

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
Loodusteaduskond
Meresüsteemide instituud

Liivi lahe jääolude ajalis-ruumiline muutlikkus

Bakalaureusetöö

Autor: Ilja Golikov, 206116YAFB
Juhendaja: Ilja Maljutenko, vanemteadur
Õppekava: Rakendusfüüsika

Tallinn 2023

Autorideklaratsioon

Kinnitan, et olen koostanud antud lõputöö iseseisvalt ning seda ei ole kellegi teise poolt varem kaitsmisele esitatud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on töös viidatud.

Autor: Ilja Golikov

[allkiri ja kuupäev]

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

Juhendaja: Ilja Maljutenko

[allkiri ja kuupäev]

Töö on lubatud kaitsmisele.

Kaitsmiskomisjoni esimees: [nimi]

[allkiri ja kuupäev]

Sisukord

1	Sissejuhatus	6
2	Kasutatud andmed	8
2.1	Mudeli kirjeldus	8
2.2	Andmete allalaadimine ja korrektsioon	8
3	Metoodika jää klimatoloogia analüüsiks	10
3.1	Jäähooaeg	10
3.2	Jää esinemise tõenäosus	11
3.3	Jää integraalsed parameetrid	12
3.4	Kalendripäeva statistikud	13
3.5	Trendi analüüs	14
4	Tulemused	15
4.1	Jäähooaeg	15
4.2	Jää esinemise tõenäosus	15
4.3	Jää pindala	16
4.4	Jää ruumala	18
4.5	Trendid	20
5	Arutelu ja võrdlus varasemate uuringutega	23
6	Kokkuvõtte	25

Annotatsioon

Lõputöös uuriti Liivi lahe jääolude ajalis- ja ruumilist muutlikkust ajavahemikus 1993/94 kuni 2020/21. Töö praktilises osas kasutati NEMO-Nordic mudeli andmeid, täpsemalt jää kontsentratsiooni ja jää paksust. Nende parameetrite abil uuriti jää hooaja statistikuid, jää esinemise tõenäosust, integraalset jää pindala ja ruumala ning nende keskmisi ja maksimaalseid väärtusi. Ajalise muutlikkuse hindamiseks kasutati regressioon analüüsi, mille abil uuriti Liivi lahes olevaid tendentse. Saadud tulemustest järeldati, et Liivi lahes jäähooaeg hakkab keskmiselt detsembris ja lõpeb aprilli alguses ning kestab 3 kuni 4 kuud. Üldiselt on jää esinemise tõenäosus suurem põhjapoolsetel rannikulähedastel merealadel. Suurim tõenäosus leiti Liivi lahe kirdeosas, Pärnu lahes. Jää pindala ja ruumala statistikute suur hajuvus näitas, et jääolud on Liivi lahes aastati väga erinevad. Olenevalt talvest võib Liivi laht olla kas täiesti jääga kaetud, nagu 1993/1994 aastal, või jää võib hoopis puududa nagu 2019/2020 aastal. Karmidel talvedel ulatub jää integraalne ruumala kuni 7 km^3 -ni, kuid sellised olud ei ole sagedased. Liivi lahe muutlikkust uurides leiti jäähooaja trend. Keskmiselt lühenes jäähooaeg aastas 1,5 päeva võrra. Jää maksimaalse pindala ja ruumala analüüsi käigus statistiliselt olulisi trende ei leitud. Võrreldes töö tulemusi varasemalt tehtud uuringutega avastati jää hooaja pikkuse vähenemine võrreldes eelmise sajandi andmetega. Kinnitati tulemuste kokkulangevus viimaste uuringutega. Võrreldi mudeli ja satelliidi andmeid ning leiti sarnasusi pindala ja ruumala muutustes Liivi lahes ja Läänemeres.

Abstract

This thesis investigated the temporal and spatial variability of the ice conditions in the Gulf of Riga from 1993/94 to 2020/21. During the practical part of the project, data from the NEMO-Nordic model was used, specifically: ice concentration and ice thickness. Ice season statistics, ice occurrence probability, integral ice area and volume, and their mean and maximum values were studied using these parameters. Regression analysis was used to assess temporal variability, which was used to study trends in the Gulf of Riga. From the obtained results, it was concluded that the ice season in the Gulf of Riga starts on average in December, ends in early April, lasting for 3 to 4 months. In general, the probability of ice occurrence is higher in coastal areas. The highest probability was found in the north-eastern part of the Gulf of Riga, in Pärnu Bay. The large dispersion of ice area and volume statistics showed that ice conditions in the Gulf of Riga vary greatly from year to year. Depending on the winter, the Gulf of Riga may be completely covered with ice, as in 1993/1994, or there may be no ice at all, as in 2019/2020. In harsh winters, the integral volume of ice reaches up to 7 km^3 , but such conditions are not frequent. When studying the variability of the Gulf of Riga, a trend for the ice season was found. On average, the trend of shortening ice season by 1.5 days per year was found. No statistically significant trends were found during the analysis of the maximum surface area and volume of ice. Comparing the results of this thesis with previous studies, shortening of ice season was discovered compared to the data of the last century. The agreement of the results with the latest studies was confirmed. Model and satellite data were compared, and similarities were found in surface and volume changes in the Gulf of Riga and the Baltic Sea.

1 Sissejuhatus

Läänemerel on läbi aegade olnud tähtis roll Eesti majanduslikus ja sotsiaalses arengus. Peamisteks kasutusalaudeks on olnud kaubandus, turism ja kalatööstus [1]. Enamus rahvusvahelist kaubavedu ja reisilaevandust käib Soome lahe kaudu, kuid viimastel aastatel on Liivi laht muutunud aina olulisemaks uuel eesmärgil - meretuuleenergia tootmisel.

Eestis, nagu paljudes teistes euroopa riikides, uuritakse avamere tuuleparkide potentsiaali, et aidata rahuldada kasvavat nõudlust taastuvenergia vastu nii riigi sees kui väljas. Käimas on mitmed projektid eesmärgiga rajada Liivi lahte tuuleparke, mis võiksid oluliselt kaasa aidata nii Eesti kui ka Euroopa taastuvenergia eesmärkide saavutamisele [2]. Tuuleparkide rajamisel või mõne muu projekti läbiviimisel tuleb arvestada potentsiaalsete riskide ja keskkonnamõjudega antud piirkonnas [3].

Liivi laht on oma tuulisuse ja madala veetaseme tõttu perspektiivne piirkond meretuuleparkide rajamiseks. Liivi lahe pindala on ligikaudu 16000 km^2 ja keskmine sügavus 24 m [4]. Peamiseks väljakutseks meretuuleparkide rajamisel on jääolud, mis võivad põhjustada rikkeid ja takistada hooldustöid [5].

Esimesed märkimisväärsed Liivi lahe jääolude kirjeldamised on tehtud juba 19. sajandi lõpus Kihnu ilmajaama poolt [6]. Lokaalsed vaatlusjaamad on kirjeldanud vaid peamiseid statistikuid: millal jäähooaeg algab ja millal lõpeb. Need andmed on väga olulised, kuid ei anna terviklikku ülevaadet jääoludest Liivi lahes. Alates 1959. aastast on vaatlusandmete maht ja kvaliteet tänu satelliitidele oluliselt kasvanud, mis võimaldab paremini hinnata Liivi lahe jääolusid.

Varasemates uuringutes on leitud, et jäähooaeg Liivi lahes algab 24. novembri ja 10. detsembri vahel, kestab 3 kuni 4 kuud ning lõpeb 6.- 27. aprilli vahel [6]. Jääolud Liivi lahes on keerulised ja dünaamilised. Sõltuvalt ilmastikuoludest võivad jää tingimused aasta-aastalt oluliselt erineda. Uuringus "*Association Between Ice Conditions in the Baltic Sea along the Estonian Coast and the North Atlantic Oscillation*" avastati, et atmosfääri tsirkulatsioon, mis määrab 20 kuni 50 protsenti jää seisundist, avaldab kõige olulisemat mõju just Liivi lahes [7].

Tänapäeval kasutavad teadlased jääolude uurimiseks kas vaatlusandmeid või mudeli andmeid. Vaatlusandmeid kogutakse jää paksuse ja muude asjakohaste parameetrite otsese mõõtmise või vaatluse teel, mis tähendab, et andmete kättesaamine on keeruline protsess, mis nõuab palju inimressurssi ja tehnoloogiaid [8]. Nendel põhjustel võivad vaatlusandmed olla väiksema resolutsiooniga ja osaliselt puudulikud. Mudelipõhiseid andmeid omakorda arvutatakse matemaatiliste mudelite abil, mis simuleerivad jää dünaamikad. Need mudelid põhinevad füüsikalistel seadustel ja on loodud jääolude esitamiseks erinevates tingimustes [9]. Kuigi vaatlusandmed on suurema täpsusega, siis arvestades, et Liivi laht on dünaamiline

ja keeruline keskkond, kus on kiiresti muutuvad jääolud ja nende otsene jälgimine osutub tihti väljakutseks, otsustati käesolevas töös kasutada mudelipõhiseid andmeid.

