

Tartu Ülikool

Loodus- ja tehnoloogiateaduskond

Ökoloogia ja Maateaduste Instituut

Geograafia osakond

Bakalaureusetöö loodusgeograafia

Merejää paksuse muutlikkus Eesti rannikul

Kristjan Mahla

Juhendaja: prof. Jaak Jaagus

Kaitsmisele lubatud:

Juhendaja: /allkiri, kuupäev/

Osakonna juhataja: /allkiri, kuupäev/

Tartu 2015

Sisukord

Sissejuhatus.....	3
1.1 Jää mõõtmise metoodika.....	5
1.2 Andmed.....	6
2. Tulemused.....	9
2.1 Temperatuuri muutused	9
2.2 Merejää paksuse sesoonne varieeruvus.....	10
2.3 Jää paksuse aastatevaheline varieeruvus.....	14
2.4 Trendianalüüs.....	15
3. Kokkuvõte.....	18
Kasutatud kirjandus	19
Summary	21

Sissejuhatus

Läänemere regiooni kliimat mõjutavad mitmed tegurid, alustades piirkonna paiknemisest suurel geograafilisel laiuskraadil. See tagab ala suhteliselt madala temperatuuri, päiksekiirguse suure sesoonse kõikumise ning aastaegade vaheldumise. Suurt mõju avaldab ka hoovuste liikumine ning erinevate õhumasside vaheldumine. Nende tegurite koosmõjul on võimalik täheldada muutusi talvel tekkivas merejääs (Sooäär ja Jaagus, 2007).

Merejää dünaamika ning intensiivsus mängivad tähtsat rolli Eesti ja lähisümbruskonna ilmastikule talvisel perioodil, mõjutades nii kohalikku elusloodust, majandust kui ka inimtegevust (Jevrejeva *et al.*, 2003).

Merejää on üheks põhiteguriks reguleerimaks temperatuurikõikumisi talvisel ajal mandri ja ranniku vahel, mis mõjutab erinevate piirkondade toimetulekut ning iseärasusi vastavalt mere lähedusele ning merejää olemasolule ja paksusele (Omstedt *et al.*, 2001). Pehmema talve puhul on merejää tekkimine vähene. Sellest tingitult soojendab meri enda kohal olevat õhku ning hoiab rannikualade talvist temperatuuri kõrgemana võrreldes mandri siseosaga. Vastupidiselt, külma talve puhul on jää tekkimine suhteliselt varane, mille tulemusel ei ole merel võimalik õhku soojendada ning temperatuurivahe ranniku ja mandriga väheneb tunduvalt. Paksu jääkihi tekkimisega kestab selle sulamine sedavõrd kauem, et kevade tulek rannikuvööndis hilineb võrreldes ülejäänud piirkonnaga (Sooäär ja Jaagus, 2007).

Merejää hoiab merevee alumisi kihte liigse külmumise eest, mis oleks paljudele liikidele surmavaks ökosüsteemi muutuseks. Nii võimaldab merejää erinevatel vetikatel üle elada talvise perioodi ning suve saabudes, jää sulades, jätkata oma elutegevusega. Häirivaks faktoriks on tugeva lainetuse mõjul rannaalade kulumine ehk abrasioon. Merejää aga kaitseb randa tugevate tormide vastu (Weather Underground, 2015). Enamus torme tekib just külmema poolaasta jooksul oktoobrist märtsini. Selle tõttu on merejää olemasolu tähtis osa rannikualade kaitseks tormide laastavale tegevusele (Orviku *et al.*, 2003). Illustreerivaks juhtumiks võib välja tuua 2005. aasta tormi, mis laastas Eesti läänekaldaid. Hävitustöö suuruse üheks põhjuseks oli kaitsva merejää puudumine (Tõnisson *et al.*, 2008).

Merejää enda mõju abrasioonile on väike. Selle kuhjumine randa tekib tugevate tormidega, kuid siis on jääst tekkiv vall ranna kaitseks uute tormide eest (Lepy, 2012). Merejää pidev ja massiline sattumine rannaäärest rannikule võib endaga kaasa tuua kohaliku ranniku iseloomu

muutusi. Kõrge meretase, pikaajaline ühest suunast puhuv tuul ning paksu merejää koosmõju võivad pärast jää sulamist katta ranniku ebahariliku kivide kihiga (Orviku *et al.*, 2011).

Inimeste tegevusele, kes elavad piirkonnas, kus hooajaline merejää tekkimine on tavapärane, on merejää mõju kas positiivne või negatiivne. Mõju oleneb sellest, milline on vastava piirkonna või rahvuse ajalooline, kultuuriline ja tööstuslik areng. Soomlased harrastavad palju erinevaid hobisid ja vabaaja tegevusi, mis hõlmavad endast merejääd ning suhtuvad merejäässe positiivsemalt kui lätlased, kelle jaoks on merejää pigem ohtlik ning takistav tegur merel kaubandusega tegelemiseks (Lepy, 2012). Eestis avaldab merejää peamist mõju inimtegevusele aina suureneva merekaubanduse kaudu ja sellest tuleneva aastaringse vajadusega mereteed vabana hoida. Ainus viis selle tagamiseks on kallite jäälohkujate kasutamine (Sooäär ja Jaagus, 2007). Samaaegselt mängivad jääteed Eestis, eriti saartel, olulist rolli võimaldades suuremahulist inimeste ja kaupade liiklust saarte ja mandri vahel, mis säästab aega ning parandab majanduslikke võimalusi (Mardiste, 1999). Teadmised merejää olude kohta paljude aastakümnete jooksul ja võimalikud merejää muutused tulevikus seoses kliima muutumisega aitavad oluliselt parandada laevaliikluse korraldamist ja jäälohkujate töö planeerimist, et hoida merekaubandus optimaalsel kujul käigus talveperioodil. Merejää olud mõjutavad ka sadamate võimalusi laevu vastu võtta ning liiklust organiseerida (Lepy, 2012).

Eelnevalt on põhjalikult uuritud atmosfääri tsirkulatsiooni mõju merejää tingimustele ning nende seotust anomaaliate tekkele (Omstedt ja Chen, 2001; Vinje, 2001; Koslovski ja Glaser, 1999). Samuti on uuritud merejää mõju lumikatte kestvusele (Tooming ja Keevallik, 2001). Merejää esmast tekkimist ning lõplikku sulamist ning nende seoseid atmosfääri tsirkulatsiooniga Eestis on lähemalt uurinud J. Jaagus. Ta toob esile tugeva põhjusliku seose, kuidas muutus Põhja-Euroopa atmosfääri tsirkulatsioonis, on tõstnud talve keskmist temperatuuri (jaanuar – märts) ning kiirendanud merejää täielikku sulamist (Jaagus, 2006). R. Vahter on andnud ülevaate Tallinna ja Muuga lahe jääoludest ning neid mõjutavatest teguritest vastavalt erinevate talvede omadustele, eelkõige negatiivsete temperatuuride summale (Vahter, 1994). Palju on sellesse valdkonda panustanud S. Jevrejeva, kes uuris Eesti merejää kestvuse ning temperatuuri vahelisi seoseid vahemikus 1900–1990. Sellest selgus, et üldine kestvus on vähenenud 5–10 päeva (Jevrejeva, 2000).

