

**TARTU ÜLIKOOL
FÜÜSIKA INSTITUUT**

**PUBLICATIONES GEOPHYSICALES
UNIVERSITATIS TARTUENSIS**

51

Tartu Ülikooli Ilmade Observatooriumi
150. aastapäeva
konverentside artiklid

Tartu 2016

PUBLICATIONES GEOPHYSICALES
UNIVERSITATIS TARTUENSIS

51

UNIVERSITY OF TARTU
INSTITUTE OF PHYSICS

PUBLICATIONES GEOPHYSICALES
UNIVERSITATIS TARTUENSIS

51

Articles of the conferences dedicated to the 150th anniversary
of Meteorological Observatory
of University of Tartu

Editors Piia Post, Arvo Järvet and Erki Tammiksaar

Tartu 2016

TARTU ÜLIKOOL
FÜÜSIKA INSTITUUT

PUBLICATIONES GEOPHYSICALES
UNIVERSITATIS TARTUENSIS

51

Tartu Ülikooli Ilmade Observatooriumi 150. aastapäeva
konverentside artiklid

Toimetajad Piia Post, Arvo Järvet ja Erki Tammiksaar

Tartu 2016

Väljaandja/Publisher:
Tartu Ülikooli füüsika instituut
W.Ostwaldi 1, 50411 Tartu
Eesti/Estonia

Toimetuskolleegium/Editorial Advisory board:
Piia Post, Arvo Järvet, Erki Tammiksaar

Toimetajad/Editors:
Piia Post, Arvo Järvet, Erki Tammiksaar
piia.post@ut.ee, arvo.jarvet@ut.ee, erki.tammiksaar@ut.ee

Tehniline toimetaja/Technical editor:
Ludmilla Krusta

Kaanefoto/Cover photo:
Jaak Kikas

Kogumik on välja antud TÜ rektori rahalisel toel
The volume is published using the financial help
of the rector of the university

© Tartu Ülikooli füüsika instituut, 2016

ISSN 1736-4159
ISBN 978-9949-77-309-1

Tartu Ülikooli Kirjastus
www.tyk.ee

Sisukord

Saateks	7
Mait Sepp ja Piia Post METOBS 150 – aasta täis ilmteadust.....	8
Ain Kallis Tartu Ülikooli Metobsi asukohtadest	20
Janet Laidla Tallinna Mereobservatoorium	31
Mart Humal Arthur von Oettingen ja paljuheliilised häälestussüsteemid.....	39
Taavi Pae ja Erki Tammiksaar August Tõllassepp – Eesti esimesi meteorolooge.....	49
Tiina Tammets Eesti meteoroloogilise digitaalse andmebaasi ja andmetöötuse ajaloost.....	61
Tõnu Viik Kuidas Eesti sai EUMETSATi, ECMWF ja HIRLAMi liikmeks.....	72
Enn Kaup ja Jüri Ivask Eestlaste osalusest meteoroloogilistel uuringutel Antarktikas ning kliimamuutustest lõunapolaarpiirkonnas.....	78
Jaak Jaagus ja Mait Sepp Eesti kliima trendid ja režiimihked	88
Velle Toll Atmosfääri aerosooli otsene kiirguslik mõju meteoroloogilistele tingimustele Euroopas.....	101
Kalju Eerme, Margit Aun ja Uno Veismann Kuue keskpäevase tunni panus integraalse ja ultraviolettkiirguse päevaenergiasse Tõraveres aprillist augustini.....	109
Martin Mäll, Ryota Nakamura, Tomoya Shibayama, Ülo Suursaar ja Ain Kull Tulevikutormide simuleerimine, kasutades atmosfääri- (WRF) ja ookeanimudelit (FVCOM) 2005. aasta jaanuaritormi (Gudrun) näitel.....	119
Jüri Kadaja ja Triin Saue Eesti ilmastik ja kartuli veega varustus: nii puudu kui liiast	131
Triin Saue, Jüri Kadaja, Peeter Viil ja Karin Käremaa Põllukultuuride soojusega varustatuse ja kasvuperioodi muutused Eestis kliima soojenemisel	141
Artu Ellmann, Tõnis Oja, Tarmo All, Harli Jürgenson, Tarmo Kall ja Aive Liibusk Raskuskiirenduse anomaalvälja ja geoidi mudelpinna täpsustamine Eestis.....	152

Contents

Mait Sepp and Piia Post METOBS 150 – a year full of weather science.....	19
Ain Kallis Different locations of the Tartu University Meteorological Observatory	30
Janet Laidla Tallinn Naval Observatory.....	38
Mart Humal Arthur von Oettingen and Multiple Divisions of the Octave	48
Taavi Pae and Erki Tammiksaar August Tõllassepp – one of the first Estonian meteorologists.....	60
Tiina Tammets About the history of Estonian digital meteorological databases and data processing	71
Tõnu Viik How Estonia joined ECMWF, EUMETSAT and HIRLAM	77
Enn Kaup and Jüri Ivask On participation of Estonians in Antarctic meteorological research and on climate change in Antarctica	87
Jaak Jaagus and Mait Sepp Trends and regime shifts in the Estonian climate	100
Velle Toll Direct radiative impacts of atmospheric aerosols on meteorological conditions over Europe.....	107
Kalju Eerme, Margit Aun and Uno Veismann Contribution of noon hours to daily broadband and ultraviolet radiation energy at Tõravere, Estonia during April to August	118
Martin Mäll, Ryota Nakamura, Tomoya Shibayama, Ülo Suursaar and Ain Kull Modelling storm surge conditions under future climate scenarios: A case study of 2005 January storm Gudrun in Pärnu, Estonia	130
Jüri Kadaja and Triin Saue Estonian climate and water supply for potato crop: deficit as well as excess.....	140
Triin Saue, Jüri Kadaja, Peeter Viil and Karin Käremaa Changes in the thermal growing season due to climate change in Estonia.....	151
Artu Ellmann, Tõnis Oja, Tarmo All, Harli Jürgenson, Tarmo Kall and Aive Liibusk Enhanced gravity field and geoid models over Estonia.....	164

Saateks

Ehkki meteoroloogilisi vaatlusi oli Eesti alal läbi viidud juba oluliselt varem, algasid 2. detsembril 1865. aastal Tartu ülikooli geofüüsika professori juhataja Arthur Joachim von Oettingeni juhtimisel katkematud vaatlused. Vaatlustest olulisemgi on aga, et Oettingeni käima lükatud ilmajaam kujunes juba kümne aastaga keskseks Eesti ja Läti alal ilma uurivaks institutsiooniks. Ehkki ametlikult võeti meteoroloogia observatoorium (Metobs) ülikooli allasutuste nimekirja alles 1876. aastal, peetakse eelpoolmainitud kuupäeva Metobsi asutamise ajaks ning eesti professionaalse meteoroloogia sünnipäevaks.

Teie käes olevasse kogumikku on koondatud 7 artiklit ettekannetest Metobsi 150. aastapäeva tähistamiselt praeguses Tiigi Seltsimajas (Tiigi 11), hoones, kus kunagi viidi läbi esimesed ilmavaatlused Vene impeeriumis kehtiva ühtse standardi järgi. Viimased 7 artiklit pärinevad Tõraveres Tartu Observatooriumis toimunud geofüüsikapäeva ettekannetest. Lisaks konverentsidele toimus Metobs 150 aasta raames rida teisi sündmusi, eesmärgiga populariseerida meteoroloogiat. Ülevaate neist annavad Mait Sepp ja Piia Post kogumiku avaartiklis. Kõikide sündmuste ajakava koos viidetega leiab Metobs 150 kodulehelt (<https://sisu.ut.ee/metobs150>).

Aastatel 1924–1940 oli Tartu ülikooli Metobs Eesti Vabariigi meteoroloogia keskasutus, kust hallati jaamade võrku, koostati ilmaprognoose ning tehti rahvusvahelisel tasemel ilmastiku- ja kliimauuringuid. Ka tol ajal oli levinud arusaam, et riigi ilmakekus võib ja peab paiknema Tallinnas, sellest kirjutatavad nii Taavi Pae ja Erki Tammiksaar originaalses uurimuses August Tõllasepast, kui ka Janet Laidla oma Tallinna Mereobservatooriumi mõnekuist ajalugu käsitlevas kirjatükis. Ain Kallis kirjeldab põhjalikult Metobsi erinevaid asukohti Tartus Toomemäe ümbruses. Tiina Tammets ja Tõnu Viik on üles kirjutanud iseseisva ilmateenistuse rajamise valudest ja rõõmudest pärast Eesti taasiseseisvumist, sest nõukogude ajal oli ilmateenistus kui strateegilise info koguja range poliitilise kontrolli all üleliiduline asutus keskusega Moskvas. Tuntud polaaruurija Enn Kaup koos Jüri Ivaskiga on aga kokku võtnud eestlaste osalused Antarktika ekspeditsioonidel. Füüsikaproffessor Arthur von Oettingeni talendi muusikateoreetilist tahku avab Mart Humala artikkel paljuhelistest häälestussüsteemist.

Geofüüsikapäeva ettekanded on Eesti kliima trendidest ja režiimihetetest, ilma ja rannikumere modelleerimisest, UV-kiirguse klimatoloogiast, agrometeoroloogiast ning geodeesiast. Heameel on, et just noorteadlased väärtustavad oma teadustulemuste publitseerimist käesolevas eestikeelses juubelikogumikus.

Toimub põlvkondade vahetus eesti geofüüsikas. Nii globaalse kui ka kohaliku kliimamuutuse järjekindel arvutaja ja mõtestaja Olavi Kärner Tartu Observatooriumist esines konverentsil veel stendiettekandega „Ühest lihtsast õhutemperatuuri muutlikkuse mudelist“. Siia kogumikku tema artikkel enam ei jõudnud: ta lahkus igavikku 25. märtsil k.a. Olgu ta tänatud oma originaalsete mõttekäikude eest, loodetavasti kasvab peale heade matemaatikaoskustega kliimateadlasi, kes neid ideid sama lihtsasti mõistavad.

Kogumikus esitatud andmete õigsuse eest vastutavad autorid. Nende kirjutamise stiil on muutmata. Parandatud on vaid ilmseid keelelisi vääratusi ja sisulisi eksimusi. Suur tänu Karin Tuvikesele ja Ludmilla Krustale suure töö eest kogumiku tehnilisel toimetamisel.

Head lugemist!