Antud töö eesmärk on analüüsida jääolusid Liivi lahes, kasutades mudeli andmeid, ning anda väärtuslik ja täpne hinnang ruumilise ja ajalise muutlikkuse kohta. Mõistes piirkonna jääolusid on võimalik tagada ohutu laevaliiklus ning teha teadlikke otsuseid piirkonna arengu kohta.

2 Kasutatud andmed

2.1 Mudeli kirjeldus

Töös on kasutatud Copernicus merekeskkonna seiresüsteemi (*Copernicus Marine Environment Monitoring System CMEMS*) poolt koostatud Läänemere füüsikalise reanalüüsi andmebaasi, mis on koostatud kasutades jää-ookeani mudelit NEMO-Nordic 1.0 [9]. NEMO-nordic koosneb ookeani mudeli komponendist NEMO-3.6 ja merejää mudeli komponendist LIM3, mis võtab arvesse jää dünaamika ja termodünaamika protsesse [10]. NEMO-Nordic mudeli koostamisel on jää mudeli parameetrid kohandatud vastavalt Läänemere tingimustele. [9].

NEMO-Nordic mudelandmeid on võrreldud vaatlusandmetega Pemberton'i [11] uuringus. Tulemusena kinnitati jää mudeli poolt koostatud jää kontsentratsiooni ja paksuse parameetrite head kvaliteeti. Jää kontsentratsioon Liivi lahe piirkonnas näitas häid tulemusi jaanuarist märtsini, kuid aprillis oli merejää vähenemine mudelis kiirem võrreldes vaatlustega. Merejää paksus langes kokku vaatlusandmetega, kuid karmimate talvede puhul mudel üldiselt ülehindas jää paksust. Vaatlusandmed, millega tulemusi võrreldi, olid väga lünklikud ja esindasid ainult suuremahulisi tunnuseid. Kokkuvõttes mudeli andmeid on kõrgelt hinnatud ja nende baasil on tehtud mitmeid teadustöid.

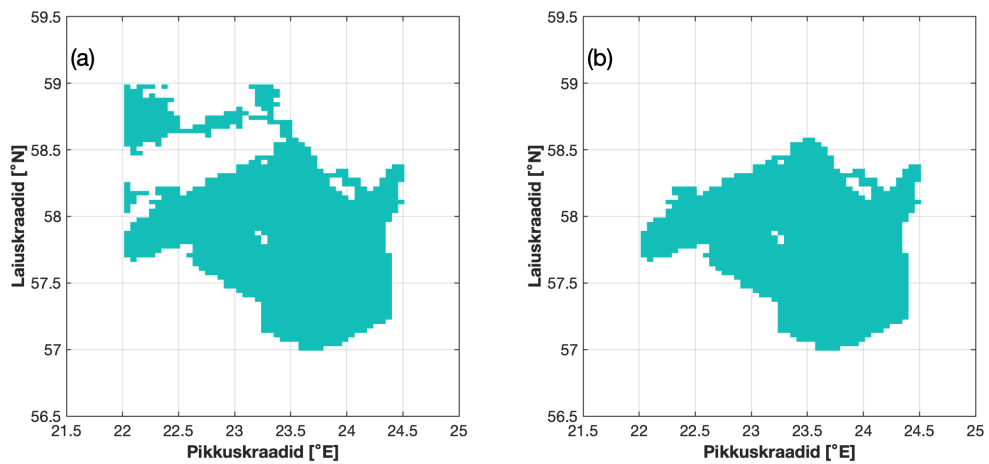
Antud töö andmete ajaline resolutsioon oli üks tund ja ruumiline resolutsioon pikkuskraadi muutusega $\Delta\lambda = 0,055^\circ$ ning laiuskraadi muutusega $\Delta\varphi = 0,033^\circ$, mis meie laiuskraadides vastab ligikaudu 6-le ja 2-le kilomeetrile. Uurimiseks võeti andmed maksimaalses võimalikus ajavahemikus, milleks oli 1993 kuni 2021 aasta. Liivi lahe algne piirkond käesolevas töös on defineeritud 22° ja 25° laiuskraadi vahel ning $56,5^\circ$ ja 59° pikkuskraadi vahel. Andmete mahu vähendamiseks otsustati kasutada andmeid alates 1. oktoobrist kuni 31. maini, kuna ülejäänud kuudel puudub Liivi lahes jää.

2.2 Andmete allalaadimine ja korrektsioon

Andmete suure mahu tõttu kasutati allalaadimiseks Python'it ja MOTU Client'i. MOTU Python'i moodul võimaldab hallata ja eraldada okeanograafilisi suurandmeid, luues ühenduse andmepakkujate ja lõppkasutajate vahel [12].

Andmete täpsemaks ja mugavamaks analüüsiks korrigeeriti ja teisendati andmed uuele kujule. Ajaline resolutsioon viidi üle tunniliselt arvestuselt päevasele, kasutades selleks keskväärtuseid. Teisendus viidi läbi nii jää paksuse kui ka kontsentratsiooni puhul. Kuna andmete hulgas olid aastad, mis sisaldavad 365 päeva, siis andmete ühtluse tagamiseks eemaldati töös 29. veebruar.

Uurimisalaks on valitud Liivi laht, mida defineeriti piirkonnana 22° ja 25° laiuskraadi vahel ning 56.5° ja 59° pikkuskraadi vahel. Andmetest eemaldati Väinamere ja Läänemere avaosas jäävad võrgupesad, keskendudes Liivi lahe peamise osa uurimisele. Liivi lahe piirkond enne ja pärast andmete korrektsiooni on kujutatud graafiliselt joonisel (1).



Joonis 1: Liivi lahe piirkond enne (joonis a) ja pärast (joonis b) andmete korrektsiooni.

3 Metoodika jää klimatoloogia analüüsiks

Jääolude kvantitatiivseks hindamiseks valiti välja mudeli parameetrid: jää kontsentratsioon ja jää paksus. Jää kontsentratsiooni ulatus on vahemikus 0-st kuni 1-ni ning parameeter on dimensioonitu. Sisuliselt näitab jää kontsentratsioon jää osakaalu pindalpunktis kohta. Selles töös võtame arvesse jää olemasolu, kui jää kontsentratsioon on 15% või suurem. Varasemates uuringutes on tõestatud, et selline metoodika langeb kõige paremini kokku jää tõeliste väärtustega [13]. Antud lähenemine on kujunenud standardiks, mida kasutatakse enamasti uuringutes [13]. Teine valitud parameeter oli jää paksus, mille dimensiooniks olid meetrid.

Kasutades jää kontsentratsiooni analüüsiti jäähooaja algust, pikkust ja lõppu ning arvutati jää esinemise tõenäosus ja jää integraalne pindala. Jää paksuse parameetri abil arvutati ja analüüsiti integraalsed jää ruumala. Andmete analüüsi käigus kasutati mitmeid rakendusi. Shell programmeerimise keelt koos Climate Data Operators (CDO) [14] oli vaja suurte arvutuste sooritamiseks. Statistilised arvutused ja graafikute vormistus programmeeriti kasutades MatLabit [15].

3.1 Jäähooaeg

Andmete analüüsi on mõistlik alustada uurides lihtsamaid parameetreid ja statistikuks, mis annavad ettekujutuse andmestikust. Jääolude analüüsi puhul on selleks ülevaade jäähooajast.

Edaspidi käsitleme andmestikke maatriksitena, suurte tähtedega tähistame maatrikseid ja vastava väikese tähega maatriksi elemente. Esitame jää kontsentratsiooni andmestiku 2D maatriksina ajahetkel t :

$$F_{i,j,t} = \begin{pmatrix} f_{1,1,t} & f_{1,2,t} & \dots & f_{1,m,t} \\ f_{2,1,t} & f_{2,2,t} & \dots & f_{2,m,t} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ f_{n,1,t} & f_{n,2,t} & \dots & f_{n,m,t} \end{pmatrix} \in [0, 1] , \quad (1)$$

kus i ja j tähistavad laius- ja pikkuskraadide indekseid, t on aja indeks, n on viimase laiuskraadi indeks ning m on viimase pikkuskraadi indeks.

Kõigepealt määrame jää esinemise igas punktis. Selleks koostame binaarmaatriksi $F_{i,j,t}^\dagger$, mis väljendab jää olemasolu antud ruumi punktis ja ajahetkel. Sellise maatriksi elemendid vastavad võrreldile:

$$f_{i,j,t}^\dagger = \begin{cases} 1, & \text{kui } f_{i,j,t} \geq 0,15 \\ 0, & \text{kui } f_{i,j,t} < 0,15 \end{cases} , \quad (2)$$

kus 0,15 on jää kontsetratsiooni piirväärtus.