Käesoleva töö peamisteks eesmärkideks on analüüsida merejää paksuse ajalis-ruumilist muutlikkust Eestis ning kindlaks teha pikaajalisi trende merejää paksuses Eesti rannikumerel. Võib eeldada, et talvede soojenedes on jää paksus vähenenud.

1. Materjal ja metoodika

1.1 Jää mõõtmise metoodika

Regulaarseid jäämõõtmisi on Eesti hüdrometeoroloogiasüsteemi rannikujaamades teostatud alates II maailmasõja järgsetest aastatest. Jää paksuse mõõtmisi on läbi viidud talve algul ja lõpus kuus korda kuus, kuna sel perioodil muutub jää paksus kiiresti. Talve keskpaiku, kui on tekkinud tugev kiht jääd, viiakse mõõtmisi läbi kolm korda kuus. Tavaliselt mõõdetakse jääd dekaadi või viispäevaku viimasel päeval.

Kohapeal moodustunud kinnisjää piires valib vaatluste läbiviija või jaama ülem piirkonna, kus hakatakse mõõtmisi teostama. Koha valimisel peab arvestama, et kaldale ei tekiks kinnisjää ladestumist ega rüisjääd. Soovitatavalt oleks mere sügavus mõõtekohas mitte madalam kui 5m ning puuduksid tugevad voolud ning siseveekogude mõjud, mis segaksid jää tekkimist. Iga mõõtmisega tehakse jäässe kaks auku, mis peale tulemuste saamist taaskord jääga kaetakse ning märgistatakse, et vältida samade kohtade kasutamist, mis võivad tulemusi moonutada (Hüdrometeoroloogilise..., 1949).

Aukude ettevalmistamiseks jää paksuse mõõtmisel kasutatakse jäätuuri ehk erilist kangi, mille metallotsaga raiutakse merejää lahti, ja raudvõrku ehk jääkahva, mille eesmärgiks on lahtiste jäätükkide eemaldamine veepinnalt, võrgu tavaline läbimõõt on 25–30 cm. Lisaks kasutatakse löökpuuri, mis võetakse kasutusele, kui tahetakse ette valmistada suurema-mõõdulist jääauku või juhul kui jäätuuri kasutamine osutub liiga raskeks. Tegemist on teras-toruga, mille pikkus on 1m või natuke rohkem, alumine toru ots on varustatud kümne ellipsi kujulise hambaga, mis hõlbustavad jäässe puurimist. Toru raiutakse jäässe haamri abil, mille järel toru pööratakse manuaalselt käepidemega ning tõstetakse ta august välja, et eemaldada toru sisse kogunud jää. Seda protseduuri jätkatakse, kuni on jõutud läbida terve jääkiht (Hüdrometeoroloogilise..., 1949).

Mõõtmisi teostatakse põikliistuga mõõtelati või sätitava mõõtelati abil. Põikliistuga mõõtelatiks on 200 cm pikkune puulatt, mille alumise otsa külge on kinnitatud põikliist ning mõlemad lati otsad on pealistatud 1 mm paksuse vintsrauaga. Hõlpsamaks kasutamiseks on lati ülemisse otsa puuritud ava, millesse asetatakse nõõrist silmus. Esiküljel on sen-

timeetriselised jaotused kogu lati pikkuses, kus nullpunkt asub põiklatiga ühel joonel. Jaotised on numbriliselt tähistatud iga 10 cm tagant, nullist ülespoole 180 ja allapoole 20.

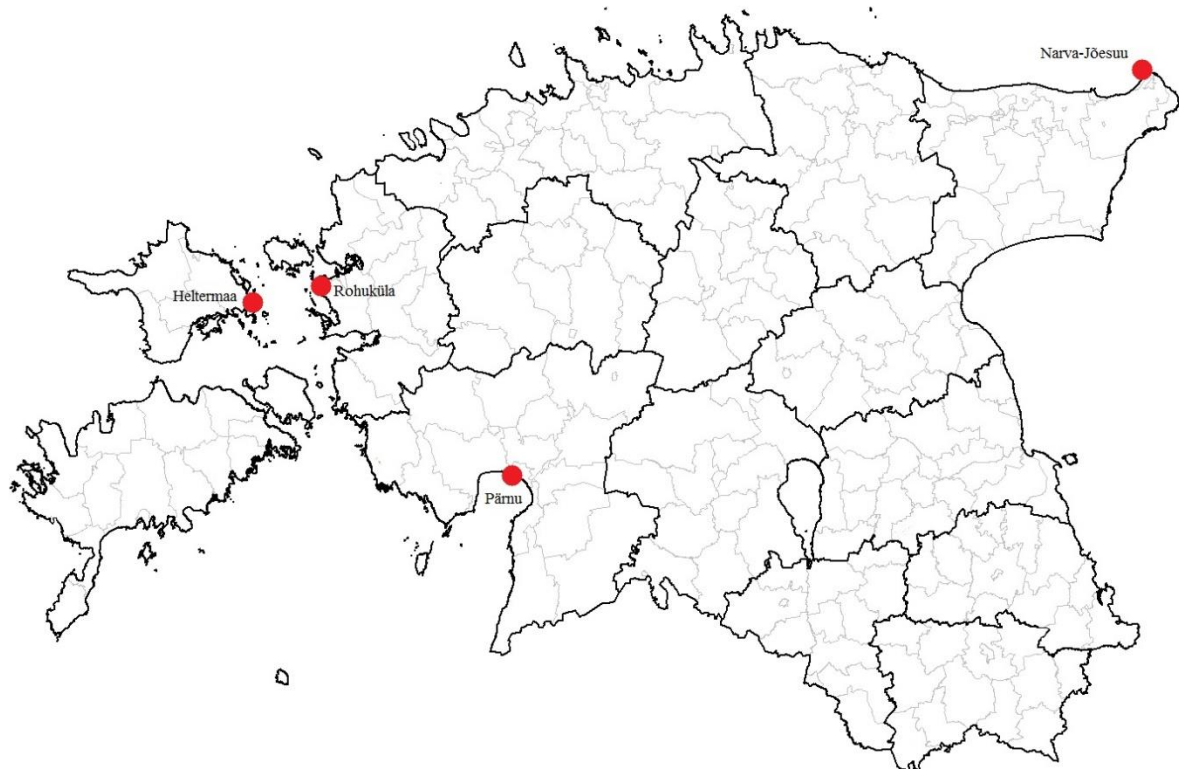
Sätitava lati pikkuseks on 115 cm. Lati alumisel otsal pöörleb poldil raudliist, mis on omakorda ühenduses tõmbevardaga. Tõmbevarras asetseb piki mõõtelatti, läbides talle kinnitatud klambreid. Jääauku laskmisel peab pöörlev raudliist asetuma piki latti ning jääkihi lõpuni jõudes liigub ta risti mõõtelatiga. Sentimeetriskaala on paigutatud nii, et nullpunkt asetseb raudliistu ülemisel serval, kui too asetseb latiga risti (Hüdrometeoroloogilise..., 1949).