Toimetajad

METOBS 150 – aasta täis ilmateadust

Mait Sepp ja Piia Post
Tartu Ülikool

1. Sissejuhatus

Vähesed maad ja rahvad saavad öelda, et neil on 150 aastat professionaalselt ning järjepidavalt ilmavaatlusi tehtud. Ent vaevalt oskas 1865. aasta 2. detsembril oma majas meteoroloogilisi vaatlusi alustanud Tartu Ülikooli füüsikakateedri juhataja Arthur Joachim von Oettingen arvata, et lihtsast termomeetri vaatamisest ja vihmamõõtmisest areneb pooleteist sajandiga välja hulga teadusharusid, milliste haare ulatub hobimeteoroloogiast kosmosesse ning matemaatiliste mudelite maailma. Seetõttu ei saanud sellist Eesti ilmateaduse seisukohalt märgilise tähtsusega juubelit tähistada vaid paari piduliku kõne või lihtsa tordisõõmisega. Nii korraldasid Tartu Ülikooli füüsika instituudi atmosfääri- ja keskkonnafüüsika laborid ning ökoloogia ja maateaduste instituudi geograafia osakond, Tartu Observatoorium, Keskkonnaagentuur, Eesti Loodusuurijate Seltsi Jõgeva ilmahuvikeskus ning ilm.ee 2015. aastal sündmuste sarja, mille ühisnimetajaks oli METOBS 150.

Muidugi võib ja peabki Eesti ilmateaduste kuulsusrikka mineviku üle uhkust tundma, kuid tegemist on tänapäeval kiiresti areneva teadusvaldkonnaga. Sestap oli juubelisündmuste nimekirjas akadeemiliste koosolemist ja ajalookonverentside kõrval mitmeid noortele suunatud ettevõtmisi. Tähtsal kohal olid ka lahtiste uste päevad, millega tutvustati ilmajaamade tööd.

2. Jaanuaritormi konverents

METOBS 150 ürituste aasta algas 9. jaanuaril Tallinnas Keskkonnaagentuuri saalis peetud konverentsiga „Sajanditorm – kümme aastat tagasi.“¹ Teatavasti rüüstas 2005. aasta jaanuaris Euroopa põhjaosa tsüklon nimega Gudrun. Tormituulte purustavat mõju sai tunda ka Eesti, eriti aga saared ja Lääne-Eesti. Pärnus tekitas maru ulatusliku üleujutuse. Suure majandusliku kahju ja vähemalt ühe inimkaotuse kõrval sündis sajanditormist Eestile ja siinsele ilmateadustele iroonilisel kombel hulgaliselt kasu. Võib öelda, et esimest korda Eesti taasiseseisvuse ajal tunnetas ja teadvustas ühiskond laiemalt ilmavaatluste ja -prognooside vajalikkust ning mereprotsesside modelleerimise olulisust. Jaanuaritorm oli tähtsaks verstapostiks ka Eesti päästevõimekuse edendamisel. Paraku kipuvad sellised ühiskonda raputanud õppetunnid kiiresti ununema ja nii oligi konverents suunatud sellele, et Gudrunist saadud kogemused püsiksid meeles.

Pärast tervitussõnu Keskkonnaagentuuri direktorilt meenutas Gudrunit Mati Raidma, kes oli tormi ajal Päästeameti peadirektor ning konverentsi ajal keskkonnaminister. Päästeametipoolset pilti tormist ja sellest saadud õppetundidest esitas oma ettekandes

¹ Konverentsi ettekanded on leitavad Keskkonnaagentuuri kodulehelt: <http://www.keskkonnaagentuur.ee/et/uudised/konverents-sajanditorm-kumme-aastat-tagasi-ettekanded>.

Lääne Päästkeskuse juht Ivar Kaldasau. Üheks selle ettekande ivaks oli küsimus, milline roll peaks ajakirjandusel olema elanikkonna teavitamisel. Jaanuaritorm oli ka Eesti meediale uudne kogemus ja selle sündmuse kajastamist analüüsis oma ettekandes Ain Kallis, TTÜ dotsent ning Riigi Ilmateenistuse peaspetsialist. Antud küsimuses võib välja tuua mitmeid vastuolulisi külgi: kuidas meedia ja avalikkus suhtub ilmateenistusse ning oskab reageerida selle poolt välja antavatesse hoiatustesse ja kuidas meteoroloogid oskavad ning suudavad suhelda ajakirjanduse, elanikkonna ja päästeteenistusega.

Taimi Paljak ja Merike Merilain Riigi Ilmateenistuse prognooside osakonnast andsid põhjaliku sünoptilise ülevaate sellest, kuidas Gudrun tekkis ning Eesti rannikuni jõudis. Ühelt poolt oli tegemist madalrõhkkonnaga, mille keskmeks oli õhurõhk erakordselt madal ning mis ka Eesti rannikul suutis tekitada tuuleile kiirusega kuni 38 m/s ja enam. Teisalt aga liikus tsüklon mööda trajektoori, mis oli Pärnu ja Lääne-Eesti rannikualade uputamiseks ideaalne. Eesti ilmateenistuse seisukohalt oli jaanuaritorm kõige varajasemalt ja täpsemalt ette ennustatud loodusõnnetus üldse. Ometi ei suudetud suuri kahjusid vältida. Sarnaselt Ain Kallise järeldustele leiti, et peamiseks põhjuseks olid kommunikatsioonihäired. St. ei meedia ega tavainimesed ei saanud aru või ei uskunud sünoptikute hoiatust ning ilmateenistus ei osanud ennustust tarbijatele mõistetavamaks keeles edastada. Torm andis ka ilmateenistusele olulise arengutõuke. On parandatud ja täiendatud nii seirevõrku kui ka ennustamise vahendeid, arendatud koostööd riigi erinevate ametkondade, päästeteenistuse, teadusasutuste ja teiste riikide ilmateenistustega. Kümne aastaga on sünoptikud oma relvastusse saanud äikesedetektori ja kaks radarit ning ühinenud mitmete rahvusvaheliste organisatsioonidega, mis võimaldavad saada oluliselt parema ligipääsu globaalsetele ilmaandmetele.

Jaanuaritormist sai tuult tiibadesse ka meresüsteemide modelleerimine. Võib öelda, et Eestis tajuti esmakordselt, et teadlaste akadeemilisest nikerdamisest mudelite kallal on ühiskonnale praktilist kasu. Arengutest, mis on operatiivses okeanograafias viimase kümne aastaga toimunud, rääkis TTÜ Meresüsteemide Instituudi direktor Jüri Elken. Antud juhul on märksõnaks rahvusvaheline koostöö. Töövõimeliste mudelite koostamine, infovahetus ja verifitseerimine saab olla edukas vaid laialdase koostöövõrgustiku tingimustes. Eesti mereteadlased on selles osas olnud edukad, nad on mitme modelleerimiskonsortsiumi liikmed ja meie ranniku tarbeks koostanud mudelid, mis ennustasid edukalt ette nii Pärnu ülejutuse, kui ka mitmeid teisi ohtlikke mereveetaseme tõuse, mis viimase kümne aasta jooksul on Läänemere idarannikut kimbutanud.

3. Meteopäeva konverents

Ka traditsiooniline ülemaailmset meteoroloogiapäeva tähistav konverents korraldati sel aastal METOBS 150 egiidi all. Konverents peeti 23. märtsil 2015 taas Tallinnas Mustamäe tee 33 Keskkonnaagentuuri saalis. Seekordse kokkusaamise teemaks oli „Teadmised kliimast tegudesse“². Konverentsil esitatud kümnest ettekandest kahes esimeses käsitleti ilmateaduste ajalugu. Ain Kallis rääkis oma tuntud humoorikal viisil juubelihõngulistest tähtpäevadest, mida lisaks METOBS 150 võiksid meteoroloogid üle maailma tähistada:

² Konverentsi ettekannetega saab tutvuda Riigi Ilmateenistuse kodulehel: <http://www.ilmateenistus.ee/ilmatarkus/meteoroloogiapaevad/2015-teadmised-kliimast-tegudesse/>

alates Itaalia poedi Dante Alighieri 750. sünniaastapäevast kuni 25 aasta möödumiseni esimese Doppler ilmaradari käivitamisest. Dante Alighieri on ilmateadustele oluline teatavasti sellepärast, et ta esitas esmakordselt põhjaliku kirjelduse põrgu kliimast. Tartu Ülikooli klimatoloogiaprofessor Jaak Jaagus rääkis pikalt Eesti kliima uurimise ajaloost. Ta tutvustas nii METOBSi loomise eelseid teadlasi (nt Carl Ludvig Carpv, kes tegi 18. sajandi lõpus Tallinnas ilmavaatlusi) kui ka 19. ning 20. sajandi Eesti ilmauurimise suurkujusid (von Oettingen, Weihrauch, Sresnewsy, Kurrik, Kirde jt).

Seejärel andis Jürgen Talkop keskkonnaministeeriumi kliima- ja kiirgusosakonnast ülevaate Euroopa Liidu ja Eesti kliimapoliitikast. Mõlemal juhul on poliitika suunatud ikkagi peamiselt kasvuhooenergia emissiooni vähendamisele. 2015. aastal oli Eestis ka väga aktuaalne kliimamuutustega kohanemise riikliku strateegia koostamine.

Pärast ajaloolisi ja poliitilisi ettekandeid liikusid sõnavõttud traditsioonilisema klimatoloogia suunas. Tartu Ülikooli keskkonnafüüsika dotsent Piia Posti ettekanne käsitles soolase vee sissevoole Läänemerele. 2014. aasta detsembris toimus viimaste kümnendite suurimaid Põhjameri vee sissetunge, mis ilmselt mõjutab kogu Läänemere elustikku. Piia Post koos saksa (A. Lehmann, K. Höfflich, J. Wiedenbeck) ja soome (K. Myrberg) kolleegidega analüüsisid, kas nende sissevoolude kujunemises on täheldatav mingi seaduspära, s.t. kas nende puhul on märgatav teatud ühine sünoptilise olukorra muster.

Keskkonnaagentuuri hüdroloogia osakonna töötajate Tiia Pedusaare ja Liidia Klauusi ning Eesti Maaülikooli Limnoloogiakeskuse teadlaste Tiina ja Peeter Nõgese koostöös esitati ettekanne „Jõgede jää pikaajalises reas“. Eesti jõgede ligi 90-aastastest vaatlusandmetest võib järeldada, et kliima soojenemine on selgelt märgatav ka vooluveekogude jäätumisandmete põhjal. Jäänähtused algavad nüüd sügisel või talvel oluliselt hiljem ja lõpevad kevadel varem kui vaatlusrea algusaastail ning seetõttu on vähenenud jäänähtustega päevade arv aastakümne kohta 10 võrra.

Aarne Männik Riigi Ilmateenistusest andis kriitilise ülevaate kliimamodelleerimise hetkeseisust Eestis. Meie teadlased on küll osalenud mitmes edukas projektis ja koostanud Eesti olusid hästi kirjeldava kliimamudeli, kuid selle valdkonna tulevik on ebamäärane. Jätkamiseks oleks vaja pidevalt toimivat modelleerimise raamistik-keskkonda, millega hoitakse kokkupandud mudelit töökorras. Üksikute projektidega sellist keskkonda üleval ei hoia, akadeemilist huvi mudeli rutiinne hooldamine ei paku ning riik pole kliima modelleerimisest saadavat kasu veel mõistnud.