Korrutades matriksid $F_{i,j,t}$ ja $F_{i,j,t}^\dagger$ omavahel elementide kaupa leiti uus matriks $F_{i,j,t}^*$:

$$F_{i,j,t}^* = (F \odot F^\dagger)_{i,j,t} = \begin{pmatrix} f_{1,1,t} \cdot f_{1,1,t}^\dagger & f_{1,2,t} \cdot f_{1,2,t}^\dagger & \cdots & f_{1,m,t} \cdot f_{1,m,t}^\dagger \\ f_{2,1,t} \cdot f_{2,1,t}^\dagger & f_{2,2,t} \cdot f_{2,2,t}^\dagger & \cdots & f_{2,m,t} \cdot f_{2,m,t}^\dagger \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ f_{n,1,t} \cdot f_{n,1,t}^\dagger & f_{n,2,t} \cdot f_{n,2,t}^\dagger & \cdots & f_{n,m,t} \cdot f_{n,m,t}^\dagger \end{pmatrix}, \quad (3)$$

kus 0,15 väiksemad kontsentratsiooni väärtused on nüüd tähistatud nulliga, mis tähendab, et iga nullist erinev element ületab jää kontsentratsiooni piirväärtust.

Jäähooegade algused c_a ja lõpud c_l leiti tuvastades iga aasta jaoks perioodil oktoobrist maini esimesed ja viimased nullist erinevad väärtused. jäähooegade pikkused arvutati valemiga:

$$L = c_l - c_a + 1. \quad (4)$$

Kuna pikkustes on viimane päev kaasa arvatud, siis viimase ja esimese päeva vahele lisandub +1.

Erijuhuks osutus 2019/20 aasta, kus Liivi lahes jääd ei esinenud. Selle aasta korral jäid jäähooaja algus, lõpp ja pikkus määramata. Ülejäänud tulemustest leiti minimaalsed, maksimaalsed, ja keskmised väärtused ning standardhälbed.

3.2 Jää esinemise tõenäosus

Jääolude ruumiliseks kirjelduseks arvutati jää esinemise tõenäosus jääsesoonil 1. oktoobrist kuni 31. maini. Kasutades varasemalt leitud andmestikku $F_{i,j,t}^\dagger$ (valem 2) arvutati tõenäosus valemiga:

$$p_{i,j} = \frac{\sum_{t=1}^k f_{i,j,t}^\dagger}{k}, \quad (5)$$

kus t tähistab päeva, i laiuskraadide ja j pikkuskraadide indekseid, $k = 28 \cdot 243 = 6804$, mis annab kogu andmestiku päevade arvu, kuna andmed sisaldavad 28 aastat ja 243 päeva.

3.3 Jää integraalsed parameetrid

Jää pindala $S_{i,j,t}$ leidmiseks korrutati omavahel pindala elementide maatriks $A_{i,j}$ ja valemis (3) leitud jää konsentratsiooni maatriks $F_{i,j,t}^*$:

$$S_{i,j,t} = A_{i,j} \odot F_{i,j,t}^* = \begin{pmatrix} a_{1,1} \cdot f_{1,1,t}^* & a_{1,2} \cdot f_{1,2,t}^* & \dots & a_{1,m} \cdot f_{1,m,t}^* \\ a_{2,1} \cdot f_{2,1,t}^* & a_{2,2} \cdot f_{2,2,t}^* & \dots & a_{2,m} \cdot f_{2,m,t}^* \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n,1} \cdot f_{n,1,t}^* & a_{n,2} \cdot f_{n,2,t}^* & \dots & a_{n,m} \cdot f_{n,m,t}^* \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Andmed on sfäärilistes koordinaatides, mistõttu iga elemendi pindala muutub vastavalt laiuskraadile. Iga elemendi pindala saab arvutada valemiga:

$$a_{i,j} = \int_{\varphi_i}^{\varphi_{i+1}} \int_{\lambda_j}^{\lambda_{j+1}} R^2 \cdot \cos(\varphi) d\lambda d\varphi = R^2 \cdot (\lambda_{j+1} - \lambda_j) \cdot (\sin(\varphi_{i+1}) - \sin(\varphi_i)), \quad (7)$$

kus i ja j on koordinaatide indeksid, λ_j on pikkuskraadid radiaanides, φ_i tähistab laiuskraade radiaanides ja R on Maa raadius [16].

Jää ruumala leiti kasutades jää paksuse parameetrit, mida saab esitada maatriksi kujul:

$$H_{i,j,t} = \begin{pmatrix} h_{1,1,t} & h_{1,2,t} & \dots & h_{1,m,t} \\ h_{2,1,t} & h_{2,2,t} & \dots & h_{2,m,t} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{n,1,t} & h_{n,2,t} & \dots & h_{n,m,t} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Korrutades omavahel elementide kaupa jää paksuse $H_{i,j,t}$ ja valemis (6) leitud jää pindala $S_{i,j,t}$ leiti jää ruumala andmestik:

$$V_{i,j,t} = (S \odot H)_{i,j,t} = \begin{pmatrix} s_{1,1,t} \cdot h_{1,1,t} & s_{1,2,t} \cdot h_{1,2,t} & \dots & s_{1,m,t} \cdot h_{1,m,t} \\ s_{2,1,t} \cdot h_{2,1,t} & s_{2,2,t} \cdot h_{2,2,t} & \dots & s_{2,m,t} \cdot h_{2,m,t} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ s_{n,1,t} \cdot h_{n,1,t} & s_{n,2,t} \cdot h_{n,2,t} & \dots & s_{n,m,t} \cdot h_{n,m,t} \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Tulemusena saime uue maatriksi $V_{i,j,t}$, mis sisaldab jää ruumala ajas ja ruumis muutuvaid andmeid.

Selleks, et uurida kogu jää pindala ja ruumala muutust Liivi lahes, leiti nende integraalsed väärtused iga päeva jaoks. Kogu jää pindala ajas muutuv andmestik arvutati valemiga:

$$S_t^\dagger = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m S_{i,j,t} \quad (10)$$

ja analoogiliselt kogu jää ruumala ajas muutuv andmestik valemiga:

$$V_t^\dagger = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m V_{i,j,t} , \quad (11)$$

kus i on laiuskraadide indeks, j on pikkuskraadide indeks, t on aja indeks ning n tähistab viimast laiuskraadi indeksit ja m viimast pikkuskraadi indeksit.

3.4 Kalendripäeva statistikud

Maatriksid S_t^\dagger ja V_t^\dagger teisendati nii, et iga veerg tähistaks hooaja alguse aastat ja read tähistaksid päevade arvu vahemikus 1-st kuni 243-ni, mis sisuliselt tähendab päevade arvu alates 1. oktoobrist kuni 31. maini. Olgu teisendatud maatriks kogu jää pindala jaoks $S_{i,j}^*$ ja kogu jää ruumala jaoks $V_{i,j}^*$.

Teisendatud maatriksid $S_{i,j}^*$ ja $V_{i,j}^*$ analüüsiti kalendripäeva lõikes leides integraalse jää pindala ja ruumala päevade maksimaalsed väärtused:

$$S_{max_i}^* = max\{S_{i,j}^* : j = 1, 2, \dots, n\} , \quad (12)$$

$$V_{max_i}^* = max\{V_{i,j}^* : j = 1, 2, \dots, n\} , \quad (13)$$

kus i on päevade indeks, j on aastate indeks ja n on aastate arv.

Integraalse pindala ja ruumala päevade keskmised väärtused leiti valemitega:

$$\bar{S}_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n S_{i,j}^*}{n} \quad (14)$$

ja

$$\bar{V}_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n V_{i,j}^*}{n} , \quad (15)$$

kus $k = 28$ on aastate arv, i -tähistab päevade indeksit ja j aastate indeksit.

Päevased standardhälbed arvutati valemitega:

$$\sigma_{S_i^*} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (S_{i,j}^* - \bar{S}_i^*)^2} \quad (16)$$

ja

$$\sigma_{V_i^*} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (V_{i,j}^* - \bar{V}_i^*)^2} , \quad (17)$$

kus $n = 28$ on aastate arv, i -tähistab päevade indeksit ja j aastate indeksit.

3.5 Trendi analüüs

Jääolude muutuste hindamiseks on töös kasutatud lineaarset regressiooni. Lineaarne regressioon on statistiline meetod, mis võimaldab leida seost sõltuva ja sõltumatu muutuja vahel. Lineaarset seost saab esitada võrrandina:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X, \quad (18)$$

kus Y on sõltuv muutuja, X on sõltumatu muutuja, β_0 ja β_1 määravad sirge lõikepunkti ja tõusu [17].

Lineaarse võrrandi tõusu saab leida seosega:

$$\beta_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_i)(Y_i - \bar{Y}_i)}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_i)^2}, \quad (19)$$

kus Y_i tähistab sõltuvaid muutujaid, X_i tähistab sõltumatuid muutujaid, katusega on tähistatud vastavad keskvaärtused. [17]

Töös kasutatakse tõusu β_1 (19) selleks, et analüüsida toimunud jääolude muutusi ja trende. Trendide statistilist olulisust hinnati p -väärtuse ja determinatsiooni kordaja R^2 (20) abil. P -väärtust saab interpriteerida kui tõenäosust, et statistiline trend pole oluline. Kui p -väärtus on väiksem kui valitud olulisuse nivoo $\alpha = 0,05$, siis eeldatakse, et trend on statistiliselt oluline.

