alikas, K. (2022). Sinivetikate põhjustatud veeõitsengud Peipsi järves ja satelliidivõimalused nende märkamiseks. In U. Peterson (Ed.), *Kaugseire Eestis 2021* (pp. 22-33). Tartu Ülikooli Tartu observatoorium.

Lakes. (n.d.). ESA Climate Office. <https://climate.esa.int/en/projects/lakes/>. (Vaadatud 22.04.2024).

Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2015). *Remote sensing and image interpretation* (7th ed.). Wiley.

Meris overview - esa earth online. (n.d.). <https://earth.esa.int/eogateway/instruments/meris/description>. (Vaadatud 20.04.2024).

Metsamaa, L. (2005). Tsüanobakterite tuvastamine kaugseire meetodite abil: Läänemere näitel [Magistritöö]. Tartu Ülikool.

Nõges, P. (2020). Uuring Peipsi järve füüsikalise-keemilise ja fütoplanktoni kvaliteedinäitajate klassipiiride täpsustamiseks. Eesti Maaülikool, Põllumajandus- ja keskkonnainstituut. Hüdrobioloogia ja kalanduse õppetool, Tartu. <https://kliimaministeerium.ee/sites/default/files/documents/2021-08/Peipsi%20vrd%20kriteeriumite%20aruanne.pdf>.

Nõges, T., & Eesti Põllumajandusülikool (Eds.). (2001). *Lake Peipsi: Meteorology, hydrology, hydrochemistry*. Sulemees.

Olci Applications. SentiWiki. (n.d.). <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/olci-applications>. (Vaadatud 22.04.2024).

Pall, A., Kangro, K., & Alikas, K. (2022). Peipsi järve sinivetikate pinnaõitsengute pikaajaline iseloomustus kaugseire meetodite abil. In U. Peterson (Ed.), *Kaugseire Eestis 2022* (pp. 54-65). Tartu Ülikooli Tartu observatoorium.

Pihu, E. (Ed.). (2001). *Lake Peipsi: Flora and fauna*. Sulemees.

Põldma, S. (2016). Tsüanobakterite biomassi hindamine optiliselt keerukast ja madalast siseveekogust MERIS satelliiditulemite põhjal [Magistritöö]. Tartu Ülikool.

Reichwaldt, E. S., & Ghadouani, A. (2012). Effects of rainfall patterns on toxic cyanobacterial blooms in a changing climate: Between simplistic scenarios and complex dynamics. *Water Research*, 46(5), 1372–1393. doi:10.1016/j.watres.2011.11.052.

Shastry, A., Carter, E., Coltin, B., Sleeter, R., McMichael, S., & Eggleston, J. (2023). Mapping floods from remote sensing data and quantifying the effects of surface obstruction by clouds and vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 291, 113556. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113556>.

SNAP spurs Earth observation innovation with one million downloads. (2022, May 24). [https://www.esa.int/Applications/Observing\\_the\\_Earth/FutureEO/SNAP\\_spurs\\_Earth\\_observation\\_innovation\\_with\\_one\\_million\\_downloads](https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/FutureEO/SNAP_spurs_Earth_observation_innovation_with_one_million_downloads). (Vaadatud 23.04.2024).

Van Grondelle, R., & Boeker, E. (2017). Limits on natural photosynthesis. *The Journal of Physical Chemistry B*, *121*(30), 7229–7234. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b03024>.

Wynne, T. T., Mishra, S., Meredith, A., Litaker, R. W., & Stumpf, R. P. (2021). Intercalibration of MERIS, MODIS, and OLCI Satellite Imagers for Construction of Past, Present, and Future Cyanobacterial Biomass Time Series. *Remote Sensing*, *13*(12), 2305. <https://doi.org/10.3390/rs13122305>.

Yeager, K. (2023). LibGuides: Statistical & qualitative data analysis software: About R. <https://libguides.library.kent.edu/statconsulting/r>. (Vaadatud 24.04.2024)

## Lisad

### **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina, Max Sebastian Segerkrantz

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

#### **Peipsi järve vetikaõitsenguid esilekutsuvate ja pärssivate parameetrite uuring kaugseire abil**

mille juhendajad on Krista Alikas, Ian-Andreas Rahn, Erko Jakobson

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.

*Max Sebastian Segerkrantz*

**27.05.2024**