Helve Meitern Riigi Ilmateenistusest rääkis pikaajalistest, st kuuprognosidest ja kliimaandmete kohaldatavusest selleks. Ta kinnitas, et Eesti viimase poole sajandi kliima muutumises on väga selgelt märgatav soojenemise tendents. Meiterni järeldused muutustest on aga intrigeerivad: Eesti kliima pole muutunud ei merelisemaks ega ka kontinentaalsemaks, lihtsalt globaalne temperatuuri tõus avaldab mõju ka Eesti õhutemperatuurile.

Järgnevad kaks ettekannet olid pühendatud ohtlikele ilmastikunähtustele. Taimi Paljak ilmateenistusest tõi näiteid viimasel 30 aastal esinenud ohtlikest ilmastikunähtustest: tormituultest, kõrgeist meretasemest, padusadudest, ägedatest äikesejuhtumitest, trombidest ja erakordselt madalast ning kõrgeist õhutemperatuurist. Edvi Freiberg ja Meelis Mesi Häirekeskusest analüüsisid Häirekeskuse töövoogu muutusi erakordsete ilmastikusündmuste ajal. Loodusõnnetustele reageerimise huvides peaks ilmateenistuse poolt antavad hoiatused olema võimalikult varajased ja need peaksid sisaldama juba võimaliku mõju hindamist. Oluliseks peeti ka lühiajalise (3–4 h) prognoosi võimalikku täpsust.

Konverentsi viimases ettekandes esitas Kairi Vint ilmateenistuse ilmavaatluste osakonnast pildis ja juhtlausetes ülevaate 2014. aasta oktoobris Saksamaal Darmstadtis toimunud kliimasümposiumist. Sümpoosionil keskenduti viimaste aastate kliimamuutuste trendidele ja nende jälgimisvõimalustele kosmosest. Tõdeti, et andmeid ilma ja kliimamuutuste kohta on palju, kuid jääb veel väheseks teadmistest, miks üks või teine ilmanähtus esineb. Konverentsisaalis võis tutvuda ka kümnekonna posterettekandega.

Meteoroloogiapäev päädis juubeliüritusele kohase raamatuesitlusega. Kirjastus „Varrak“ tutvustas noore publitsisti ja ilmauurija Jüri Kameniku vastset raamatut „Eesti pilveatlas.“ Tegemist on üle poole sajandi esimese laiemale lugejaskonnale mõeldud eesti-keelse raamatuga, mis käsitleb sedavõrd põnevate ja mitmetahulist meteoroloogilist nähtust nagu seda on pilved.

4. Sündmused laiale huviliste ringile

Järgmine juubeliaastale kohane tähtsündmus toimus 24. aprilli pärastlõunal, mil avati Tartu Ülikooli füüsikahoone (Ostwaldi 1) katusel asuv uus ilmajaam. Selle üritusega tähistati nii 150 aasta möödumist sisuliselt esimese ilmajaama asutamisest Tartus, kui ka ülikooli värske Physicumi lõplikku valmimist. Ilmajaam võimaldab kohapeal läbi viia meteoroloogia õppeaine praktikume ja annab aerosoolimõõtmiste ja teistele keskkonnanuuringutele taustainfot. Ilmajaam on ka kõigil huvilistele reaalselt Internetis jälgitav ning mõõtmisandmed vabalt allalaetavad³.

Peamiselt ilmahuvilistest üliõpilastele ja koolilastele suunatud avamisürituse nimeks oli "Õhupalli väljakutse". Nagu nimi vihjab, oli ürituse naelaks ilmaõhupalli lendu laskmine, millega osaleti ülemaailmses sellealases ürituses. Algselt hinnati, et ilmasond viib mõõteriistad 25–30 km kõrgusele ja kandub õhuvooludega üle Peipsi Venemaale. Tegelikult tõusiski pall ligi 30 km kõrgusele, kuid laskumisel uppusid mõõteriistad Pihkva järves.

Juubeliaasta üritused jätkusid Riigi Ilmateenistuse lahtiste uste päevaga. 16. mail olid huvilised oodatud Tallinn-Harku ning Tartu-Tõravere ilmajaama ja Sürgavere radari torni. Ekskursioonid oli sedavõrd populaarsed, et kuigi ilmajaamadesse tehti järjest kaks ekskursiooni, said kõik ekskursioonikohad huvilistest täis juba mitu päeva enne viimast registreerimisaega.

Ka juba 14. korda toimunud ilmahuviliste ja äikesevaatlajate kokkutulek kulges METOBS 150 tähe all. Seekord kogunes ligi 80 harrastusmeteorooloogi 18. juulil Jõgeva põhikooli aulasse, kus kuulati ilmateadlaste ettekandeid. Et Jõgeval asub Eesti Taimekasvatuse Instituut (ETI), siis enamus ettekandeid puudutasid üht või teistpidi agrometeoroloogiat. Nii näiteks andsid Eesti Loodusuurijate Seltsi ilmahuviliste sektsiooni koordinaator Helle Raudsepp ja ETI agrometeoroloog Laine Keppart ülevaate agrometeoroloogiliste vaatluste ajaloost Jõgeval ning ilmahuviliste vaatlusvõrgu tööst. ETI direktor Mati Koppel rääkis automaatilmajaamade kasutamisest taimehaiguste prognoosil. Hobiaednik Felix Buschman kõneles viinamarjakasvatuse ja ilma seostest Eestis. Kokku kuulati kümme ettekannet ning kokkutulek lõppes ekskursiooniga Eesti Taimekasvatuse Instituuti.

³ <http://meteo.physic.ut.ee/>



Joonis 1. Tartu Ülikooli uue füüsikahoone katusel asuva ilmajaama avamist 24. aprillil kajastas meedia juubeliaasta üritustest enim. Kõige vaatamängulisemaks osaks oli selle juures ilmasondi lendu laskmine. Õhupall, mille külge oli kinnitatud mõõteriistad (fotol oranž kast) tõusis ca 30 km kõrgusele. (Jaak Kikase foto.)

Figure 1. The opening ceremony of weather station on the roof of the new physics building at the University of Tartu on 24 April became one of the jubilee year events that got most media attention. The spectacle part of the event was launching a weather balloon. The balloon to which instrumentation (orange box on the photo) was attached, reached altitude of about 30 km.

Samal päeval Jõgeva kokkutulekuga tähistati Vilsandil sealse meteoroloogiajaama 150. sünnipäeva. Vilsandi vanim säilinud vaatlusraamat algab sissekandega 31. augustil 1865. Sünnipäeva puhul olid ilmajaama ukсед külalistele valla ning Vilsandi päästepaadikuuris peeti juubelikonverentsi. Kuna samal ajal peeti saarel ka 12. vilsandlaste päeva, siis kohaliku kultuurimaja rolli kandvasse päästepaadikuuri oli kogunenud ettekandeid kuulama ligi 150 inimest. Meeleoluka juubelipäeva lõpetas Vilsandi Omateater ilmateemalise etendusega “Vaata taevasse”. Augusti lõpul tegi Vilsandi meteojaama piduliku visiidi ka keskkonnaminister Marko Pomerants.

Ilmaportaali ilm.ee tähistas METOBSi juubeliaastat fotokonkursiga „Vihm“. Võistlusele oodati fotosid ja videoid vihmast ja sellega seotud ilmastikunähtustest. Eriti olid oodatud pildid udu- ja lausvihmast. Fototehniliselt ja -kunstiliselt on vihma jäädvustamine suur väljakutse. Võistlus oli eelkõige suunatud ilma- ja fotohuvi ärgitamisele koolilastel ning nii toimuski tööde hindamine kolmes vanuserühmas: eelkooliealised lapsed koos I–VI klassi õpilastega, VII–XII klassi õpilased ning täiskasvanud. Žüriisse

kuulusid loodusfotograaf Remo Savisaar ja Tartu Ülikooli füüsika instituudi direktor professor Jaak Kikas. Noorema vanuserühma võitjateks said Liselle Palts ja Eva Liisa Rebane. Õpilaste vanemas vanuserühmas olid parimad Kairo Kiitsak, Kätriin Kruusaauk, Tuuli-Ly Tähtjärv ja Merylyn Nõmm. Täiskasvanute klassis tunnistati parimateks Jüri Voit, Kersti Kaiv, Viiu Härm Rummo, Ene Aschjem, Peep Loorits, Lee Nuutre, Kalmer Lehepuu, Kalmer Saar ja Triinu Sarv. 2. oktoobril koguneti Tallinnas Teaduste Akadeemia saali, kus jagati parimatele pildistajatele auhindu. Tervituskõnega esines Teaduste Akadeemia president Tarmo Soomere, teadusettekandeid pilvedest ja sademetest pidasid Piia Post ning Jüri Kamenik; kokkutulnutele serveeriti torti ja kohvi.

5. Baltic Earth ning Ökoloogia ja maateaduste doktorikooli konverents

Augustis toimus Eestis Läänemeremaade ilma- ja mereteadlaste koostööprogrammi „Baltic Earth“ ja Tartu Ülikooli poolt korraldatud doktorantide konverents. Viis päeva kestnud ja otseselt METOBSi juubelile pühendatud konverents avati 10. augustil Tartus ülikooli ajaloomuuseumis. Pärast avaettekandeid, milles Anna Rutgersson rääkis „Baltic Earthi“ programmi ideestikust, Piia Post käsitles doktorikonverentsi eesmärgi ja Erki Tammiksaar tutvustas METOBSI ajalugu, alustasid ettekannetega erinevate maade doktorandid. Vastavalt konverentsi teemaatikale käsitleti peamiselt Läänemerd, selle ümbruse kliimat ja keskkonnaprobleeme. Ent näiteks teisel päeval esinenud Naglaa F. Soliman Egiptusest Aleksandria Ülikoolist rääkis Vahemere setetes talletunud raskmetallide potentsiaalsest ökoloogilisest ohust. Kutsutud olid ka staažikamad teadlased, kelle hulgas paistis silma Moskva Širšovi-nimelise Okeanoloogiainstituudi meri-atmosfäär seoste uurimise ja klimatoloogia labori juhataja Sergei Gulev. Ta rääkis väljakutsetest Atlandil tekkinud ja Euroopa kohale kanduvate madalrõhkkondade uurimises. Teatavasti liigub just tsüklonitega suhteliselt soojem ja niiskem õhk kaugele Euroopa südamaale ning seega määravad madalrõhkkonnad suuresti ära siinse ilmastiku. Eriti huvitavad ongi sellised madalrõhkkonnad, mis justnagu mootorina käivitavad võimsa konveieri, millega kanduvad niisked õhuvood lõunapoolsetelt laiukselt kaugele põhja.

Konverentsi kolmas päev kulus Tartust Vilsandile sõitmiseks. Lõunat söödi Saaremaal Kaali meteoriidikraatrite juures ja pärastlõunal jõuti paadiga Vilsandile. Kui bussisõit kulges sombuse ja vihmase ilmaga, siis Vilsandi tervitas ligi neljakümnet konverentsilist päikesepaistega. Õhtu oli pikk ja soe ning enamus saabunutest täitsid selle jalutuskäikudega ning päikeseloojangu nautimisega. Külaliste jaoks soojaks köetud sauna jõudsid vähesed.