Ennem jääpaksuse määramist teostatakse esmajoonel lumikatte kõrguse mõõtmine. Pärast selle lõpetamist puhastatakse raudlabidaga 1 m suurune ala lumest ning raiutakse tuuraga ümmargune auk. Auk raiutakse koonusekujuline, samaaegselt tema külgi silendades. Kui tegemist on paksema kui 50 cm jääkihiga, suurendatakse augu suurust. Pärast viimase jääkihi murdmist ja veepinnani jõudmist eemaldatakse kõik lahtised jäätükid võrguga. Augu valmides võtab vaateleja põikliistuga mõõtelati ning hoides seda püstloodis lastakse see vette ning alustatakse aeglaselt ülestõstmist, kuni on tunda, et põikliist on puudutamas jää alumist pinda. Õige asendi saavutamisel lastakse lati varrel asetsev liist alla libiseda augu ääreni ning loetakse latilt tulemust kuni 1 cm täpsusega. Seda teostatakse vähemalt neli korda, augu keskkohast neljas suunas. Esimese augu juures mõõtmiste lõpetamisel kaetakse ja märgistatakse see ära ning liigutakse 30 m eemale uue mõõtmise teostamiseks. Juhul kui kahe koha mõõtetulemused erinevad teineteisest suurel määral, võib eeldada, et ühe ala valik oli ebaõnnestunud ning tehakse ka kolmas mõõtmine (Hüdrometeoroloogilise..., 1949).

1.2 Andmed

Andmed pärinevad Eesti Riikliku Ilmateenistuse andmefondist. Kasutatud on rannikul paiknevate meteoroloogiajaamade mõõtmistulemusi perioodil 1948–2013. Kasutatud on vaid nelja jaama andmeid: Pärnu, Narva-Jõesuu, Rohuküla ja Heltermaa (joonis 1). Mõõtmised algasid igas piirkonnas novembris ja lõppesid aprillis. Iga kuu on jaotatud kolmeks osaks ehk mõõtmiste keskmine on võetud iga kümne päeva (dekaadi) põhjal. Kasutatud andmete vahemik on jaotatud kaheks, et oleks võimalik võrrelda omavahel varasemaid ja hilisemaid mõõtmistulemusi.

Andmetes on väga palju mõõtmisi, mis on märgitud nulliga. See on tingitud asjaolust, et teatud perioodidel on talved olnud pehmed ning merejääd ei ole piisavalt moodustunud, et seda oleks võimalik mõõta. Mõõtmisi viidi läbi 100-800 m kaugusel rannast, olenevalt piirkonnast ning võimalikest jääoludest. Jää paksust on võimalik mõõta, kui see on juba umbes 10 cm paks. Väiksemaid merejää paksuse väärtusi pole olnud võimalik registreerida. Teises uurimuse perioodis on kasutatud ajavahemikku kuni 1990, kuna järgnevate aastate jooksul ei ole kõigis jaamades mõõtmisi regulaarselt teostatud. Ainult Pärnus on jätkusuutlikult mõõtmised toimunud kuni tänapäevani. Viimaste aastate mõõtmised on teostatud laevade pealt. Iga aasta kohta on leitud maksimaalne ja keskmine jää paksus.



Joonis.1 Mõõtmiskohtade paiknemine.

Merejää paksuse sesoonse varieeruvuse esile toomisel on kasutatud kõigi nelja piirkonna andmeid vahemikus 1948–1990. Viimaste andmete aastaks on valitud 1990, et kõikides jaamades oleks võimalikult palju mõõtmistulemusi esindatud. Kasutatud on iga kuu dekaadide aritmeetilist keskmist, mis iseloomustab mõõdetud jääpaksuste tulemusi. Teisena on välja toodud iga kuu dekaadide mediaani väärtused, mis iseloomustavad kõikide tulemuste keskmist, mis hõlmab endas ka aastaid, kui olude sunnil ei olnud võimalik jäämõõtmisi läbi

viia või merejääd ei tekkinudki. Eraldi on tabelitena välja toodud mõlema perioodi dekaadide standardhälbed.

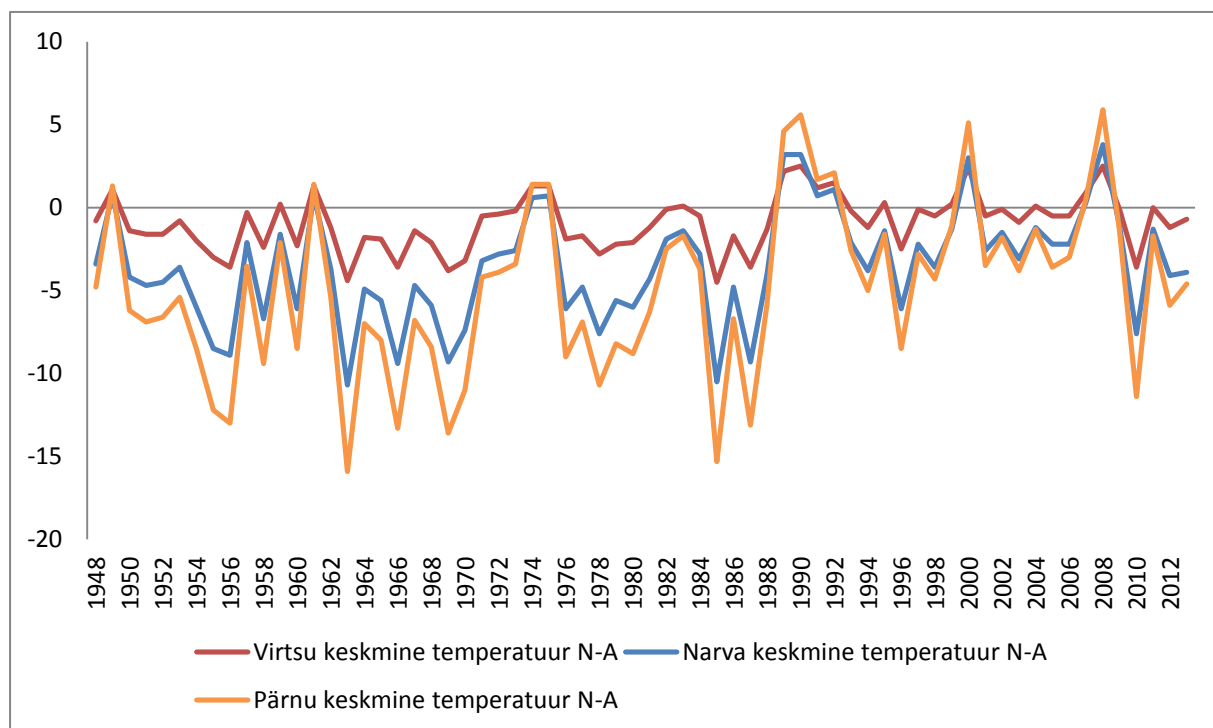
Trendianalüüsid on läbi viidud kasutades Mann-Kendalli testi. See on mitteparameetiline meetod, mis ei nõua andmete normaaljaotust. Kui testi statistiku Z absoluutväärtus on vähemalt 1,96, siis loeti trend statistiliselt oluliseks $p < 0,05$ tasemel. Trendi tõusukordaja Q ehk keskmine muutus ühe aasta kohta arvutati Sen'i meetodil. Antud töös kasutati muutuse kirjeldamiseks muutu, mis saadi korrutades tõusukordaja aegrea aastate arvuga. Erinevate jaamade kohta läbiviidud trendianalüüsid kasutasid erineva pikkusega jää paksuse aegridu: Pärnus kuni aastani 2013, Narva-Jõesuus ja Heltermaal kuni 1996 ja Rohukülas kuni aastani 1990.