R^2 näitab, kui suurt osa uuritava suuruse muutlikkusest kirjeldab lineaarne mudel. Teisisõnu võib öelda, et R^2 näitab, kui hästi andmed langevad kokku meie regressioonisirgega. Seda saab leida valemistest:

$$R^2 = 1 - \frac{S_{res}}{S_y}, \quad (20)$$

kus

$$S_{res} = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (21)$$

on mudeli hajuvus ja

$$S_y = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)^2 \quad (22)$$

koguhajuvus. Valemis (21) \hat{Y} tähistab lineaarset lähendust [18].

4 Tulemused

4.1 Jäähooaeg

Jäähooaja uurimisel leitud statistikud kati tabelisse:

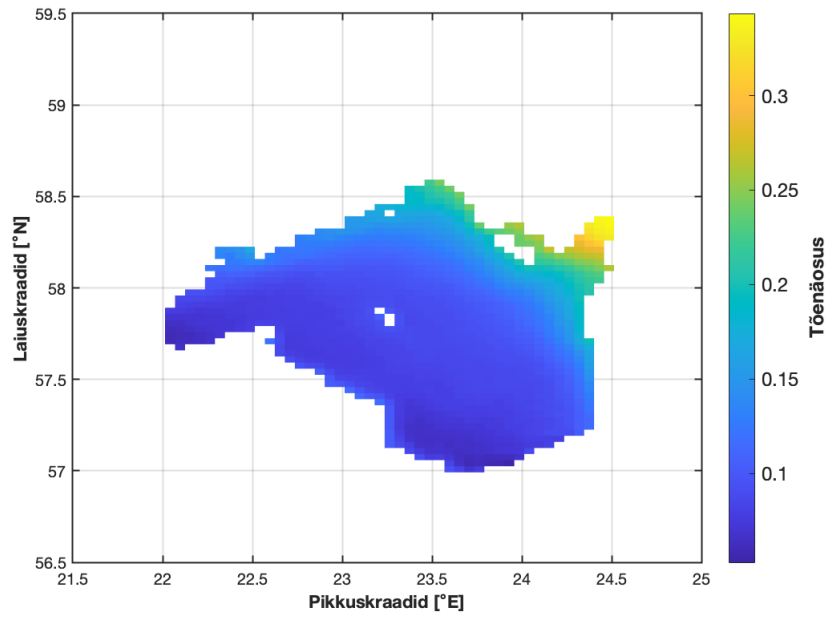
Tabel 1: Jäähooaja statistikud. c_a - jäähooaja algus, c_l - jäähooaja lõpp, L - jäähooaja pikkus, x_{min} - minimaalne väärtus, x_{max} - maksimaalne väärtus, \bar{x} - keskvärtus, σ - standardhälve. Väärtused on esitatud päevades 1. oktoobrist kuni 31. maini ning ümardatud täisarvuni.

	x_{min}	x_{max}	\bar{x}	σ
c_a	48	118	83	19
c_l	111	220	184	21
L	16	159	102	32

Analüüsidest saadud tulemusi tabelis (1) näeme, et jäähooaeg algab kõige varasemalt 48. päeval ehk 17. novembril ja kõige hilisemalt 118. päeval ehk 26. jaanuaril. Kõige varem on jäähooaeg lõppenud 111. päeval ehk 19. jaanuaril ja kõige hiljem 220. päeval ehk 8. mail. Jäähooaeg algab tavaliselt detsembris ja lõpeb märtsis-aprillis. Keskmiselt kestab jäähooaeg 3-4 kuud. Jäähooaeg on maksimaalselt kestnud üle 5 kuu ja minimaalselt vaid 16 päeva. Kõikide parameetrite puhul on märgata suur standardhälve, mis iseloomustab nende varieeruvust. Standardhälve jäähooaja alguse ja lõpu jaoks on ligikaudu 20 päeva ja jääperioodi jaoks 32 päeva.

4.2 Jää esinemise tõenäosus

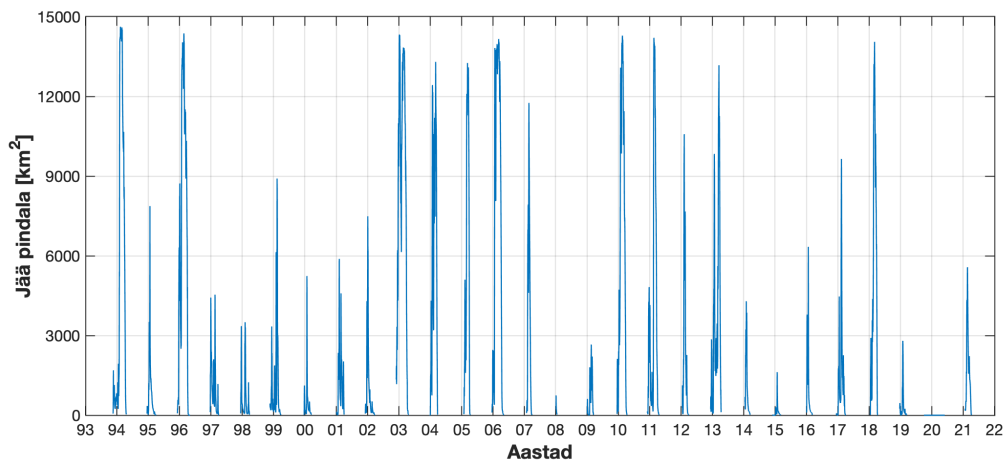
Jää esinemise tõenäosus, mis on leitud võrrandist (5), on esitatud joonisel (2). Joonis näitab, et jää esinemise tõenäosus on põhjapoolsetel rannikualadel oluliselt suurem kui lõunas ja piirkonna keskel. Seda nähtust põhjustab madal veetase, kuna madala veetaseme juures soojushulk kaob kiiremini. Lisaks maa soojusmahtuvus on väiksem kui veel, mistõttu maa külmeneb kiiremini ja suudab vett jahutada. Suurim tõenäosus on saavutatud Pärnu lahes, kus veetase on kuni 15 m [19]. Korrutades jää esinemistõenäosust ajavahemikuga 243 päeva, on võimalik arvutada jää päevade arv igas punktis. Pärnu lahes esineb jää tihedamini ja kauem, ligikaudu 73 jääpäeva aastas. Liivi lahe keskosas, kus vee sügavus ulatub kuni 60 m, on tõenäosus oluliselt väiksem, ligikaudu 24 jääpäeva aastas.



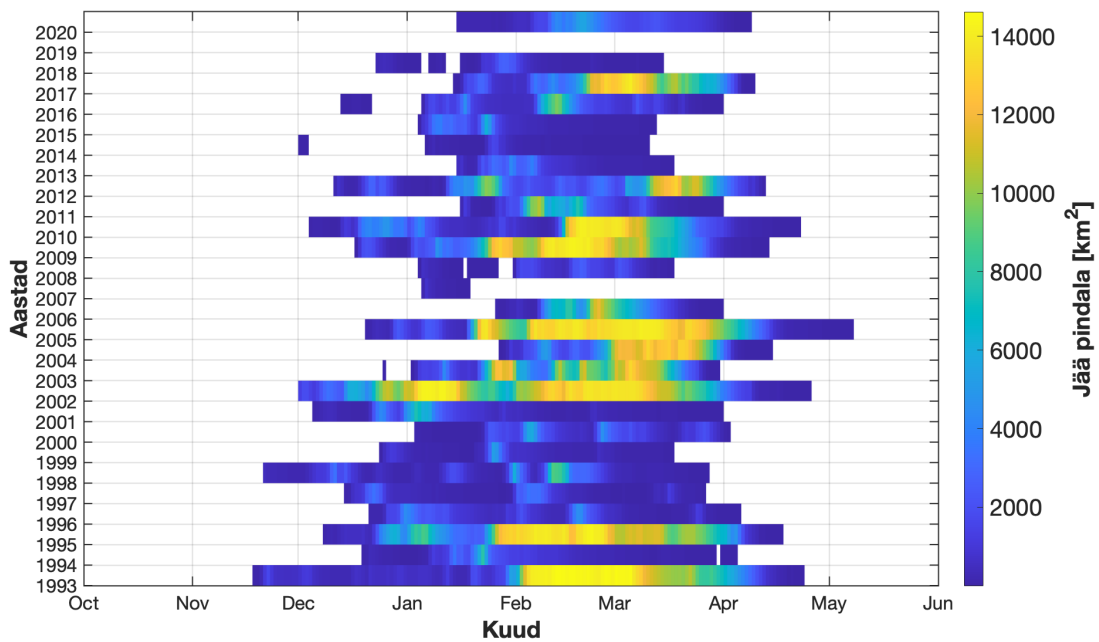
Joonis 2: Jää esinemise tõenäosus Liivi lahes ajavahemikus 1. oktoobrist kuni 31. maini. x -telg tähistab pikkuskraade ja y -teljele on märgitud laiuskraadid.