Järgmisel hommikul koguneti päästepaadikuuri, kus jätkati ettekannetega. Päikesepaisteline, kuid väga tuuline ilm tekitas paadikuuris kohati kummalisi heliefekte, ent konverentsi tööd need siiski ei häirinud. Selle päeva kõige meeldejäävamaks esinejaks oli Tallinna Ülikooli ökoloogia keskuse vanemteadur Hannes Tõnisson. Tema ettekanne muutustest Lääne-Eesti saarestiku rannikul oli konverentsi päevakavas viimane ja ta saabus paadikuuri juurde napilt enne ettekande algust. Nimelt tuli Tõnisson mootoriga kummipaadil üle lainetava mere otse välitöödelt. Ettekannetele järgnes jalutuskäik giidi saatel mööda saart ja õhtu lõppes grillipeoga. Järgmisel hommikul sõideti saarelt minema – kes Tallinnasse lennujaama, kes Tartusse tööd jätkama.

6. Meteoroloogiaaastat kokkuvõtavad sündmused

Kuna METOBS alustas tööd detsembris, siis kulmineerus ka juubeliaasta just sellel kuul. Ajakirja „Eesti Loodus“ detsembrinumbris avaldati tähtsa sündmuse puhul kolm teemakohast artiklit. Ain Kallise ja Keskkonnaagentuuri Ilmavaatluste osakonna juhataja Miina Krabbi kirjutis käsitleb seda, kuidas sai alguse ja kujunes välja ilmavaatluste võrgustik Eestis. Teises artiklis kirjutab Ain Kallis, kuidas 19. sajandil jõudis ilmateade avalikkuseni ja kui tänamatu ilma ennustamise töö toona oli. Tartu Ülikooli geograafiaosakonna hüdroloogialektor Arvo Järvet tuletab oma artiklis meelde, et kaks aastat pärast ilmavaatluste algust alustati Tartus ka Emajõe veetaseme vaatlusi ja nii on meil peaaegu 150 aastat kvaliteetseid hüdroloogilisi andmeid.

Juubeliaasta peaürituseks kujunes 2. detsembril peetud ajalookonverents. Tiigi Seltsimajja (Tiigi 11), kunagi teoloogiaprofessor Alexander Konstantin von Oettingeni (1827–1905) poolt ehitatud elumajja, kogunes nii suur hulk huvilisi, et nende mahutamiseks tuli saali tuua lisatoole. On ju kunagine Tartu meteoroloogiaobservatoorium olnud vundamendiks üsna paljudele praegu Eestis arendatavatele loodusteaduste harudele, alates meteoroloogiast ja hüdroloogiast, lõpetades ülitäpsete geodeetiliste mõõtmistega. Tiigi Seltsimaja on aga METOBSi meenutamiseks Tartus kõige kohasem paik, kuna meteoroloogia observatooriumi rajaja ja juhataja Arthur Joachim von Oettingen (1836–1920) kasutas venna lahkel loal just selle maja torni ilmavaatluste tegemiseks.

Konverentsi esimese poole ettekanded⁴ käsitlesid klassikaliselt METOBSi ja selle järglaste ajalugu. Teadusajaloolane Erki Tammiksaar rääkis põhjalikult meteoroloogia-teaduse tasemest ja loodusteaduslikust vaimsusest, mis 19. sajandi keskel Tartus, Venemaal ja Euroopas valitsesid ning mis viisid METOBSi asutamiseni. Juttu oli samuti sellest, kuidas arenes Venemaa lääneprovintsidest vaatlusvõrgustik ja üldine teadmiste tase, mis võimaldas iseseisvunud Eestis jätkata kõrgetasemelisi ilmavaatlusi.

Ain Kallis kõneles Tartu linnas tehtud ilmamõõtmiste ajaloost. Vaatluskoht vahetus esimestel kümnenditel korduvalt, kuid kõik need jäid praeguse Vallikraavi ja Tiigi tänava piirkonda. Paraku on nendest esimestest mõõdukohtadest praeguseks säilinud vaid Tiigi Seltsimaja, kus vaadeldi ilma aastatel 1893–1926. METOBS ise võeti ülikooli allasutuste nimekirja alles 1876. aastal. 1926–1952. a asus observatoorium Liivi (Hetzeli) tn 3. Maja kõrval oli ka vaatlusväljak, kus vahetult peale II maailmasõda asusid anekdootlikult kõrvuti kaks paari vaatlusinstrumente: ühed olid observatooriumi, teised Punalipulise Balti Laevastiku vaatlusjaama omad.

Arvo Järveti ettekanne puudutas Eesti siseveekogude hüdroloogiliste mõõtmiste ajalugu. METOBSi tiiva all alustati Emajõe veetasemete mõõtmist 1867. aasta aprilli alguses. Õnneliku juhusega algasid mõõtmised kuu aega varem, kui Tartut tabas suurim seni mõõdetud üleujutus: 7. mail 1867 ulatus Emajõe veetase 373 cm üle graafiku nulli. Emajõe mõõtmisrida kuulub pea 150 aastase ajaloo maailmas pikimate hulka ja see võimaldab teha palju usaldusväärsemat statistikat kui nii mõnegi maailma suurjõe puhul.

Janet Laidla Tartu Ülikooli tähetornist andis ajaloolase vaatenurgast ülevaate sellest, kuidas Vabadussõja ajal, 1919. aastal asutati Tallinnasse mereobservatoorium, mille tööülesanneteks oli koostada Eesti sõjalaevastikule ilmaennustust ja edastada navigat-

⁴ Ettekanded on leitavad aadressil: <https://sisu.ut.ee/metobs150/ajalookonverents>

siooniks tarvilik täpne aeg. Observatooriumile vajalikud vaatlusvahendid toodi osaliselt Tartu tähetornist. Algselt vaid sõjaväelise üksusena loodud mereobservatooriumil olid aga ambitsioonikad laienemise plaanid ning kava vähemalt osaliselt üle võtta Tartu meteoroloogiaobservatooriumi funktsioonid. Tallinlaste plaanid siiski ei täitunud ja Tartu jäi ka sõdade vahelisel perioodil Eesti tähtsaimaks ilmauurimise keskuseks.

Piia Post meenutas oma ettekandes kokkutulnutele, kui paljud Eesti asutused ja uurimisgrupid on tänuvõlgu Arthur Joachim von Oettingen mõttele asutada METOBS. Observatooriumi kasvandikud on aluse pannud nii ilma- kui ka sisevete vaatlusõrgustikule ja praeguses mõistes Riigi Ilmateenistusele. Samuti sai siit alguse meteoroloogia ja klimatoloogia õppeainete õpetamine Tartu Ülikoolis ja Tallinna Tehnikaülikoolis. Oettingeni ja tema järglaste õpilastest on välja arenenud praktiliselt kõik geofüüsika valdkonnad alustades atmosfääri kiirguse, aerosooli ja osooni uurimisest ning lõpetades tänapäeval juba satelliidi- ja radariandmete töötlemisega.

Pärast kohvipausi võttis Eesti Geograafia Seltsi poolt sõna meteoroloog Peeter Kõiva kes esines klassikalise ülevaatega Arthur Joachim von Oettingeni eluloost. Sellele järgnenud ettekanne Eesti Muusika- ja Teatriakadeemia professori Mart Humala poolt oli konverentsi kontekstis vägagi üllatuslik kuna see käsitles sügavat muusikateooriat. Nimelt tegeles Arthur Joachim von Oettingen 19. sajandi teadlasele tüüpiliselt korraga mitme erineva teadusharuga ja oli ühtlasi võimekas muusik. Füüsiku, matemaatiku ja muusikuna püüdis Oettingen matemaatilist lahendada muusikainstrumentide häälestamisprobleemi. Oettingeni paljuhelilised häälestussüsteemid olid matemaatilist äärmiselt loogilised ja löid eripärase muusikakõla, kuid laiemat levikut siiski ei leidnud. Oettingeni häälestussüsteemi alusel on konstrueeritud eriline harmooniumisarnane instrument – ortotonofoonium, milles iga oktaav jagatakse 72 tooniks ja nii saab instrumendil mängida kas puhast kolmandik, neljandik või viiendik akordi. Professor Humala ettekanne oli täis energiat, kuid vaatamata publikule jagatud trükimaterjalidele ja ohtratele näidetele seltsimaja saali klaveril, jäi selle sisu enamusele kuulajatest raskesti mõistetavaks.

Kultuurigeograaf Taavi Pae jutustas seejärel meteoroloogi, ajakirjaniku ja poliitiku August Tõllasseppa (1885–1970) elusaatusest. Tagasihoidlik, kuid väga töökas Tõllassepp pole kunagi olnud kuulus, kuid ometi on ta alati olnud tipptegijate hulgas. I maailmasõja ajal sattus ta Vene armee meteoroloogiateenistusse ja oli Venemaal ja ilmselt ka maailmas esimeste hulgas, kes hakkas lennukilt atmosfääri kõrgemaid kihte uurima. Selleks konstrueeris ta ka spetsiaalsed vaatlusvahendid. Tõllassepp oli esimeste hulgas, kes oli 1918. aastal Eestis ilmasteenistuse rajamise juures. Alguses töötas ta Tallinnas mereobservatooriumi ja hiljem Tartu Ülikooli meteoroloogiaobservatooriumi sünoptikuna. 1924. aastal läks ta tagasi oma peamise kire – ajakirjanduse juurde, olles kuni arreteerimiseni 1945. aastal ametis „Postimehes“. Tõllassepp jõudis olla ka Riigikogu kolme koosseisu saadik. Tõllassepp on Eesti ilmasteaduste ajalukku jäänud peamiselt oma veerandsaja populaarteadusliku artikliga ja kolme ilma-teemalise raamatuga. Usutavasti on paljudel raamaturiivul tema 1960. aastal ilmunud raamat „Meteoroloogia kõigile,“ mille kirjutamist alustas ta juba nõukogude vangilaagris.

Tiina Tammetsi ja Tõnu Viiki ettekanded puudutasid Eesti ilmasteenistuse lähiajalugu. Esimene neist meenutas keerulisi 1990-ndaid, mil moodustati Eesti Hüdroloogia ja Meteoroloogia Instituut, ilmusid esimesed lauaarvutid ning aastatega kogutud ilmaandmeid hakati digitaliseerima. Andmete sisestamise algus oli okkiline, kuna esimesed arvutid olid väikese võimsusega ja programmide omavaheline ühildamatus tekitas probleeme. Tõnu Viik aga

meenutas pisut hilisemaid aegu, kui meie rahvuslik ilmateenistus pürgis juba rahvusvahelisele areenile ja ühines üldise rahapuuduse ja kohalike ametnike mõistmatuse kiuste selliste koostööorganisatsioonidega nagu EUMETSAT, ECMWF ja HIRLAM. Kuulumine nendesse organisatsioonidesse on aga võimaldanud Eestil oluliselt parandada ilmaennustuse kvaliteeti.