Temperatuuri andmed pärinevad ilmteenistuse meteoroloogiajaamade andmebaasist ning on kasutatud kolme jaama andmeid: Pärnu, Narva ja Virtsu. Kuna Virtsu asetseb Heltermaa ja Rohuküla mõõtmiskohtade ligiduses ning nende ruumiline kaugus ei ole väga suur teineteisest, kasutati Virtsu temperatuuri andmeid mõlema jaama iseloomustamiseks. Kasutati külma poolaasta temperatuuri, mis on leitud kuue kuu (novembrist aprillini) keskmisena.

2. Tulemused

2.1 Temperatuuri muutused

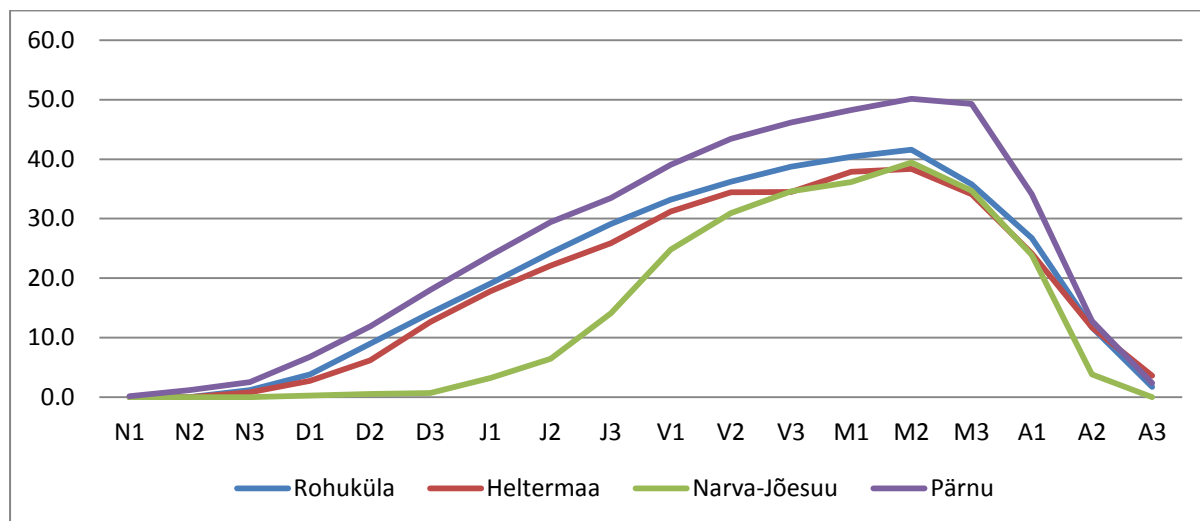
Õhutemperatuur talvel loob eeldused merejää tekkeks. Seetõttu on alguses uuritud pikaajalisi muutusi külma poolaasta temperatuurides. Keskmine õhutemperatuur perioodil 1948–2013 on püsinud negatiivsena mõõtmiste vahemikus (joonis 2). On esinenud ka üksikuid soojemaid aastaid, 1949, 1961 ja 1974–1975. Need kajastuvad koheselt ka kõigi piirkondade jääkihi paksuste mõõtmistulemustes, kus toimub järsk langus. Kuid alates 1989. aastast on toimunud muutus ning keskmine temperatuur on tõusnud püsivamalt üle nullipiiri, mis on tugevalt takistanud jääkatte tekkimist, arenemist ning kestma jäämist. Enam ei esine ka suuremaid miinuste perioode, mida võis näha varasematel aastatel 1948–1988. Peamisteks põhjusteks nende muutuste tekkimiseks võib pidada globaalset soojenemist (Johannessen ja Bergström, 2004) ja inimtegevuse kasvavat mõju ilmastiku oludele ning sellega kaasnevate ilmastiku muutuste tekkimist (Boucher *et al.*, 2004).



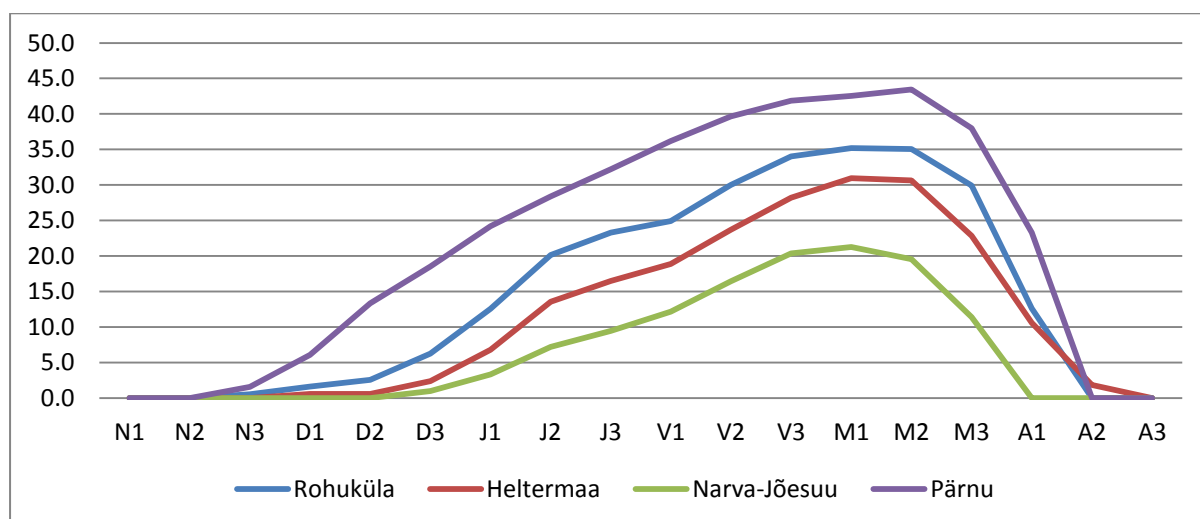
Joonis 2. Külma poolaasta (novembrist aprillini) keskmise õhutemperatuuri aegread.

2.2 Merejää paksuse sesoonne varieeruvus

Jää paksuse dünaamikast täpsema ülevaate saamiseks on esitatud kaks graafikut. Ühes on näha jäämõõtmiste tulemuste aritmeetilisi keskmisi neljas jaamas, aastatel 1948–1969 (joonis 3) ning teises vahemikus 1970–1990 (joonis 4). Mõlemal joonisel on iga kuu jaotatud kolmeks dekaadiks.



Joonis 3. Merejää paksuse keskmine sesoonne dünaamika 1948- 1969 novembrist aprillini. N - november, D - detsember. J – jaanuar, V - veebruar, M - märts, A - aprill. 1 - esimene dekaad (kümme päeva), 2 – teine dekaad, 3 - kolmas dekaad.