4.3 Jää pindala

Kasutades S_t^\dagger ja $S_{t,j}^*$ andmeid, kujutati integraalse jää pindala ajaline muutus graafiliselt joonistel (3) ja (4).



Joonis 3: Liivi lahe integraalne jää pindala muutus ajavahemikus 1993/94 kuni 2020/21.

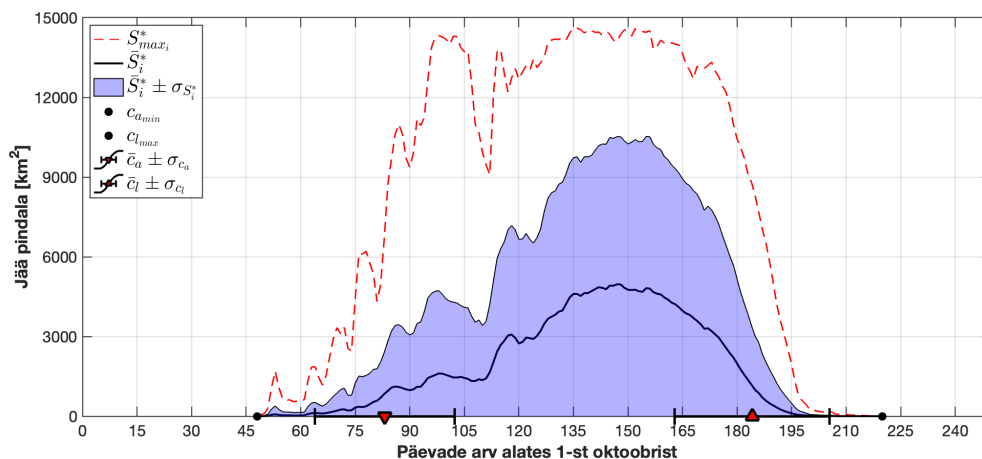


Joonis 4: Integraalne jää pindala Liivi lahes jäähooaegade lõikes. x -telg tähistab kuud ja y -telg jäähooaja aasta algust, mis tähendab, et 1993. aasta y -teljel vastab 1993/94 jäähooajale, 1994. aasta vastab 1994/95 jäähooajale jne.

Analüüsidest jooniseid (3) ja (4) on märgata, et talvised tingimused erinevatel aastatel erinevad üksteisest oluliselt. Külmematel talvedel, nagu näiteks aastatel 1993/94, 1995/96, 2002/03, 2004/05, 2005/06, 2009/10, 2010/11, 2012/13, 2017/18 oli üle 80% piirkonnast kaetud jääga. Pehmematel talvedel, nagu näiteks aastatel 1997/98, 2007/08, 2008/09, 2014/15, 2018/19, 2019/20, katab jää alla 25% piirkonnast ja mõni aasta võib hoopis puududa. Jäähooaja alguses on pindala kasv katkev, kuid pärast suurima väärtuse saavutamist kahaneb sujuvalt. Samuti on näha, et kui jäähooajal on jää pindala väärtused suured, siis lõpevad need hiljem kui need jäähooajad, kus jää pindala on väiksem.

Joonisel (5) on kujutatud integraalse jää pindala päevased maksimaalsed- ja keskväärtused koos usaldusvahemikuga $\bar{S}_i^* \pm \sigma_{S_i^*}$ ja jäähooaja statistikutega.

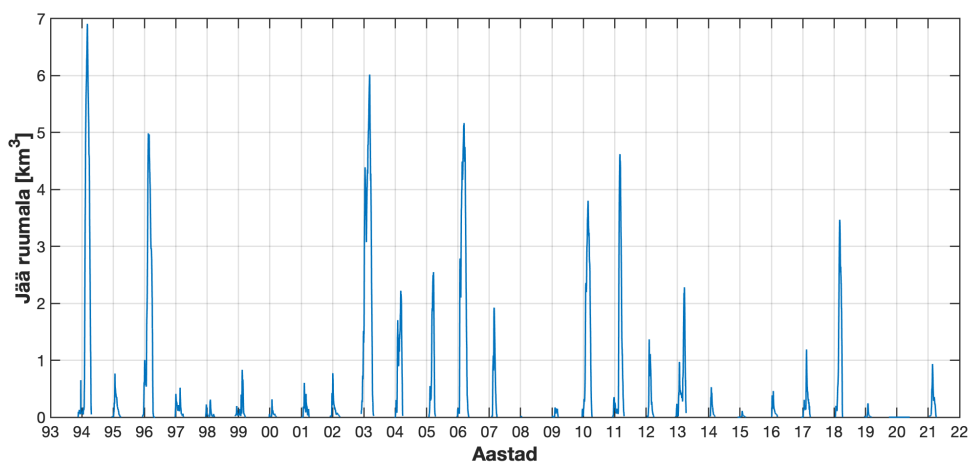
Suurim keskmine jää pindala väärtus $4,96 \cdot 10^3 \text{ km}^2$ saavutati veebruarikuus. Uurides maksimaalseid väärtusi $S_{max_i}^*$ leiti, et üle 90% Liivi lahest võib jäätuda juba detsembris, nagu see oli aastal 2002/2003, mida võib näha joonisel (4). Kui vaadata joonise (5) tõusu ja langust, siis võime näha, et jää tekkimine võtab keskmiselt kauem aega ja on katkev, kuid jää sulamine toimub kiiremini ja on ühtlasem, seda on võimalik jälgida ka joonisel (4). Standarthälbe ulatus $S_i^* \pm \sigma_{S_i^*}$ näitab, et pindala on väga suure hajuvusega. Veebruarikuu teise poole standardhälve ulatub 5700 km^2 -ni.



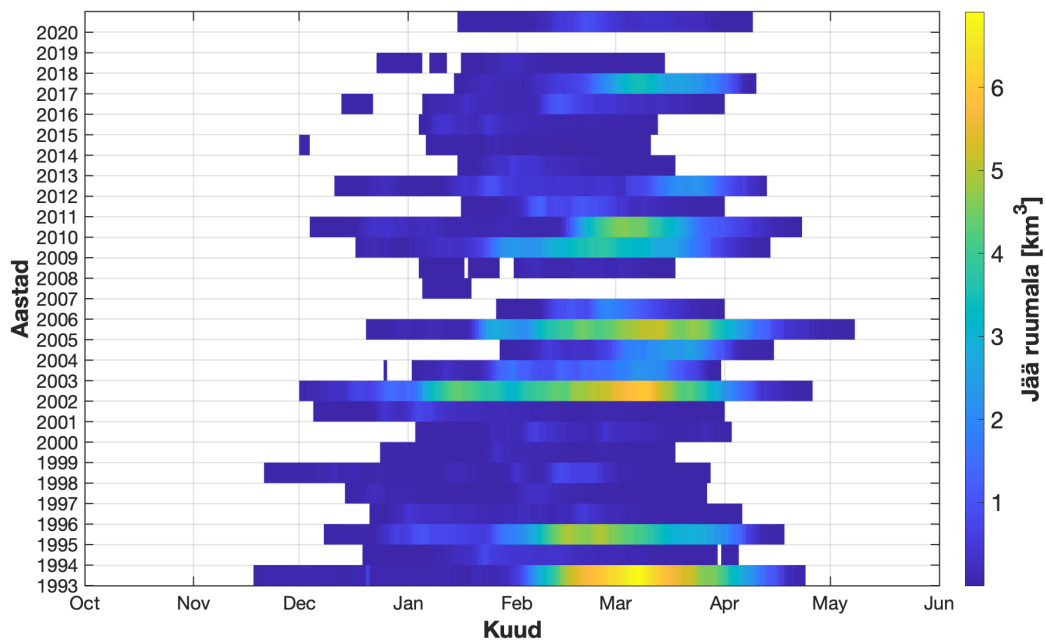
Joonis 5: Liivi lahe integraalse jää pindala statistikud. Joonisele on iga päeva jaoks lisatud maksimaalsed jää pindala väärtused $S_{max_i}^*$ punase punktiirjoonega. Must pidevjoon tähistab pindala keskvaartusi \bar{S}_i^* . Sinise värviga viirutatud osa määrab pindalade standardhälbe ulatuse $\bar{S}_i^* \pm \sigma_{S_i^*}$. Jäähooaja alguse minimaalne väärtus $c_{a_{min}}$ ja jäähooaja lõpu maksimaalne väärtus $c_{l_{max}}$ on joonisel tähistatud mustade täppidega. Punased kolmnurgad koos vahemikkudega tähistavad jäähooaja alguse keskmist koos standardhälbe ulatusega $\bar{c}_a \pm \sigma_{c_a}$ ja jäähooaja lõpu keskmist väärtust koos standardhälbega $\bar{c}_l \pm \sigma_{c_l}$.

4.4 Jää ruumala

Integraalse jää ruumala ajaline muutus kujutati graafiliselt joonistel (6) ja (7) kasutades V_t^\dagger ja $V_{i,j}^*$ andmeid.



Joonis 6: Liivi lahe integraalne jää ruumala muutus ajavahemikus 1993/94 kuni 2020/21.