Konverentsi ajal esitleti ka juubelile pühendatud marki, mida huvilised võisid koos temaatilise ümbriku ja esimese päeva templiga kohapeal soetada.

Peale konverentsi ettekandeid tehti jalutuskäik mööda Tartut ja külastati METOBSiga seotud paiku – tähetorni, riigiarhiivi hoonet, Emajõeäärset veemõõtejaama. Kõige meeleolukamaks kujunes Liivi tänaval asuva Riigiarhiivi hoone katusel käimine. Nagu mainitud, asus METOBS selles hoones mitukümmend aastat ja observatooriumi veteranidele pakkus vana töökoha külastamine palju äratundmisrõõmu. Lisaks avanes katuselt hilisügisese Tartu peale lummas vaade.

Õhtu lõppes Ülikooli kohviku suurde saali kaetud pidulaua taga, kus sundimatus õhkkonnas meenutati möödunud aegu ning värskendati vanu tutvusi. Ilmateenistuse sünoptik Ele Pedassaar demonstreeris vahepaladega kohviku klaveril, et ka tänapäeva ilmauurijatel on muusikaga soojad suhted. Õhtusöögi lõpuks pakuti kohvi ja torti. Viimane oli kaetud glasuurikihiga, mis kujutas ilmakaarti.

Järgmisel päeval jätkus juubeli tähistamine konverentsiga „Eesti geofüüsika 2015“ Tartu Observatooriumi saalis Tõraveres. Selle päeva ettekanded olid suunatud juba täieliselt teaduse tulevikku. Ka see kokkusaamine oli rahvarohke ja värskelt renoveeritud observatooriumisaal kippus huviliste jaoks kitsaks jääma: kokku oli tulnud ligi sada erineva põlvkonna ja teadusharu teadlast.

Pärast pidulikke avasõnu esinesid teadlased TTÜ Geoloogia Instituudist. Atko Heinsalu ja Siim Veski rääkisid Eesti pärastjääaegsest kliimast ja selle muutustest ning legendaarne polaaruurija Enn Kaup andis ülevaate eestlaste osalusest Antarktika uurimises ja kliimamuutustest lõnamandril.

Seejärel liikusid ettekanded märgalade teemasse. Tartu Ülikooli kaugseire spetsialistid rääkisid järvede rollist globaalses süsinikuringes ja selle osa hindamise võimalustest kasutades satelliidiandmeid. Tallinna Ülikooli ökoloogia keskuses tehtavate vee-ökosüsteemide ja kliima omavaheliste seoste uuringuid tutvustas Mihkel Kangur.

Järgnevad ettekanded käsitlesid kliimamuutusi. Viivi Russak rääkis muutustest Eesti kiirgustingimustes, mida on viimase poole sajandi jooksul Tõravere ilmajaamas jälgitud. Hans Orru ja tema kolleegid Tartu Ülikooli tervishoiu instituudist on uurinud äärmusliku õhutemperatuuri mõju suremusele Eestis. Nende ettekandest selgus, et suvised kuumalained on tõesti suurendanud surmade arvu ja arvestades tuleviku kliima tendentsidega võivad kuumalained kujuneda meie maal tõsiseks terviseriskiks. Professor Jaak Jaagus tutvustas Haridus- ja teadusministeeriumi „Keskkonnakaitse ja -tehnoloogia teadus- ja arendustegevuse programmi“ (KESTA) projekti ESTKLIIMA teaduslikke tulemusi ehk siis rääkis trendidest, režiimihetetest ja tulevikustsenaariumitest Eesti kliimas.

Lõunasöögi järel tehti ekskursioon Tõravere Observatooriumi renoveeritud peahoones, mida nüüd võib teataval määral pidada ka Eesti kosmosetööstuse keskuseks – hoone ühes tiivas pandi kokku meie esimene satelliit ESTCube-1. Külastati ka Tartu-Tõravere ilmajaama, mille üheks tähtsamaks vaatamisväärsuseks on teatavasti universaalne ilmainstrument – burromeeter. Ilmajaama teevad aga eriliseks siiski mitmed kiirgusrežiimi mõõtevahendid, mille poolest on siinne meteoväljak maailmas unikaalsete seas. Ei

tohi unustada ka vaatlushoones asuvat ilmamuuseumi, kuhu on Ain Kallise poolt kogutud eelnevatel kümnenditel kasutusel olnud vaatlustehnika, kirjandus ja ilmaga seotud suveniirid. Suveniire ja raamatuid sai lõuna ajal osta ka konverentsisaalist. Selles osas olid eriliselt edukad Ain Kallise ja Enn Kaupi raamatud, kuna nendele sai kohapeal paluda autorite autogrammi.

Pärastlõunased ettekanded olid peamiselt noorteadlaste päralt. Esimesed kaks kõnelejat käsitlesid aerosoole. Tartu Ülikooli füüsika instituudi doktorant Velle Toll rääkis sellest, kuidas aerosoolid mõjutavad Euroopa ilmastikku. Probleem on antud juhul selles, et aerosoolidel on ilmselgelt suurem mõju, kui seda ilnamudelites arvestada osatakse. Noorte füüsikute Maris Palo ja Meelis Elleri ettekanne „Tartu õhuseirejaama aerosooliandmete faktoranalüüs“ tutvustas sisuliselt aerosoolide uut tüüpi püüdurit, mida Tartus arendatakse. See võimaldab aerosoolosakesi suuruse järgi sorteerida ja seeläbi ka nende päritolu täpsemalt selgitada.

Eesti Maaülikooli ja Tallinna Tehnikaülikooli geodeetide ühisettekannet „Raskuskiirenduse anomaalvälja ja geoidi mudelpindade täpsustamine Eestis“ (ettekandja TTÜ Teedeinstituudi professor Artu Ellmann) näitas selgelt, kui mitmekesise teemaderingiga tänapäeval geofüüsika tegeleb. Samas on maapinna tegeliku kõrguse teadmine oluline paljudele teistele valdkondadele, millega geofüüsika tegeleb: näiteks merevee taseme jälgimine ja selle muutuste arvutamine. Satelliidi- ja veemõõdupostide andmete põhjal arvutatud veetaseme muutustest Eesti rannikumeres räägiti järgmises ettekandes (ettekandja Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituudi dotsent Aive Liibusk).

Ka järgnevad kaks ettekannet olid mereteemalised. Kõigepealt esines Eesti Teaduste Akadeemia president ja TTÜ Küberneetika Instituudi lainetuse dünaamika labori juhataja Tarmo Soomere, kes tutvustas Läänemere ekstreemsete veetasemete matemaatika põnevat maailma. Suureks väljakutseks ekstreemsete veetasemete statistikas on see, et erinevatel looduslikel protsessidel, mis viivad rannikualade üleujutusteni, on erinevad ja matemaatiliselt ühildamatud sagedusjaotused. Tarmo Soomere doktorant Maris Eelsalu rääkis aga sellest, kas ja kuidas saaks Läänemere lainetust ära kasutada elektritootmiseks.

Aarne Männik tutvustas seejärel Eestis arendatud numbrilist ilmaennustusmudeli keskkonda, mis on Riigi Ilmateenistuses kasutusel ja toetab sünoptikute tööd. TTÜ Instituudi professor Urmas Raudsepp rääkis oma ettekandes sellest, milliseid uusi võimalusi pakuvad Euroopa Komisjoni vahenditest arendatava Copernicus programmi merekeskkonna seireteenused ja Läänemere seire ning prognoosikeskus.

Konverentsi viimases ettekandes käsitleti maailma ilmatedadustes väga aktuaalset küsimust, kuidas kasvuhoonegaasid ja aerosoolid põhjustavad kliimamuutusi. Ettekandjaks oli Tartu Observatooriumi vanemteadur Erko Jakobson.

Lisaks suulistele ettekannetele oli observatooriumi koridoridesse ülesse riputatud pea veerandsada stendiettekannet, mis samuti katsid laialdast teemaderingi, millega tänapäeva ilmatedadlased Eestis tegelevad.

Konverentsi lõpetas METOBS 150 peaorganisaator Piia Post, kes võttis oma sõnavõttus kokku juubeliaasta sündmused, tänas ürituste korraldustoimkonda, konverentsi teaduskomiteed ja kõiki kokkutulnud ilmahuvilisi.



Joonis 2. Grupipilt konverentsilt „Eesti geofüüsika 2015“, mis toimus 3. detsembril Tõraveres. Kokku oli tulnud ligi 100 teadlast-huvilist (Viljo Alliku foto).

Figure 2. Participants of the conference "Estonian geophysics 2015" at the Tartu Observatory in Tõravere on 3 December 2015. The conference was dedicated to the METOBS 150th anniversary, drawing together about 100 scientists from different research areas.

7. Kokkuvõtteks

Kui METOBS 150 aastat kokkuvõtlikult ehk arvuliselt väljendada, siis selle raames toimus üks ilmajaama avamine, fotokonkurss, raamatu- ja margiesitus ning teatrietendus; söödi ära kaks suurt torti; korraldati kokku kümme ekskursiooni ja lahtiste uste üritust ning kaheksa konverentsi või kokkusaamist, millel esitati ca 95 teadusettekannt ligi 120 autorilt. Kõige sagedamini võtsid sõna Ain Kallis ja Piia Post (kumbki esines nelja ettekandega, lisaks tervitus- ja õnnitluskõned), neile järgnesid Jaak Jaagus ja Jüri Kamenik (kolm ettekannet). Peale selle esitati konverentsidel ligi 40 posterettekannt, mille autorite arv ulatus samuti saja lähedale.

Juubeliaasta erinevad üritused leidsid üsna ohtrat käsitlemist ka meedias. METOBS 150 kodulehel⁵ on kokku loetletud 40 meediakajastust alates kuulutustest koolide kodulehtedel kuni ajaleheartiklite ja uudiselõikudeni televisioonis. See loetelu pole kindlasti päris lõplik, kuid annab hea ülevaate ilmateadlaste suhetest massikommunikatsiooniga. Kohe torkab silma, et kõige viljakam ilmast kirjutav autor on Ain Kallis, kelle sulest ilmus

⁵ <https://sisu.ut.ee/metobs150/avaleht>

2015. aastal kaheksa kirjutist, mida saab seostada observatooriumi juubeliga. Lisaks kirjutamisele on Ain Kallis ka inimene, kellega ajakirjanikud hea meelega intervjuusid teevad. Kõige rohkem artikleid (7) avaldati „Maalehes,“ kus on alati oodatud nii Ain Kallise kirjutised, kuid mis paistab silma ka üldise huviga ilmateaduste vastu. Rohkesti oli artikleid ajalehes „Vooremaa“, seda tänu Jõgeval toimunud ilma- ja äikesehuviliste kokkutulekule. Samuti olid Saaremaa ajalehed aktiivsed Vilsandi sündmusi kajastama. ETV saates „Osoon“ tutvustati juubeliaastat ja selle üritusi juba jaanuaris. Meedia (telekajastuste) seisukohalt kujunes kõige edukamaks aprillis avatud füüsikahoone ilmajaama avamine. Avamisüritust koos selle vaatamängulisema osaga – ilmasondi taevasse laskmisega – näitasid nii ETV uudistesaaade „Aktuaalne Kaamera“ kui ka Kanal 2 „Reporter“.