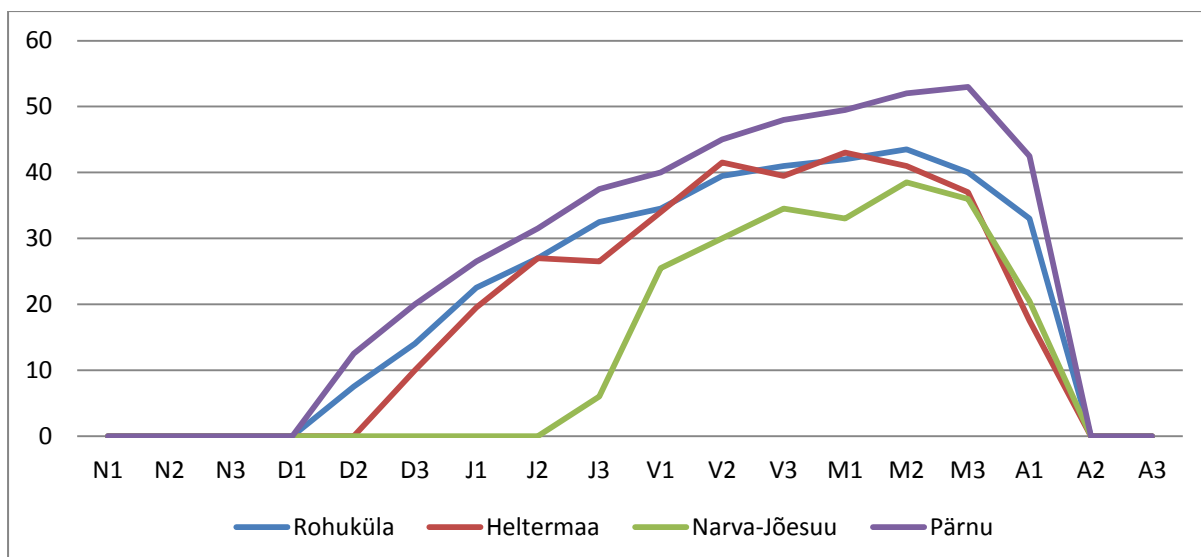
Joonis 4. Merejää paksuse keskmine sesoonne dünaamika 1970- 1990 novembrist aprillini. N - november, D - detsember. J – jaanuar, V - veebruar, M - märts, A - aprill. 1 - esimene dekaad (kümme päeva), 2 – teine dekaad, 3 - kolmas dekaad.

Kahe graafiku võrdlemisel on selgelt näha muutusi, mis on ajaga esile kerkinud. Jää tekkimise keskmine algus on nihkunud novembrist kaugemale kuu lõppu ning Heltermaal veelgi enam detsembri keskele. Erandiks on siin Narva-Jõesuu, kus jää tekkimise protsess on püsinud enam-vähem samaväärsena detsembri keskpaigus. Kõikides piirkondades on toimunud muutus keskmise jääpaksuse suhtes, eriti drastiliselt on vähenenud jääpaksuse näitajad kahe perioodi vahel Narva-Jõesuus, kus uuemad jää paksused on vähenenud poole võrra: 40 cm pealt 20 cm peale. Heltermaa keskmine jääpaksus on kahanenud 10 cm ning Pärnu ja Rohuküla 5 cm võrra.

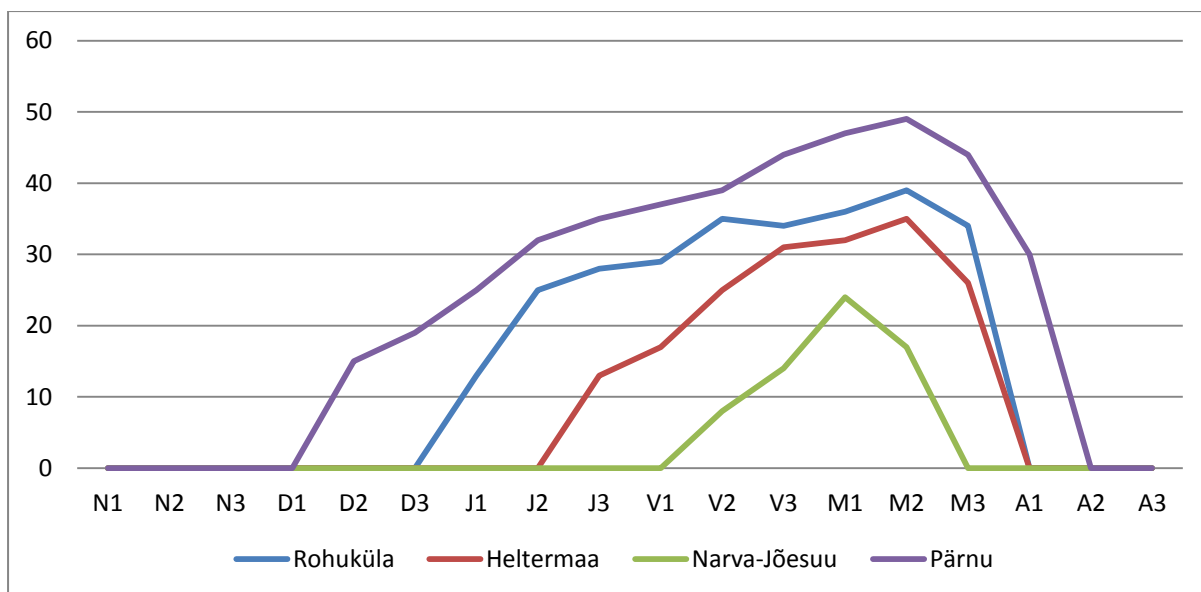
Maksimaalne jääkihi paksus jääb mõlemal juhul märtsikuusse, kuid erinevuseks on siin see, et teisel perioodil on maksimum märtsi esimesel dekaadil, varasemate andmete põhjal aga teisel dekaadil, välja arvatud Pärnu, kus on ka teisel perioodil püsinud maksimaalne jääkiht märtsikuu teisel dekaadil. Sellest tingitult on jää sulamise algus nihkunud varasemaks. Suur muutus on toimunud ka jääkihi täielikus sulamises, mis on liikunud aprilli lõpust aprilli algusesse. Kõigi nende muutuste tõttu on talve tulek hilisemaks lükkunud ning kevade saabumine varasem.

Terve aegrea jooksul on esinenud aastaid, kus ei ole üldse moodustunud jääkihti, erandiks on siinkohal Pärnu, kus vaatamata soojematele aastatele on alati talvel moodustunud jääkate. Rohuküla on olnud täielikult jäävaba ühel aastal, 1949. Heltermaa ning Narva-Jõesuu on kõige arvukamate jäävabade aastatega, kummalgi neli korda. Heltermaal aastatel 1953, 1975, 1989, 1990 ja Narva-Jõesuul 1961, 1974, 1989 ja 1990. Tihedamini on olukordi, kus jää küll moodustub, kuid seda väga õhukesel määral ning lühiajaliselt. Nende olukordade poolest on kõige tihedamini esile kerkinud Narva-Jõesuu.

Mediaani kasutades on välja toodud nelja piirkonna mõõtmistulemused samadel perioodidel 1948–1969 (joonis 5) ja 1970–1990 (joonis 6). Mediaani kasutades on joonistesse paremini kaasa haaratud need tulemused, kus ei olnud tekkinud piisavalt merejääd, et neid mõõtmistulemustesse kirja oleks saanud panna.