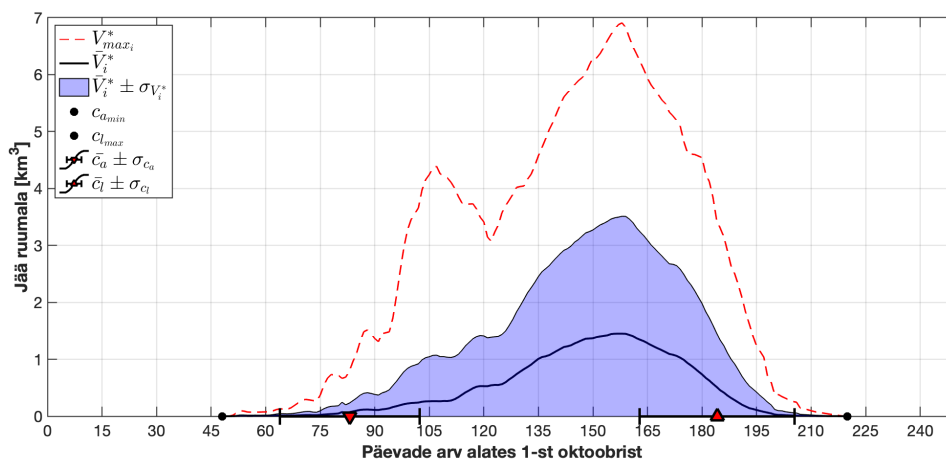


Joonis 7: Integraalne jää ruumala Liivi lahes jäähooegade lõikes. x -telg tähistab kuud ja y -telg jäähooaja aasta algust, mis tähendab, et 1993. aasta y -teljel vastab 1993/94 jäähooajale, 1994. aasta vastab 1994/95 jää hooaja jne.

Analüüsidest jooniseid (6) ja (7) näeme vaid üksikuid aastaid, kus jää ruumala väärtus on $> 3 \text{ km}^3$. Võrreldes jää integraalseid pindalaid joonistel (3) ja (4) on märgata, et jää paksuse kasvamine ei ole nii katkendlik ja toimub sujuvamalt. Lisaks 2003/04 ja 2004/05 jäähooegade põhjal saab järeldada, et isegi kui Liivi lahe suurim osa on kaetud jääga, siis selle ruumala võib jääda alla 3 km^3 . Visuaalselt on näha, et suurimad ruumala väärtused saavutatakse reeglina pikematel jäähooegadel.

Joonisel (8) on kujutatud integraalse jää ruumala päevased maksimaalsed- ja keskvaartused koos usaldusvahemikuga $\bar{S}_i^* \pm \sigma_{S_i^*}$ ja jäähooaja statistikutega.

Jooniselt (8) näeme, et jää ruumala sujuvalt kasvab alates jäähooaja algusest märtsini, kus ta saavutab oma suurima väärtuse. Keskmiselt on märtsis jää ruumala $1,45 \text{ km}^3$, kuid maksimaalne väärtus 1993/1994 aastal oli $6,9 \text{ km}^3$. Pärast suurima väärtuse saavutamist hakkab ruumala püsivalt langema, mis on visuaalselt ühtlasem ja kiirem kui kasvamine.



Joonis 8: Liivi lahe integraalse jää ruumala statistikud. Joonisele on iga päeva jaoks lisatud maksimaalsed jää ruumala väärtused $V_{max_i}^*$ punase punktiirjoonega. Must pidevjoon tähistab ruumala keskvaartusi \bar{V}_i^* . Sinise värviga viirutatud osa määrab keskmiste ruumalade standardhälbe ulatuse $\bar{V}_i^* \pm \sigma_{V_i^*}$. Jäähooaja alguse minimaalne väärtus $c_{a_{min}}$ ja jäähooaja lõpu maksimaalne väärtus $c_{l_{max}}$ on joonisel tähistatud mustade täppidega. Punased kolmnurgad koos vahemikkudega tähistavad jäähooaja alguse keskmist koos standardhälbe ulatusega $\bar{c}_a \pm \sigma_{c_a}$ ja jäähooaja lõpu keskmist väärtust koos standardhälbega $\bar{c}_l \pm \sigma_{c_l}$.

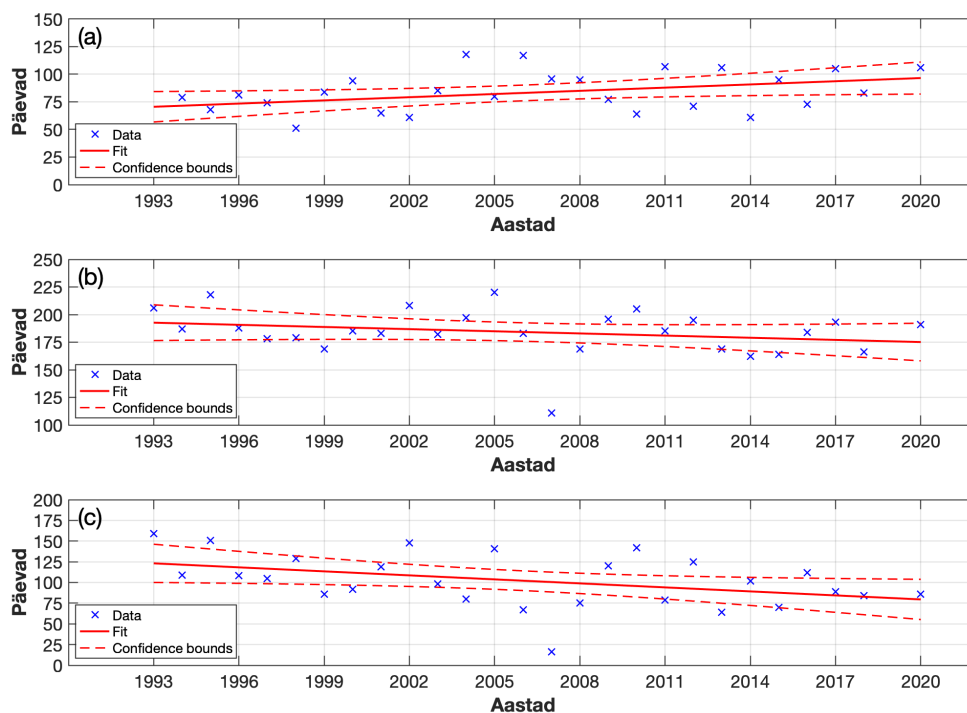
4.5 Trendid

Jäähooaja statistikute regressiooni tulemused on esitatud tabelis (2) ja lineaarsed võrrandid kujutatud graafiliselt joonisel (9).

Tabel 2: Jäähooaja tulemused. c_a tähistab jäähooaja algust, c_l -jäähooaja lõppu ja L - jäähooaja pikkust. Väärtused on ümardatud kolm kohta pärast koma.

Sõltuv muutuja	Trend β_1	p-väärtus	R^2
c_a	0,964	0,038	0,161
c_l	-0,650	0,220	0,060
L	-1,614	0,038	0,161

Regressioonanalüüsi tulemused näitavad positiivset ja statistiliselt olulist trendi 0,964 päev/aasta jäähooaja alguse suhtes ($p = 0,038$ ja $R^2 = 0,161$). See tähendab, et jäähooaeg algab igal järgneval aastal eelmisest keskmiselt päev võrra hiljem. Jäähooaja lõpu analüüs näitas negatiivset trendi $-0,65$ päev/aasta ($p = 0,022$ ja $R^2 = 0,06$). P-väärtus ületab usaldusnivood $\alpha = 0,05$, seega tulemust ei saa arvestada statistiliselt oluliseks, mida kinnitab ka madal R^2 väärtus. Jäähooaja pikuse puhul näitas tulemus samuti negatiivset trendi suurusega $-1,614$ päev/aasta ($p = 0,038$ ja $R^2 = 0,161$). P-väärtus ületab meie poolt valitud usaldusnivood ja trendi võib lugeda statistiliselt oluliseks. Tulemus näitab, et jäähooaja pikkus väheneb ligikaudu 1,5 päeva võrra aastas, mis on loogiline, kuna jäähooaja alguse puhul saime positiivse trendi.