Käesoleva artiklite kogumikuga tõmmatakse sümbolsest METOBS 150 üritustele lõplik joon alla. Siin avaldatud tööd on põgus ülevaade sellest, millega Eesti ilmteadlased tegelevad ja kui kaugele on viimase pooleteistsaja aastaga Oettingeni meteoroloogia observatooriumist alguse saanud arengus jõutud.

METOBS 150 – a year full of weather science

Mait Sepp and Piia Post
University of Tartu

Summary

In 2015, Estonian geophysicists and weather scientists celebrated the 150th anniversary of the outset of consistent and professional meteorological observations in our country. Arthur von Oettingen (1836–1920), the privatdozent of mathematics and physics at the University of Tartu, started weather observations on 2 December 1865 and founded the Meteorological Observatory (METOBS). Thus, the Tartu meteorological and hydrological time series belong among the longest of their kind in the world. We can also state that METOBS has given rise to all branches of geophysics and weather sciences that are dealt with in Estonia today, starting from amateur meteorology up to remote sensing technologies.

To celebrate this important anniversary, the Laboratories of Atmosphere and Environmental Physics of the Institute of Physics, as well as the Department of Geography of the Institute of Ecology and Earth Sciences of the University of Tartu and Tartu Observatory, the Environment Agency, the Estonian Naturalists' Society, the Jõgeva Centre of Weather and the weather portal ilm.ee organized a series of events, whose common denominator was METOBS 150. The present article gives a chronological overview of the events related to the anniversary and provides a short summary of the most important oral presentations of jubilee conferences.

Opening of a weather station, a photo contest, presentation of a book and a postmark and a theatrical performance took place during the year of METOBS 150. Also, two large cakes were eaten; ten tours of open house events at meteorological stations were organized. Eight conferences were held with about 95 oral and 40 poster presentations from about 200 different authors.

Public interest in these events was so great that the question of additional seats was often acute. The anniversary received a decent amount of media attention: altogether more than 40 newspaper articles, TV broadcasts, as well as online news covered all of the most important events of the year.

This collection of articles draws a symbolic line under the METOBS anniversary events, and provides a brief cross-section of different research areas in the present-day Estonian geophysics and weather sciences.

Tartu Ülikooli Metobsi asukohtadest

Ain Kallis

Tallinna Tehnikaülikool, Eesti Keskkonnaagentuur

1. Sissejuhatus

1815. aastal kirjutas Tartu ülikooli füüsikaproffessor G. F. Parrot oma geofüüsika-õpikus: “Et oleks loota rikkalikku saaki atmosfääri tundmaõppimisel, peaksid kõik riigid tsiviliseeritud maailmas liituma, et rajada meteoroloogiline ühendus, milleks oleksid maailma arvukais punktides vaatlusjaamad /.../ ning peale selle keskbüroo, kuhu koondataks kõik vaatlused. /.../ Ainult nii, katkematute, väga paljudes kohtades neli korda päevas läbi-viidavate vaatluste abil võib see viia soovitud resultaadini.” (Tankler, Kuznetsova, 1992).

Parroti mõte ei sündinud tühjalt kohalt. Juba 18. sajandil tegutses Saksamaal Societas Meteorologica Palatinae (Mannheim 1780–95), mis koordineeris mitme riigi (sh. Vene impeeriumi kahe jaama) meteoroloogilisi vaatlusi (Lüdecke, 2010; Tammiksaar, 2005). Oma südameasjaks võttis süsteemsete ja koordineeritud meteoroloogiliste vaatluste läbi-viimise maailmas Alexander von Humboldt (Humboldt, 1817). Kuigi Humboldti eluajal tehti meteoroloogiliste vaatluste ühtlustamiseks kogu maailmas palju, sündis maailma esimene selline ühendus siiski alles 1873. aastal, kui alustas tegevust Rahvusvaheline meteoroloogide kongress (IMO) (Bericht, 1873).

Kohalike „keskbüroode“ ehk meteoroloogiaobservatooriumite loomist alustati juba varem, Vene impeeriumis näiteks üleriigilise Füüsika Peaobservatooriumi rajamisega 1849. aastal Peterburis Adolf Theodor Kupfferi juhtimisel ja Humboldti olulisel toetusel. (Piirkondlike keskuste loomisel arvestati tavaliselt ülikoolide kui teaduskeskustega) (Ры-качев, 1899). Ühe projekti järgi oleks Tartu kujunenud koguni vaatluste keskuseks Balti kubermangudes (Tankler, Kuznetsova, 1992).

Praegusel Eesti territooriumil on instrumentaalseid meteoroloogilisi vaatlusi tehtud kõige kauem Tallinnas, juba 18. sajandi lõpust alates (Tarand, 1992). Nii need, kui ka Tartus J. Fr. Parroti, J. H. Mädleri, Fr. L. Kämtzi jt. tehtud vaatlused olid lünklikud, puu- dused täpsemad andmed vaatluspaiga, vaatlusmetoodika ja -riistade kohta, kuigi Kupfferi eestvõttel tuli alates 1837. aastast teha vaatlusi kogu impeeriumis ühtse metoodika järgi (Kupffer, 1837).

Tõuke meteoroloogiliste tööde organiseerimiseks Tartus sai alles noor ülikooli füüsikadotsent Arthur Joachim von Oettingen oma lähetuse ajal Peterburi Füüsika Pea-observatooriumi 1864. aastal. Jõudnud tagasi, pöördus ta ülikooli juhtkonna poole ette-panekuga organiseerida pidevaid kõrgetasemelisi ilmavaatlusi Liivimaal tehtavate mõõt- miste ning teaduslikku uurimistööd koordineeriva keskusega Tartus. Juhtkond oli sellega põhimõtteliselt nõus, kuid tal ei olnud pakkuda tööks sobivaid ruume (Liidemaa, 1992).

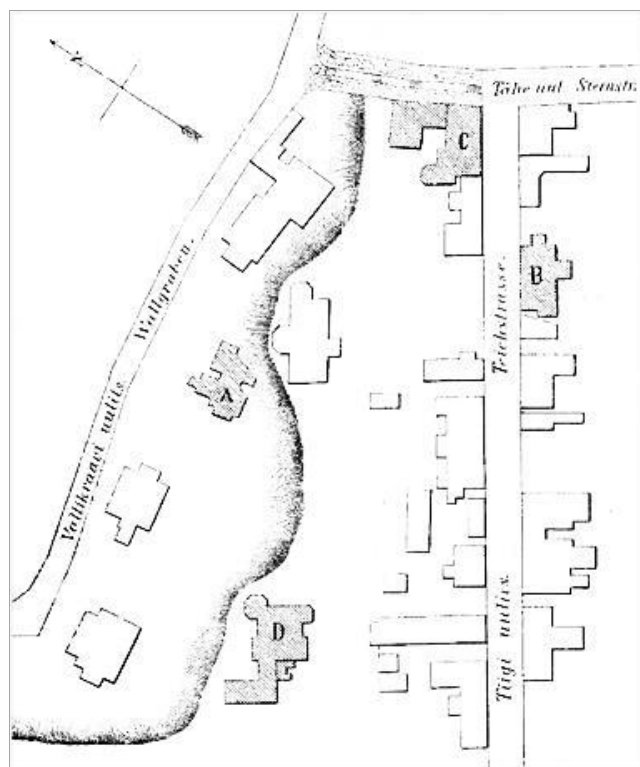
2. Vaatluspaigad Tiigi tänaval

Oettingen otsustas siiski alustada vaatlusi 1865. aasta 2. detsembril esialgu oma majas **Vallikraavi tn 12** (joonis 1). Sellega pani ta aluse pidevale vaatlusreale Tartus, mis kestab juba üle 150 aasta. Nimetatud kuupäeva loetakse ka Tartu Ülikooli Meteoroloogia

Observatooriumi (Metobsi) sünnipäevaks, kuigi ametlikult võeti ta Tartu ülikooli all-asutuste nimekirja alles 1876. aastal (Kongo, 1977).

Esimesed õhutemperatuuri mõõtmised tehti kellaaegadel 7, 14 ja 23 põhjapoolse akna külge kinnitatud termomeetriga, mille „elavhõbeda anum aukliku metallümbriku läbi sademete eest kaitstud, õhutõmbe eest aga mitte suletud ei olnud“. Tuulevaatlus toimus katusest 3,5 m kõrgusel asunud „tuulerõhumise aparadi“ (anemodünamomeetri) abil, mis oli valmistatud A. Oettingeni juhatusel. Sademete mõõtmise viisi kohta puuduvad andmed kuni 15. novembrini 1866 („Viiekümneaastased keskmised...“, 1919).

Tegevus esimeses vaatluspaigas kestis vaid järgmise aasta 24. maini – Vallikraavi tänaval olid tingimused tuulemõõtmisteks ilmselt ebasobivad.



Joonis 1. Vaatluspaigad Tiigi tänaval: A. Vallikraavi tn 12 (2.12.1865 – 24.05.1866). B. Tiigi tn 10 (24.05.1866 – 15.11.1866). C. Tiigi tn 1 – (15.11.1866 – 31.12.1892). D. Tiigi tn 15 (1.01.1893 – 01.04.1926). („Viiekümneaastased keskmised...“, 1919).

Figure 1. Observation sites in Tiigi St: A. Vallikraavi 12 (2.12.1865 – 24.05.1866). B. Tiigi 10 (24.05.1866 – 15.11.1866). C. Tiigi 1 (15.11.1866 – 31.12.1892). D. Tiigi 15 (1.01.1893 – 01.04.1926).

Uueks Metobsi asukohaks sai lähedal asuv Hauboldti maja **Tiigi tn 10** (praegu asub sellel kohal ülikooli raamatukogu). Ka seal ei osutunud vaatlusolud sobivaiks. Vaatlused vältasid seal vaid ligi kuus kuud – 24. maist kuni 15. novembrini 1866.

Väga pika aja jooksul – üle 26 aasta – kestsid vaatlused A. Oettingeni majas **Tiigi tn 1** (see maja hävis maailmasõjas).

Esimestel aastatel olid vaatlustingimused päris rahuldavad, siis kasvasid puud ümbruskonnas kõrgemaks, samuti ehitati naabruses hooneid. Isegi sademetemõõtlat tuli paaril korral paigutada paremasse kohta hoovil ja aias.