Joonis 5. Merejää paksuse sesoonse dünaamika mediaanid 1948–1969 novembrist aprillini. N – november, D – detsember. J – jaanuar, V – veebruar, M – märts, A – aprill. 1 – esimene dekaad (kümme päeva), 2 – teine dekaad, 3 – kolmas dekaad.



Joonis 6. Merejää paksuse sesoonse dünaamika mediaanid 1970–1990 novembrist aprillini. N – november, D – detsember. J – jaanuar, V – veebruar, M – märts, A – aprill. 1 – esimene dekaad (kümme päeva), 2 – teine dekaad, 3 – kolmas dekaad.

Mediaani graafikute võrdlemisel tulevad kahe perioodi vahelised erinevused väga selgelt välja. Tugevalt on muutunud jää tekkimise alguse ajad, kus Rohukülas on see lükkunud detsembri algusest detsembri lõppu. Heltermaal on varasemalt jääkihi tekkimine alguse saanud detsembri keskel, kuid tänapäeval on see liikunud terve kuu võrra kaugemale jaanuari keskele. Kõige hilisemaks jäätekkimise kohaks on Narva-Jõesuu, kus see algab alles veebruari alguses. Samuti on mõõtmiskohtades kiiremini saabunud aeg, kui kogu jää on ära sulanud. Selle tulemusel on muutunud lühemaks aeg, kus jää merd katab., vähendades kaitsetoimet talviste tormide eest ning tuues kaasa kohaliku ilmastiku muutusi. Ainsaks erandiks on mediaani kasutades Pärnu, kus jää tekkimise algus ja lõplik sulamine on püsinud samal tasemel. Kõigis mõõtmiskohtades on vähenenud keskmise jääpaksuse väärtused. Heltermaal, Pärnus ja Rohukülas on jääpaksus vähenenud 5 cm võrra, Narva-Jõesuul on vähenemine kõige suurem, ligikaudu 15 cm. Muutus on toimunud ka maksimaalse jääpaksuse saavutamise ajas. See on kõigis mõõtmiskohtades liikunud ühe dekaadi võrra varasemaks.

2.3 Jää paksuse aastatevaheline varieeruvus

Esimesel perioodil (tabel 1) on näha, kuidas Rohuküla, Heltermaa ja Narva-Jõesuu novembri esimesed kaks dekaadi on möödunud väga sarnaselt terves aegreas, Pärnus on tekkinud väike standardhälve, mis viitab mõnele üksikule aastale, kus jää formeerumine on toimunud varem. Iseäralik on talve lõpp aprilli viimasel dekaadil, kus standardhälve on arvestatav, see viitab taaskord mõnele aastale, kus lõplik jääsulamine on olnud hilisem kui tavaliselt. Talve keskel on standardhälve erinevused üpriski suured, seda on esile toonud aastad, kus täielikult puudus või esines minimaalsel määral merejääd. Kuid nagu eelnevate graafikute põhjal võis näha, oli sellel perioodil keskmine jääpaksus suurem, mille tõttu on standardhälve suur.

1948-1969	N1	N2	N3	D1	D2	D3
Rohuküla	0.0	0.0	3.9	7.0	10.4	10.8
Heltermaa	0.0	0.0	3.8	8.0	12.3	14.7
Narva-Jõesuu	0.0	0.0	0.0	1.5	2.8	3.4
Pärnu	0.9	3.2	6.0	9.2	11.9	11.5
	J1	J2	J3	V1	V2	V3
Rohuküla	12.3	12.6	12.8	14.0	16.5	16.2
Heltermaa	15.7	17.0	18.7	20.1	21.0	21.4
Narva-Jõesuu	7.6	10.8	16.6	19.4	21.6	20.8
Pärnu	11.6	12.3	12.1	12.1	12.0	12.7
	M1	M2	M3	A1	A2	A3
Rohuküla	16.0	16.3	21.8	24.5	20.3	8.1
Heltermaa	20.5	20.5	23.1	25.3	19.9	9.9
Narva-Jõesuu	20.8	20.6	25.5	25.9	14.3	0.0
Pärnu	14.2	14.6	15.1	25.4	21.6	7.8

Tabel 1. Jääpaksuse standardhälve 1948–1969. N – november, D – detsember. J – jaanuar, V – veebruar, M – märts, A – aprill. 1 – esimene dekaad (kümme päeva), 2 – teine dekaad, 3 – kolmas dekaad.

Teise perioodi tabelit (tabel 2) vaadates on näha, et sarnaselt esimesele (tabel 1) on talve algus möödunud väga ühtlaselt kõigis piirkondades. Kahe tabeli vahel on silmapaistvalt kaks erinevust. Esiteks on hilisemal ajaperioodil talve lõpp palju ühtlasem kui varasemate aastate oma, mis viitab kiiremale jääkatte kadumisele. Erandiks on siin Pärnu, mis eelnevate graafikute põhjal on ajaperioodidel läbinud kõige väiksemad muutused. Märkimisväärne on siin terve tabeli vältel kehtivad madalamad standardhälve väärtused. See näitab, et maksimaalse

jääpaksuse näidud on võrreldes varasemaga palju väiksemad ning tihedamalt on esindatud puuduva või väga õhukese jääkattega aastad.

1970-1990	N1	N2	N3	D1	D2	D3
Rohuküla	0.0	0.0	2.4	5.4	6.7	10.6
Heltermaa	0.0	0.0	0.0	2.6	2.6	7.5
Narva-Jõesuu	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0
Pärnu	0.0	0.0	5.0	9.0	11.1	11.6
	J1	J2	J3	V1	V2	V3
Rohuküla	12.4	14.6	16.4	17.7	17.5	16.7
Heltermaa	10.8	15.5	17.1	19.6	19.2	19.0
Narva-Jõesuu	3.3	7.2	9.5	12.1	16.4	20.4
Pärnu	12.5	13.5	14.3	15.8	16.4	16.6
	M1	M2	M3	A1	A2	A3
Rohuküla	16.3	17.3	19.3	18.7	0.0	0.0
Heltermaa	16.8	17.3	21.6	17.9	8.5	0.0
Narva-Jõesuu	21.3	19.6	11.4	0.0	0.0	0.0
Pärnu	16.7	17.4	19.1	24.2	16.6	5.7

Tabel 2. Jääpaksuse standardhälve 1970–1990. *N* – november, *D* – detsember. *J* – jaanuar, *V* – veebruar, *M* – märts, *A* – aprill. 1 – esimene dekaad (kümme päeva), 2 – teine dekaad, 3 – kolmas dekaad.

2.4 Trendianalüüs

Trendide väljaselgitamiseks on kasutusse võetud Mann-Kendalli test. Kuna jaamade mõõtmistulemuste hulk on olnud erinev, ei olnud võimalik analüüsi läbi viia kõigile võrdsel ajalisel skaalal.

Rohuküla analüüs (tabel 3) on tehtud vahemikus 1948–1990 ning vajalikud mõõtmistulemused olid olemas detsembri kolmandast kuni veebruari teise dekaadini. Statistiliselt olulist muutust sellel perioodil ei esinenud, kuid selgelt on välja loetav jääkihi vähenemise tendents kõigis dekaadides. Kõige rohkem on jää paksuse vähenemist toimunud veebruari alguses ning märtsi alguses. Maksimaalne jääpaksus on ajavahemikus vähenenud üle 10 cm.