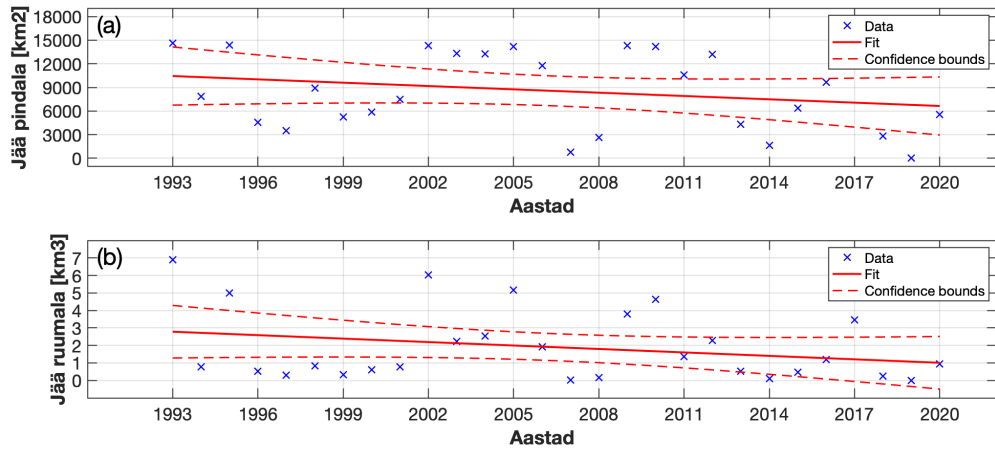
Joonis 9: Jäähooaja statistike regressioonisirged. Joonisel (a) on kujutatud lineaarne mudel jäähooaja alguse jaoks, joonisel (b) jäähooaja lõppu jaoks ja joonisel (c) jäähooaja pikkuse jaoks. Siniste ristidega on tähistatud andmepunktid, punase pideva joonega sirge võrrand ja punase punktiirjoonega on tähistatud usaldusvahemik

Maksimaalse jää pindala ja ruumala regressiooni tulemused on esitatud tabelis (3) ja vastavad lineaarsed võrrandid kujutati graafiliselt joonisel (10).

Tabel 3: Jää pindala ja ruumala mudeli väärtused

Sõltuv muutuja	Trend	p-väärtus	Standardviga	R^2
S_{max_i}	-140,81	0,229	114,18	0,055
V_{max_i}	-0,066	0,169	0.046	0,071

Regressiooni tulemused näitasid kahanemistendentsi, kuid ükski trend ei ole usaldusväärne. P-väärtus on suurem olulisusnivoost ja R^2 väärtus on väga väike mõlema muutuja puhul. Maksimaalse jää pindala trend näitas kahanemist $-140 \text{ km}^2/\text{aastas}$ ja maksimaalse jää ruumala trend oli samuti negatiivne, $-0,066 \text{ km}^3/\text{aastas}$.



Joonis 10: Regressioonisirged maksimaalse jää pindala ja ruumala jaoks. Joonisel (a) on kujutatud sirge võrrand maksimaalse jää pindala jaoks ja joonisel (b) sirge võrrand maksimaalse jää ruumala jaoks. Joonisel (a) tähistab y -telg jää pindala km^2 ja joonisel (b) jää ruumala km^3 , x -telg mõlemal joonisel tähistab aastate arvu. Siniste ristidega on tähistatud andmepunktid, punase pideva joonega sirge võrrand ja punase punktiirjoonega on tähistatud usaldusvahemik.

5 Arutelu ja võrdlus varasemate uuringutega

Käesoleva töö tulemusi on võimalik võrrelda varasemalt tehtud uuringutega, mis põhinevad vaatlusandmetel. Jevrjeeva [6] uuring on üks esimestest, kus on võetud kokku ja analüüsitud kogu eelmise sajandi Liivi lahe jääolude andmeid. Jevrejeva uuringu tulemuste põhjal algab jäähooaeg keskmiselt 24. novembri ja 10. detsembri vahel ning lõpeb aprilli keskel. Käesoleva uuringu tulemused näitavad, et jäähooaeg algab keskmiselt 22. detsember ja lõpeb aprilli alguses. Arvestades kõrge standardhõlbega mõlema töö tulemustes, ei saa kindlalt öelda, kas erinevused on olulised. Muutuste tendents kaldub siiski jäähooaja pikkuse vähenemise suunas. Seda järeldust kinnitab antud töös leitud jäähooaja pikkuse negatiivne trend, mille järgi jäähooaeg lüheneb umbes 1-2 päeva võrra aastas.

Raudsepa [20] uuringus analüüsitakse jääperioodi 1982-2019 aastatel ja tuuakse välja jää esinemistõenäosused ja jäähooaegade statistilised väärtused. Uuringus kasutati nii satelliitide kui ilmateenistuse jääkaartide andmeid ja tulemused langevad küllaltki hästi kokku käesolevas töös saadud tulemustega. Jää esinemise tõenäosus on mõlema töö puhul sarnase jaotusega ning suurim väärtus saadi Pärnu lahes. Jäähooaja statistikumid ei erinevad eriti üksteisest. Siitami [19] uuringus on kirjeldatud Liivi lahe jääolusid kasutades satelliidi andmeid. Selles uuringus analüüsiti 2002/2003-2010/2011 aastate talvesid ning leiti jäähooaegade statistikumid koos maksimaalsete jää pindala väärtustega. Uuringu ja käesoleva töö tulemused langevad enamasti aastatel kokku, kuid on märgata suuremaid erinevusi pehmemate talvede puhul. Olulisimaks erinevuseks oli 2007/2008 aasta talv, kus jäähooaeg lõppes käesolevas töös 19. jaanuaril, kuid uuringus 7. aprillil. Lisaks oli maksimaalne jää pindala sellel aastal enam kui kaks korda väiksem kui lõputöös leitud väärtus. Oluline jää pindala erinevus on olnud ka 2006/2007 aastal, kus käesoleva töö maksimaalne jää pindala sellel oli 11 km^2 ja uuringus vaid 4,4 km^2 , kuid jäähooaja alguse ja lõppu vahe ei erinevad oluliselt.

Antud töö ja Siitami [19] uuringu tulemuste erinevusteks võib olla mitu põhjendust. Esiteks mõjutab tulemusi erineva meetoodika kasutamine. Käesolevas töös kasutati jää kontsentratsiooni piiri 0,15 kuid uuringus 0,1. Erinevad jää kontsentratsiooni piirväärtused võivad põhjustada erinevusi hõreda jää identifitseerimisel. Kuna uuringus pole täpsustatud piirkond, siis on võimalik, et andmed sisaldavad kiiresti jäätuvaid Saaremaa ja Hiiumaa vahelisi rannikulähedasi merealasi, mida käesolevas töös pole käsitletud. Kolmas oluline põhjus on andmetüüpide erinevus. Mudeli andmed võivad erineda päris vaatlustest, kuid ka vaatlusandmetel on oma puudusi. Võrreldavas uuringus on kasutatud kuni 50 satelliidi pilti aasta kohta, kusjuures 2006/2007 ja 2007/2008 aastatel on kasutatud vaid 28 ja 33 pilti, millest enamasti olid kerge pilvisusega. Satelliidi mõõtmiste puhul on pilvisus oluline parameeter, mis otseselt mõjutab tulemusi peegeldades valgust [21].

Satelliitide jää paksuse mõõtmised on ajalooliselt olnud üldiselt ebatäpsed, kuid tänapäeva

tehnoloogia arenguga on hakkanud tekkima satelliidid, mis järjest parema täpsusega suudavad edastada neid andmeid, näiteks satelliit Cryosat-2 [21]. Raudseppa [22] uuringus on võrreldud Cryosat-2 abil tehtud jää paksuse mõõtmisi mudeli andmetega. Tulemusena leiti, et satelliidi andmetest tulenev keskmine jää paksus on mudeli andmete suhtes alahinnatud peaaegu kogu jäähooaja jooksul. Jää kasvamisperioodil, kui jää paksus on alla 0,6 m, olid satelliidi mõõtmised täpsed. Satelliidi vaatlused olid võimelised andma lisaväärtust jää paksuse hindamisele sulamisperioodil. Uuringu autorite väitel annavad satelliidi andmed (jt. jää produktid) lisaväärtust jää paksuse hindamisel.

Liivi lahe maksimaalseid jää pindala ja ruumala trende pole varasemalt põhjalikult uuritud, kuid käesoleva töö tulemusi on võimalik vaadelda ja võrrelda Läänemere kontekstis kasutades Copernicus mereteenuse poolt tehtud analüüse [23][24], mis põhinevad Läänemere vaatlusandmetel perioodil 1993-2021. Jää maksimaalse pindala trendid nii Liivi lahes kui Läänemeres on negatiivsed, kuid ükski neist ei olnud piisavalt usaldusväärne. Liivi lahes oli trend $-140 \text{ km}^2/\text{aasta}$ ($p = 0,229$) ja Läänemeres $-1177 \text{ km}^2/\text{aasta}$ ($p = 0,4$). Jää maksimaalse ruumala puhul olid tendentsid samuti negatiivsed, kuid Läänemere trend näitas statistiliselt olulist kahanemist $-0,75 \text{ km}^3/\text{aasta}$ ($p = 0,02$), samas Liivi lahe trend $-0,066 \text{ km}^3/\text{aasta}$ ($p = 0,169$) ei näidanud statistilist olulisust. Arvestades, piirkondade vahelist suurust saab öelda, et tulemused langevad küllaltki hästi kokku, kuid Läänemere puhul ruumala vähenemise tendents on statistiliselt usaldusväärsem kui Liivi lahe puhul.

6 Kokkuvõtte

Käesolevas töös uuriti Liivi lahe jääolude ajalis-ruumilist muutlikkust perioodil 1993/94 kuni 2020/21. Töö arvutused põhinevad jää-ookeni mudeli andmetel NEMO-Nordic 1.0. Jääolusid kirjeldati jää kontsentratsiooni ja paksusest tuletatud jääperioodi karakteristikutega, ruumilise tõenäosus kaardiga ning integraalsete jää pindala ja ruumala aegridadega. Saadud tulemused kujutati graafiliselt ja võrreldi varasemate uuringutega.