Õhutemperatuuri mõõdeti Tiigi tn 1 hoone loodesuunas oleva akna külge 35 cm kaugusele kinnitatud termomeetritega. „Pimedatel päeva- ja aastaagadel valgustati termomeetri skaalat küünla tulega suure tuleklaasi abil” („Viiekümneaastased keskmised...”, 1919).

2. detsembril 1869 võeti kasutusele juba Augusti psühromeeter, mis asus moodsamates „kardümbrikutes”, st plekist žalusii-tüüpi varje all. Tuule mõõtmise toimus 3,5 meetri kõrgusel katusest algul Robinsoni, alates 1872. aastast juba uudse Oettingeni anemomeetriga.

1875. aastal toimusid mitmed olulised muutused Metobsi ajaloos. Kuigi raha uue observatooriumi ehituseks ei leitud, tehti edusamme ülikooli meteoroloogiliste ainete õpetamisel – asutati füüsilise geograafia ja meteoroloogia kateeder. Selle juhatajaks, samuti ka observatooriumi direktoriks määrati Johann Karl Weihrauch.

1877. kuni 1895. aastani õpetati geofüüsikalisi aineid ülikooli peahoone III korrusel asunud meteoroloogiakabinetis, siis tuli kolida Jaani (Ülikooli) ja Jakobi tänavate nurgal asuvasse majja (Liidemaa, 1992).

7. jaanuaril 1891. a. suri K. Weihrauch ja A. Oettingenil tuli veel kaheks aastaks asuda Metobsi juhtima.

Väga oluline ajajärk Metobsi ajaloos algas 1892. a suvel, kui observatoorium kolis Artur Joachimi venna teoloogiaprofessor Alexander von Oettingeni 1880. aastal tema enda plaani järgi ehitatud neogooti stiilis majja Tiigi tn 15. Kuna Alexander oli samuti suur loodusesõber, siis ta rentis oma maja torni ning katusekorrust välja Metobsile, esimest korrust aga Tartu loodusuurijate seltsile (joonis 2) (Oettingen, 1926).

Maja asus vallikraavi ääres, torn oli kõrgemal nii naabermajadest kui puudest, olles seega märksa sobivam koht vaatlusteks. Torn oli täielikult jäetud tuule mõõtmiseks, mitu ruumi olid ette nähtud observatooriumi töötajaile, instrumentidele, hiljem ka vaatlejate eluruumideks (Liidemaa arhiiv, TÜ KHO, 130-18).

Pärast A. J. v. Oettingeni lahkumist venestatud Tartu ülikoolist Saksamaale 1893. aasta suvel sai Metobsi direktoriks Boris Golitsõn. Sel ametipostil sai ta tegutseda vaid ühe semestri, kui siirdus tööle Peterburi.

Nüüd algas üle 24 aasta (1894–1918) kestnud prof Boris Sreznevski „valitsusaeg”. Ta määrati ülikooli korralise professori, füüsilise geograafia ja meteoroloogia kateedri juhataja ning Metobsi direktori kohale.

B. Sreznevski oli tuntud teadlane mitmes valdkonnas: geofüüsikas, sademete klimatoloogias, sünoptilise meteoroloogias jne. Sreznevski võttis esimesena kasutusele külmalaine mõiste ja juurutas rea teisigi tänapäeval nii tavalisi termineid. Kliimauurimuste eest anti Sreznevskile Vene Geograafi Geograafiseltsi väike kuldmedal. Tema juhtimisel alustati 1904. a ka päikesekiirguse mõõtmisi, spetsiaalseid pilvede vaatlusi, kõrgemate õhukihtide uurimist õhupallide ning tuulelohede („tuulemadude”) abil üles lastavate meteorograafidega (Liidemaa, 1992).



Joonis 2. Tartu ülikooli meteoroloogia observatoorium Tiigi tn 15 (TÜ ajaloomuuseumi kogu).

Figure 2. Meteorological Observatory at Tiigi Street 15.

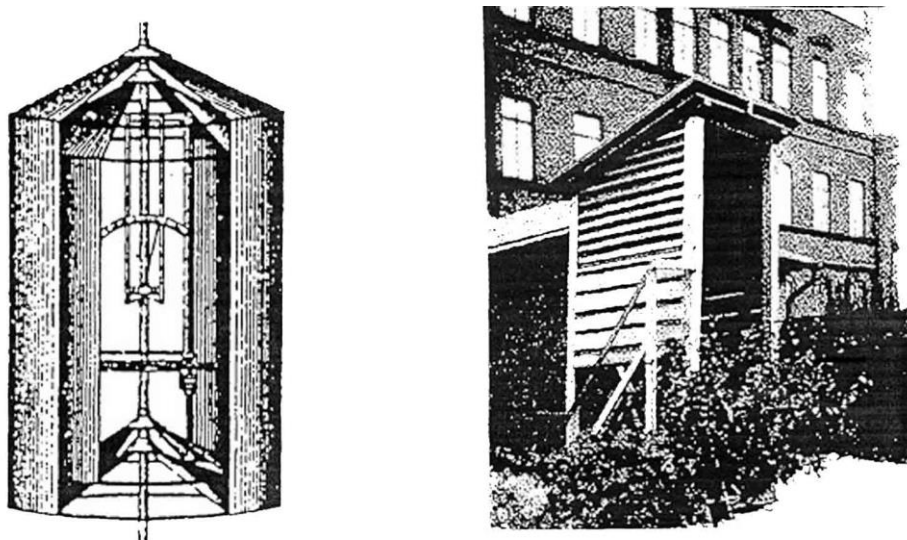
Ilmamõõtmistest Metobsi hoones Tiigi 15.

Tuule mõõtmiste käekäigust observatooriumis on andnud hea ülevaate T. Pung (Pung, 2006). Kõigi meteoroloogiliste elementide mõõtmine kulges omapäraselt, uuen-
duste läbi.

Esimeste kuude jooksul uues observatooriumi asupaigas mõõdeti õhutemperatuuri sarnaselt varasemale – plekist „kardümbrikutes” Augusti psühromeetriga. „Et termomeetrite ülesseadmine uues observatooriumis mitte rahuloldav ei paistnud, hakati vaatlusi 1. juulist 1894 Assmann’i aspiratsioon-psühromeetri abil toime panema, mida ühest põhjapoolsest torni aknast lati abil 3,75 meetri kauguses hoonest eemale ulatati ja pikksilma abil ära loeti. Lati otsa kinnitatud elektrilambike valgustas psühromeetrit pimedal ajal” („Viiekümneaastased keskmised...”, 1919).

Termograaf, samuti maksimum- ja miinumtermomeetrid asetsesid Wildi onnis, hoone tõrvatud katuse osal 8,8 m kõrgusel (TÜ KHO 130-18). Too Wildi tüüpi onn erines praegu kasutatavast Stevensoni onnist (joon 3).

Maja hoovile paigutati 1. jaanuaril 1893 ka Nipheri tuulekaitsega sademetemõõdla maapinnast kahe meetri kõrgusele. Kuna aga varsti hakkasid puud instrumenti varjutama, viidi see samuti hoone katusele onni juurde 11,3 m kõrgusele maapinnast. Nagu kõigi Metobsi mõõdtekohtade muutuste puhul, nii tehti ka siin paralleelvaatlusi, seega hoovil ja katusel. Alates 1899. aastast talletati vaid viimases paigas, s.o katuselt saadud andmeid.



Joonis 3. Wildi tüüpi meteoroloogilised onnid (vasakul metallist, paremal puust) (Heino, 1994).

Figure 3. Wild's screens (left – metal, right – wooden) (Heino, 1994).

Kui lumikatte kestuse vaatlusi alustati 1890. aasta sügisel, siis selle paksuse mõõtmisi alles 1896. aastal, alguses observatooriumi hoovil, alates 1897. aasta lõpust aga Toomemäel. 1. jaanuaril 1910 tuli ka sealt ära kolida linna äärde eraülikooli hoonete lähedale (praegusele Näituse tänavale), sest Toomel „publikum, iseäranis koolinoorus seda kohta ikka sagedamini tarvitama hakkas” (Viiekümneaastased keskmised..., 1919).

Esimene maailmasõda ei jätnud puudutamata samuti siitkandi ilmauurijaid: Eesti territoorium okupeeriti 1918. aasta algul Saksa sõjaväe poolt, osa Tartu ülikooli vara evakueeriti Voroneži. Sinna lahkus ka Boris Sreznevski.

1918. aasta oktoobris-novembris juhtis observatooriumi tööd ülikooli (Landesuniversität zu Dorpat) loengute kõrval kuulus saksa geofüüsik Alfred Wegener (Lüdecke et al, 2000). Detsembris, pärast Saksa vägede lahkumist, võttis asutuse juhtimise üle Konrad Koch, kes oli varemalt töötanud prof Sreznevski assistendina.

Varade üleandmise aktis 16. veebruarist 1919 „Tartu Ülikooli Hoolekandja Herrale” teatavad Metobsi juhataja K. Koch ja „esimene valvaja“ W. Kurrik, et on tarvitusel aparate (alates suurest Oettingen-Schultze anemograafist ja lõpetades rehendamismasin „Thomas”ega). Peale nende oli kasutuses veel 14 lauda, 12 tooli, 5 kappi, 4 riiulit, 2 sohvad, 2 süngi ja 1 peeglit. (EAA 2100-6-287, l. 40). Dotsent K. Koch juhtis Metobsi tööd kuni 1925. a. märtsini.

3. Metobs Juhan Liivi tänaval

Oluliseks etapiks Eesti ilmateenistuse ajaloos oli Metobsi üle toomine 1926. aastal selle vanast asukohast Tiigi tänaval 299 m kaugusele Juhan Liivi (Hetzeli, ka Hetseli) tänavale majja nr 1 (praegu nr 4). Kuni selle ajani puudus piirkonnas tänapäeva mõistes meteoroloogiline vaatlusväljak. „Observatooriumi ületoomisega avanes võimalus otstarbe-

ning nõuetekohaselt paigutada seniseid mõõtmisriistu ning laiendada tegevust uute vaatlusaladega“, kirjutas järgmine Metobsi direktor, Eesti tuntuimaid klimatolooge Kaarel Kirde (enne 1935. a Karl Frisch). Õhutemperatuuri ja sademete mõõtmine toimus ju seni 11 meetri kõrgusel katusel, ja mis oli oluline – ilmajaam asus eramajas (Kirde, 1938).

Ettevalmistused uude kohta kolimiseks võtsid aega mitu aastat. 1921. a arutati ülikoolis Metobsi üleviimist „ühiselumaja“, s.o tollase tudengite ühiselamu 4. korrusele. 1923. aasta novembris palus direktor K. Koch ülikooli valitsuselt samuti „umbes 6 ruutsülla suurust platsi ühiselumaja aias ehk hoovis II järgu meteoroloogia jaama instrumentide ülesseadmiseks lubada – eesmärgiks praktikantide harjutused assistendi juhatusel“ (EAA 2100-6-287, l. 136). Siiski ei jõutud veel vaatlusväljaku rajamiseni (Palm, 1992).