Rohuküla						
1948-1990	D3	J1	J2	J3	V1	V2
Z	-1.736	-1.510	-0.725	-0.988	-1.647	-1.374
Q	0.000	-0.136	-0.100	-0.167	-0.333	-0.269
Muut	0.0	-5.9	-4.3	-7.2	-14.3	-11.6
	V3	M1	M2	M3	A1	Max
Z	-1.059	-1.279	-1.385	-1.255	-1.756	-1.658
Q	-0.172	-0.250	-0.238	-0.200	0.000	-0.250
Muut	-7.4	-10.8	-10.2	-8.6	0.0	-10.8

Tabel 3. Mann-Kendalli test statistikud ja muudud trendi järgi Rohuküla keskmiste jääpaksuste ja maksimaalse jääpaksuse kohta perioodil 1948–1990. Z – testi statistik, Q – muutus ühes aastas, Muut – ajavahemiku kogu muutus. D – detsember, J – jaanuar, V – veebruar, 1 – esimene dekaad, 2 – teine dekaad, 3 – kolmas dekaad.

Heltermaa mõõtmistulemusi on olnud rohkem võrreldes Rohukülaga, seetõttu on analüüs tehtud perioodiks 1948–1996 (tabel 4) jaanuari teisest dekaadist kuni märtsi kolmanda dekaadini. Analüüsist selgus kõigis mõõtmisdekaadides oluline statistiline trend jää paksuse vähenemisele. Statistiliste trendide olulisuse rohkus viitab tugevatele muutustele Heltermaa jääoludes. Kõige suuremad muutused on toimunud veebruari esimese ja teise dekaadi jooksul ning terve märtsi ulatuses. Maksimaalne jääpaksus on kahanenud üle 20 cm.

Heltermaa					
1948-1996	J2	J3	V1	V2	V3
Z	-2.250	-2.344	-2.446	-2.328	-1.633
Q	-0.106	-0.209	-0.377	-0.448	-0.203
Muut	-5.2	-10.2	-18.5	-22.0	-9.9
	M1	M2	M3	Max	
Z	-2.114	-2.031	-2.492	-2.507	
Q	-0.381	-0.293	-0.410	-0.438	
Muut	-18.7	-14.4	-20.1	-21.5	

Tabel 4. Mann-Kendalli test statistikud ja muudud trendi järgi Heltermaa keskmiste jääpaksuste ja maksimaalse jääpaksuse kohta perioodil 1948–1996. Z – testi statistik, Q – muutus ühes aastas, Muut – ajavahemiku kogu muutus. D – detsember, J – jaanuar, V – veebruar, 1 – esimene dekaad, 2 – teine dekaad, 3 – kolmas dekaad. Statistiliselt olulised trendid $p < 0,05$ tasemel on jämedas kirjas.

Narva-Jõesuu kohta on analüüs tehtud samuti vahemikus 1948–1996. Siin piirkonnas on kõige vähem vajalikke mõõtmistulemusi, sest meri jäätab hilja. Seetõttu on trendianalüüsi tehtud ainult veebruari esimesest dekaadist kuni märtsi teise dekaadini (tabel 5). Narva-

Jõesuul ilmnes samuti olulisi trende, kõige tugevamalt märtsi keskel. Selle tulemusel on antud piirkonnas jää lõpliku sulamise aeg saabunud veelgi varem. Külma poolaasta soojenemine on kaasa toonud tugeva jääkihi vähenemise ning maksimaalse jääpaksuse vähendamise üle 27 cm.

		Narva-Jõesuu				
1948-1996	V1	V2	V3	M1	M2	Max
Z	-1.762	-2.037	-1.926	-1.768	-3.154	-2.618
Q	-0.014	-0.276	-0.360	-0.350	-0.649	-0.568
Muut	-0.7	-13.5	-17.6	-17.2	-31.8	-27.8

Tabel 5. Mann-Kendalli test statistikud ja muudud trendi järgi Narva-Jõesuu keskmiste jääpaksuste ja maksimaalse jääpaksuse kohta perioodil 1948–1996. Z – testi statistik, Q – muutus ühes aastas, Muut – ajavahemiku kogu muutus. D – detsember, J – jaanuar, V – veebruar, 1 – esimene dekaad, 2 – teine dekaad, 3 – kolmas dekaad. Statistiliselt olulised trendid $p < 0,05$ tasemel on jämedas kirjas.

Kõige pikema perioodi kohta sai trendianalüüsi teostada Pärnu andmetel, kuna seal on püsivalt mõõtmistulemusi tehtud kuni tänapäevani. Analüüs (tabel 6) on tehtud vahemikus 1948–2013 detsembri kolmandas dekaadist kuni märtsi kolmanda dekaadini. Analüüs ühtegi olulist statistilist trendi välja ei toonud, kuid jällegi on selgelt näha jääpaksuse vähenemise tendents. Kõige intensiivsemad muutused on toimunud jaanuari keskel ning märtsi alguses. Maksimaalne jääpaksus on vähenenud üle 9 cm. Võrreldes teiste piirkondadega on Pärnus toimunud kõige väiksemahulisemad muutused.

		Pärnu				
1948-2013	D3	J1	J2	J3	V1	V2
Z	-0.468	-1.261	-1.842	-1.474	-0.970	-1.030
Q	0.000	-0.095	-0.154	-0.140	-0.091	-0.106
Muut	0.0	-6.3	-10.2	-9.2	-6.0	-7.0
	V3	M1	M2	M3	Max	Max
Z	-1.091	-1.219	-1.547	-1.802	-1.645	-1.645
Q	-0.114	-0.125	-0.167	-0.196	-0.143	-0.143
Muut	-7.5	-8.3	-11.0	-13.0	-9.4	-9.4

Tabel 5. Mann-Kendalli test statistikud ja muudud trendi järgi Narva-Jõesuu keskmiste jääpaksuste ja maksimaalse jääpaksuse kohta perioodil 1948–1996. Z – testi statistik, Q – muutus ühes aastas, Muut – ajavahemiku kogu muutus. D – detsember, J – jaanuar, V – veebruar, 1 – esimene dekaad, 2 – teine dekaad, 3 – kolmas dekaad.

3. Kokkuvõte

Merejää mängib olulist rolli nii Eesti ja lähiumbruskonna ilmastikule, majandusele kui ka inimtegevusele. Sellepärast on oluline jälgida, milliseid muutusi on kaasa toonud globaalse soojenemisega kaasnenud temperatuuri tõus merejää tekkimisele ja dünaamikale. Selle töö peamiseks eesmärgiks oli uurida merejää sesoonset ja aastevahelist muutlikkust ning pikaajalisi trende Eesti rannikujaamade andmetel.