Keskmiselt algab jäähooaeg detsembris ja lõpeb aprilli alguses. Keskmine jäähooaja pikkus on 3-4 kuud. Leitud jää esinemise tõenäosus on oluliselt suurem põhjapoolse ranniku juures ning suurim tõenäosus on saadud Pärnu lahes.

Tulemustest järeldub, et jääolud Liivi lahes on väga muutlikud. Tugevamatel talvedel üle 80% Liivi lahe pindalast võib olla kaetud jääga, kuid pehmetel talvedel külmub kuni 25% Liivi lahe pindalast. Suuremad keskmised pindala väärtused saavutati veebruaris. Integraalne jää ruumala saavutab harvemini oma ekstreemseid väärtusi, enamus aastaid on ruumala alla 3 km^3 . Maksimaalne jää ruumala $6,9 \text{ km}^3$ oli 1993/94 aastal. Suuremad keskmised ruumala väärtused saavutati märtsi alguses.

Trendi analüüsi käigus uuriti jäähooaja alguse ja lõpu kuupäevi, jäähooaja pikkust ning jää maksimaalset pindala ja ruumala. Töös leiti jäähooaja alguse suhtes kasvav trend, mille järgi nihkub jäähooaja algus 1 päeva võrra hilisemaks igal järgneval aastal, ja jäähooaja pikkuse kahanev trend, mille kohaselt jäähooaeg lüheneb 1,5 päeva võrra aastas. Jää maksimaalse pindala ja ruumala uurimisel statistiliselt olulisi trende ei leitud.

Summary

This thesis examined the temporal and spatial variability of the ice conditions in the Gulf of Riga from 1993/94 to 2020/21. The calculations are based on the data of the ice-ocean model NEMO-Nordic 1.0. Ice conditions were described with characteristics derived from the ice period; ice concentration and thickness; spatial probability map, and integral time series of ice area and volume. The obtained results were graphically represented and compared with previous studies.

On average, the ice season starts in December and ends in early April. The average length of the ice season is 3-4 months. The probability of the presence of ice is significantly higher on the northern coast, and with the highest probability in Pärnu Bay.

The results show that ice conditions in the Gulf of Riga are very variable. During harsh winters, more than 80% of the area of the Gulf of Riga can be covered with ice, but during mild winters, up to 25% of the area of the Gulf of Riga is frozen. On average, larger area values have been achieved in February. The integral ice volume has rarely reached its extreme values, most years the volume has been below 3 km^3 . The maximum ice volume of 6.9 km^3 was in 1993/94. Higher volume values on average were achieved at the beginning of March.

During the trend analysis, the start and end dates of the ice season, the length of the ice season, and the maximum area and volume of the ice were studied. Trend analysis indicated an increasing trend of the beginning of the ice season by 1 day per year, and a decreasing trend of the length of the ice season by 1.5 days per year. No statistically significant trends were found when examining the maximum surface area and volume of ice.

Kasutatud kirjadus

Kõik lingid on kättesaadavad seisuga 21.06.2023

- [1] Sten Anspal, Hunt Tõnis, and Janno Järve. Merekaubanduse tulevik eestis. Technical report, 2020.
- [2] Eesti riiklik energia- ja kliimakava aastani 2030 (REKK 2030). Technical report, 2019.
- [3] Maria Orevas, Raimo Pajula, Kati Kraavi, Eike Riis, and Jüri Hion. Liivi lahe tuulepargi keskkonnamõju hindamine. Technical report, 2018.
- [4] Anna Szaniawska. The Gulf of Riga. *Balt. Crustac.*, pages 23–24, 2018.
- [5] Tim C. Hammer, Tom Willems, and Hayo Hendrikse. Dynamic ice loads for offshore wind support structure design. *Mar. Struct.*, 87:103335, jan 2023.
- [6] Svetlana Jevrejeva and Matti Leppäranta. Ice conditions along the Estonian coast in a statistical view. *Nord. Hydrol.*, 33(2-3):241–262, 2002.
- [7] Svetlana Jevrejeva. Association Between Ice Conditions in the Baltic Sea along the Estonian Coast and the North Atlantic Oscillation. *Hydrol. Res.*, 33(4):319–330, aug 2002.
- [8] Sea Ice Thickness Data Sets: Overview & Comparison Table | Climate Data Guide. [Online] <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/sea-ice-thickness-data-sets-overview-comparison-table>.
- [9] Robinson Hordoir, Lars Axell, Anders Höglund, Christian Dieterich, Filippa Fransner, Matthias Gröger, Ye Liu, Per Pemberton, Semjon Schimanke, Helen Andersson, Patrik Ljungemyr, Petter Nygren, Saeed Falahat, Adam Nord, Anette Jönsson, Iréne Lake, Kristofer Döös, Magnus Hieronymus, Heiner Dietze, Ulrike Löptien, Ivan Kuznetsov, Antti Westerlund, Laura Tuomi, and Jari Haapala. Nemo-Nordic 1.0: A NEMO-based ocean model for the Baltic and North seas - Research and operational applications. *Geosci. Model Dev.*, 12(1):363–386, jan 2019.
- [10] Martin Vancoppenolle, Thierry Fichefet, Hugues Goosse, Sylvain Bouillon, Gurvan Madec, and Miguel Angel Morales Maqueda. Simulating the mass balance and salinity of Arctic and Antarctic sea ice. 1. Model description and validation. *Ocean Model.*, 27(1-2):33–53, jan 2009.
- [11] Per Pemberton, Ulrike Löptien, Robinson Hordoir, Anders Höglund, Semjon Schimanke, Lars Axell, and Jari Haapala. Sea-ice evaluation of NEMO-Nordic 1.0: a NEMO-LIM3.6-based ocean-sea-ice model setup for the North Sea and Baltic Sea. *Geosci. Model Dev.*, 10:3105–3123, 2017.

- [12] What are the MOTU APIs? | Copernicus Marine Help Center. [Online] <https://help.marine.copernicus.eu/en/articles/4796533-what-are-the-motu-apis>.
- [13] Walter N. Meier and J. Scott Stewart. Assessing uncertainties in sea ice extent climate indicators. *Environ. Res. Lett.*, 14(3):035005, mar 2019.
- [14] Dian Putrasahan, Fabian Wachsmann, Irina Fast, and Joerg Behrens. Climate Data Operators (CDO).
- [15] The MathWorks Inc. MATLAB version: 9.13.0 (R2022b), 2022.
- [16] Kevin Kelly and Bojan Šavrič. Area and volume computation of longitude–latitude grids and three-dimensional meshes. *Trans. GIS*, 25(1):6–24, feb 2021.
- [17] Norman R. Draper and Harry Smith. *Applied regression analysis*. John Wiley & Sons, 1998.
- [18] Margus Pihlak. *Klassikaline ja mitteparameetiline matemaatiline statistika : õpik kõrgkoolidele*. Tallina Tehnikaülikooli Kirjastus, Tallinn, 2018.
- [19] Laura Siitam, Liis Sipelgas, Ove Pärn, and Rivo Uiboupin. Statistical characterization of the sea ice extent during different winter scenarios in the Gulf of Riga (Baltic Sea) using optical remote-sensing imagery. *Int. J. Remote Sens.*, 38(3):617–638, 2017.
- [20] Urmas Raudsepp, Rivo Uiboupin, Kaari Laanemäe, and Ilja Maljutenko. Geographical and seasonal coverage of sea ice in the Baltic Sea. In: Copernicus Marine Service Ocean State Report, Issue 4. *J. Oper. Oceanogr.*, (4):126–132, 2020.
- [21] Science of Sea Ice | National Snow and Ice Data Center. [Online] <https://nsidc.org/learn/parts-cryosphere/sea-ice/science-sea-ice#anchor-4>.
- [22] Urmas Raudsepp, Rivo Uiboupin, Ilja Maljutenko, Stefan Hendricks, Robert Ricker, Ye Liu, Doroteaciro Iovino, Andrew K. Peterson, Hao Zuo, Thomas Lavergne, Signe Aaboe, and Roshin P. Raj. Combined analysis of Cryosat-2/SMOS sea ice thickness data with model reanalysis fields over the Baltic Sea. In: Copernicus Marine Service Ocean State Report, Issue 3. *J. Oper. Oceanogr.*, 12(3):83–89, jun 2019.
- [23] Urmas Raudsepp, Ilja Maljutenko, Lars Axell, V. Huess, and P. Laagemaa. CMEMS Product User Manual for Ocean Monitoring Indicator Baltic Sea Ice Extent Change Record. 2021.
- [24] Urmas Raudsepp, Ilja Maljutenko, Lars Axell, V. Huess, and P. Laagemaa. CMEMS Product User Manual for Ocean Monitoring Indicator Baltic Sea Ice Volume Change Record. 2021.