Alates 1989. aastast on külma poolaasta keskmine temperatuur tõusnud püsivalt üle nulli piiri, mis tugevalt takistab jääkatte tekkimist. Merejää sesoonsete erinevuste väljaselgitamiseks kasutati merejää keskmisi väärtusi ning mediaani dekaadide kaupa kahel erineval perioodil: 1948–1969 ja 1970–1990. Mõlemad graafikud viitasid merejää hilisemale tekkimisele teisel perioodil. Aritmeetilisi keskmisi kasutades on esimesed merejää paksuse mõõtmised nihkunud dekaadi võrra kaugemale kõigis jaamades välja arvatud Narva-Jõesuul, kus see on püsinud stabiilsena. Mediaani vaadates on aga need nihkumised olnud veelgi suuremad. Kõige ekstreemsemal juhtumil on Heltermaal jäätekk algus lükkunud edasi kahe dekaadi võrra jaanuari keskelt veebruari algusesse. Erinevuseks võib siin välja tuua Pärnu piirkonna stabiilsuse. Selle erinevuse põhjuseks on mediaani sisse arvestatud null-mõõtmistulemused, mis on aritmeetiliste keskmiste arvutamisega võrreldes suurema olulisusega. Muutunud on ka jää täieliku sulamise aeg, mis on liikunud Narva-Jõesuul kahe dekaadi ning Heltermaal ning Rohukülas ühe dekaadi võrra varasemaks.

Mann-Kendalli testi kasutades oli võimalik välja selgitada järjepidev tendents jääkihi vähenemisele kõikides mõõtmisjaamades. Kõige tugevamalt on see toimunud Narva-Jõesuul ning Heltermaal, kus esinesid statistiliselt olulised trendid. Kõige vähem on see mõjutanud Pärnu piirkonda, kus endiselt on tekkimas igaaastane jääkiht, kuid teistes piirkondades võib see juba lähitulevikus olla aina harvem.

Lõpetuseks sooviksin tänada töö juhendajat prof. Jaak Jaagust minu abistamisel lõputöö tegemisel.

Kasutatud kirjandus

Boucher, O., Myhre, G., Myhre, A., 2004. Direct human influence of irrigation on atmospheric water vapour and climate. *Climate Dynamics*, 6-7: 597-603.

Hüdrometeoroloogilise teenistuse peavalitsus, 1949. Jää vaatlused mere vaatluspostidel. Leningrad: Hüdrometeoroloogiline Kirjastus.

Jaagus, J., 2006. Trends in sea ice condition in the Baltic Sea near the Estonian coast during the period 1949/1959 – 2003/2004 and their relationships to large-scale atmospheric circulation. *Boreal Environment Research*, 11: 169-183.

Jevrejeva, S., 2000. Long-term variability of sea ice and air temperature conditions along the Estonian coast. *Geophysica*, 36: 17–30.

Jevrejeva, S., Moore, C., J., Grinsted, A., 2003. Influence of the Arctic Oscillation and El Niño-Southern Oscillation (ENSO) on ice conditions in the Baltic Sea: The wavelet approach. *Journal of Geophysical Research*, 108.

Johannessen, M. O., Bengtsson, L., 2004. Arctic climate change: observed and modelled temperature and sea-ice variability. *Tellus A*, 56: 328-341

Koslovski, G., Glaser, R., 1999. Variations in reconstructed ice winter severity In the western Baltic from 1501-1995, and their implications for the North Atlantic oscillation. *Climate Change*, 41: 175-191.

Lepy, E., 2012. Baltic Sea ice and environmental and societal implications from the comparative analysis of the Bay of Bothnia and the Gulf of Riga. *Fennia International Journal of Geography*, 190: 90-101.

Mardiste, H., 1999. Ice conditions in the Väinameri and their influence on the traffic between West-Estonian islands and the mainland. *Publicationes Instituti Geographici Universitatis Tartuensis*, 84: 37-42.

Omstedt, A., Chen, D., 2001. Influence of atmospheric circulation on the maximum ice extent in the Baltic Sea. *Journal of Geophysical Research*, 106: 4493-4500.

Orviku, K., Jaagus, J., Kont, A., Ratas, U., Ravis, R., 2003, Increasing activity of coastal processes associated with climate change in Estonia. *Journal of Coastal Research*, 19: 364-375.

Orviku, K., Jaagus, J., Tõnisson, H., 2011. Sea ice shaping the shores. *Journal of Coastal Research*, 64: 681-685.

Sooäär, J., Jaagus, J., 2007. Long-term changes in the sea ice regime in the Baltic sea near the Estonian coast. *Proc. Estonian Acad. Sci.*, 13:189-200.

Tooming, H., Keevallik, S., 2001. Relationships among the ice extent on the Baltic Sea, the snow cover in surrounding areas, and the temperature, In *Proc. Third Study Conference on BALTEX*. 2001. International BALTEX Secretariat, 20: 229–230.

Tõnisson, H., Orviku, K., Jaagus, J., Suusaar, Ü., Kont, A., Ravis, R., 2008. Coastal damages on Saaremaa Island, Estonia, caused by the extreme storm and flooding on January 9. *Journal of Coastal Research*, 24: 602-614.

Vahter, R., 1994. Tallinna ja Muuga lahe jääolud. *Eesti Geograafia Seltsi aastaraamat*, 26: 19-31.

Vinje, T., 2001. Anomalies and Trends of Sea-Ice Extent and Atmospheric Circulation in the Nordic Seas during the Period 1864-1998. *J. Climate*, 14: 255-267.

Weather Underground, Arctic Sea Ice Decline, 2015.

www.wunderground.com/climate/SeaIce.asp#impacts (26.04.2015)

The variability of sea ice thickness on Estonian coast

Kristjan Mahla

Summary

The dynamics and regimes of sea ice play an important role in Estonia's climate, wildlife, economy and human activities. The main goals of this paper are to analyse the time-spatial variability and find long-term trends in the thickness of Estonia's coastal sea ice.

Sea ice thickness data was gathered from Eesti Riiklik Ilmateenistus databases from 1948 to 2013. The data has been taken from four observation stations: Pärnu, Narva-Jõesuu, Heltermaa and Rohuküla. Observations started in November and ended in April. Every month is divided into three decades. The timeframe has been divided into two periods, 1949-1969 and 1970-1990, to compare the before and after results.

Observation data was used to calculate the arithmetical mean of sea ice thickness by decade, to see how the formation and melting of sea ice has changed during the two periods. Secondly the median of each month's decades was used. This incorporated the observations that were marked as zero. Standard deviation is brought out separately in tables for more detailed analysis. Trend analysis was done by Mann-Kendall test.

The temperature data was taken from The National Meteorology Institute weatherstation databases in Pärnu, Narva and Virtsu.

Since 1989 the mean temperature in winter has continually risen over the freezing point, which has severely hindered the forming of sea ice.

The arithmetical mean graphs clearly show that sea ice has started to form a decade later than previously with the exception of Narva-Jõesuu which has stayed stable. Median graphs show an even greater change with the highest values in Heltermaa where the formation of ice has moved 2 decades. Here the exception is Pärnu, where everything has remained stable. This is due to the additional factor of the zero value observations. There has also been a change in the total melting point of sea ice. The ice in Narva-Jõesuu has completely melted two decades sooner than before and in Heltermaa and Rohuküla a decade earlier.

Mann-Kendall test analysis showed a clear tendency of ice thickness shrinking in all observation points. The most severe cases were found in Narva-Jõesuu and Heltermaa, were statisti-

cally important trends were noted. Least effected was Pärnu, were every year ice is still forming, but for the other locations it may soon be a rare occasion.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Kristjan Mahla

(autori nimi)

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Merejää paksuse muutlikkus Eesti rannikul

(lõputöö pealkiri)

mille juhendaja on Jaak Jaagus,

(juhendaja nimi)

- 1.1. reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
 3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, 24.05.2015