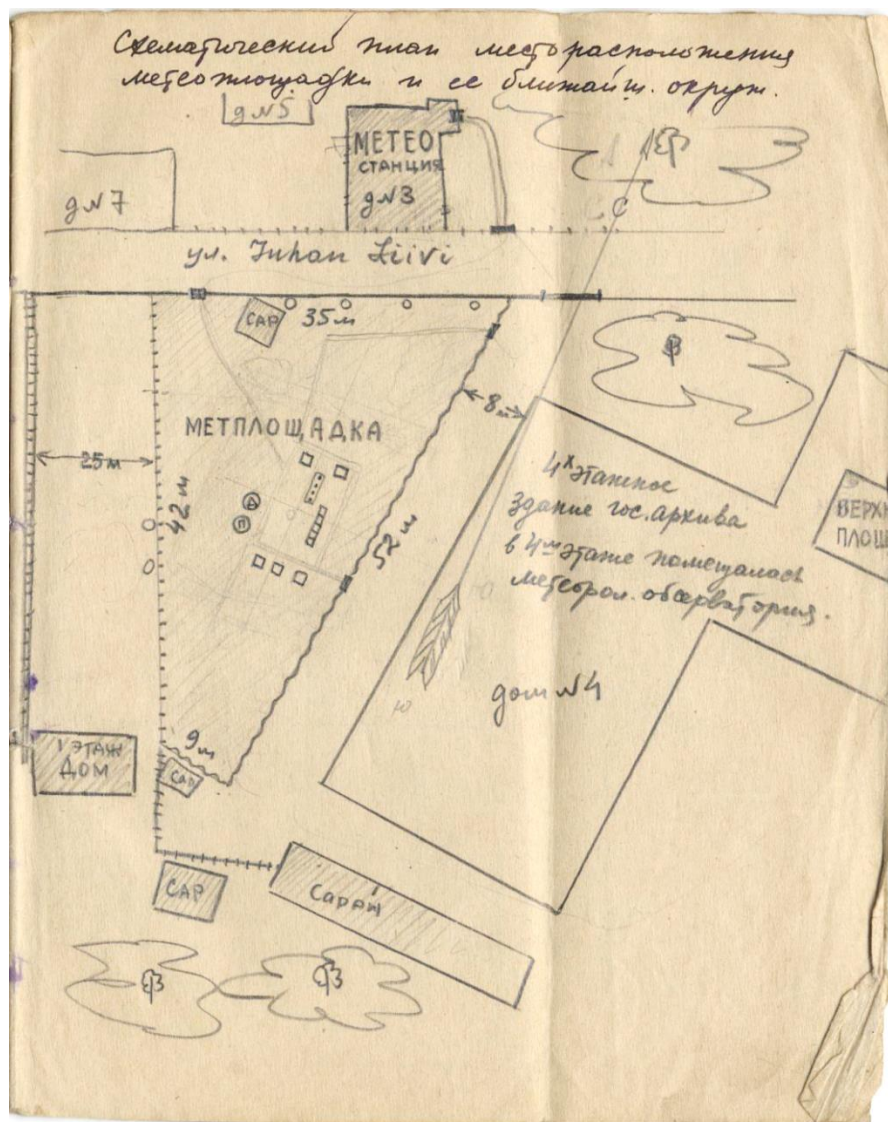
1924. aasta suvel sai ülikooli juhatus Erich Oettingenilt kirja, kus paluti majas Tiigi 15 observatooriumi ruumid vabastada aasta lõpul, sest „omanikule see korter ise enesele tarvis läheb“. Seepeale vastas ülikooli nõukogu, et hoone omanikul ei ole õigust enne 1925. aasta lõppu lepingust lahti öelda.



Joonis 4. Metobsi asukoht Liivi (Hetzeli) tn 1 (4) (TÜ KHO kogust).

Figure 4. Meteorological observatory at Liivi Street.

Uude kohta kolimine ei kulgenud kergelt. Esimesena jõudis 1921. aasta oktoobris Liivi tänava majja õppetegevusega seotud meteoroloogia kabinet. Metobs sai vaatlusteks vajaliku platvormi katusel ehk torni valmis alles 1925. a sügisel (joonis 4), paralleelmõõtmisteks vana asukohaga oli kavandatud aga vähemalt neli kuud. Vaatluste ametlikuks alguskuupäevaks uues vaatluskohas sai 1. aprill 1926.



Joonis 5. Meteoväljaku skeem aastal 1946. (Tartu MJ pass, 1946).

Figure 5. Observation site in 1946.

Observatooriumi ületoomisega avanes võimalus paigutada õhutemperatuuri ja sademete mõõteriistu nõuetekohaselt vaatlusväljakule 2 meetri kõrgusele maapinnast (Kirde, 1938). Uuendusi oli nii mõõdetavate ilmanähtuste kui instrumentide seas: alustati pinnase temperatuuri mõõtmist kuni 5 m sügavuseni, lume tiheduse määramist, seismoloogilisi ning õhu polarisatsiooni mõõtmisi jne. Uus Ängströmi pürheliomeeter Nr 197 olevat olnud täpsuselt Euroopas koguni teisel kohal! Väljaku puuduseks oli vaid asukoht hoonete läheduses, st halb horisondi kaetus (joonis 5).

Kord oli Metobsis range: „Direktor istus oma ruumis lahtise ukse juures ja kontrollis tulekut – kell pool 9 peab istuma oma kohal, sulle käes”, kirjeldas tööolusid H. Liidemaa (TÜ KHO 130-18, 132).

4. Aastad 1940 kuni 1952

Suured muudatused kaasnesid riigikorra muutustega järgnevatel aastail. Tartu Ülikooli Metobs hakkas 1940. aastal tööle Eesti NSV Hüdro meteoroloogia Teenistuse Valitsuse haldusalas Tartu Geofüüsika Observatooriumina. Üksiti mindi kolmelt vaatlusajalt (kell 7, 13, 21) üle neljale vaatlusajale (kell 1, 7, 13 ja 19).

Observatooriumi töötajate ülesandeks oli ka uute ilmavaatlusvõrgu töötajate välja õpetamine. Õppijaile maksti stipendiumi, kursuse lõppemisel pidid nad minema tööle, kuhu olid suunatud (Liidemaa, TÜ KHO 130-19).

Teise maailmasõja päevil – 1941.a sügisest kuni 1944.a septembrini – tegutses ilmateenistus Hamburgi hüdro meteoroloogia observatooriumi halduses. Metobs viidi tagasi ülikooli koosseisu. Pärast K. Kirde emigreerumist 1944. aastal jäid ilmavaatlusi korraldama tema noored kaastöötajad Helene Liidemaa ja Herman Mürk.

Sõjajärgsetel aastatel korraldas ilmavaatlusi ja prognoose Eesti ja Läänemere kohta Balti mere punalipulise laevastiku hüdro meteoroloogiateenistus. Aastatel 1944–1945 rajati viimase initsiatiivil mitu uut jaama, üks neist 17. septembril 1944. aastal Tartusse, ülikooli Metobsi väljakule!

Olukorda 1944. aasta augustis kirjeldas H. Liidemaa nii: „Augustis tulid venelased sisse. Enne seda aeti kõik inimesed Tartust välja. Ka mina läksin Äksi. Viibisin mõned nädalad maal. /.../ Tulin lõplikult Tartu. Läksin Metobsi (minul olid võtmed). Uks oli kinni löödud laudadega. Ülikoolist tuli üks töömees ja võttis ukse lahti. Hakkasin Metobsi korda tegema. Kõik oli segi aetud, mõned riistad lõhutud (aktinomeetria), puhas paber ja teised materjalid ära viidud. /.../ Hakkasin tegema vaatlusi. Oli vahepeal tekkinud mitme nädalane vaheaeg. Tükk aega töötasin üksi. Siis tuli arvutaja H. Lokko.” (Liidemaa päevik, TÜ KHO 130-19).

Ångströmi pürheliomeetri hävimine ning seismograafide evakueerimine Saksamaale on loetud Metobsi suurimateks materiaalseteks kaotusteks sõja ajal (Mürk, 1992).

„Vahepeal oli vastasmajja kolinud sõjaväe met. jaam. Nad tegid vaatlusi ka meie väljakul. /.../ Ka käisid nimetatud isikud Metobsi ruumides ja töötasid osaliselt seal. Nendega oli meil päris hea läbisaamine.”

Polnud ka mingi ime, et uued naabrid töötasid ajuti ülikooli ruumides, sest sõjaväelaste ilmajaama hoone (maja nr 3 joonisel 5) alumise korruse akendel puudusid klaasid. Selle jaama juhataja oli 15. novembrist 1944 Adolf Tubli (parteitu, läbinud kursused 1940. aastal, 2 aastat tööstaaži). (Tartu MJ pass, 1946).

Eesti ilmateenistuse fondis on 1945. kuni 1952. aastani tabelid vaatlusandmetega nii Metobsi kui Tartu meteojaamalt. Kuigi nad mõõtsid samade instrumentidega (isegi kaks vaatlusaega oli samad), on tulemused ajuti erinevad. Näiteks saadi 1945. aasta jaanuarikuu minimaalseks õhutemperatuuriks Metobsi vaatlajate andmeil $-21,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, Tartu MJ tabeli järgi aga $-19,7\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Igal juhul oli tegemist maailma kõige tihedama vaatlusvõrguga – kaks jaama mõnekümne ruutmeetrisel alal!

5. Metobsist aktinomeetriaaamaks

Eesti NSV Teaduste Akadeemia asutamisega 1946. aastal läks tema süsteemi üle ka geofüüsika observatoorium, kus jätkati regulaarseid meteoroloogilisi vaatlusi ja uurimustööd Eesti kliima alal. Jätkates prof K. Kirde aktinomeetriliste mõõtmiste traditsioone, otsustati observatooriumis laiendada nimetatud mõõtmisi kõigile tähtsamatele päikesekiirguse voogudele.



Joonis 6. Geofüüsika observatooriumi töötajaid aastal 1949 Liivi tänava hoone tornis. Esireas: majandusjuht Viktor Simm, tehnik Kidron, sünoptik Aleksander Ohu, teises reas: aktinometrist Eugen Medvedjev, arvutaja Helmi Lokko, juhataja Helene Liidemaa ja taga arvutaja Elsa Preem. (Tartu-Tõravere jaama fotokogu).

Figure 6. Employees of geophysical observatory in 1949.

Selgus, et maa-ala Liivi tänaval ei sobi aktinomeetriaväljakuks horisondi kaetuse ja Tartu linna häiriva mõju tõttu. Uueks sobivaks jaama asukohaks sai Riia maanteel Tartu kesklinnast 4 km kaugusel olev maa-ala (umbes praeguse Lõunakeskuse kohal), kus 1. jaanuaril 1950.a alustas aktinomeetriaaam oma regulaarset tööd. Samaaegselt eksisteeris TA Füüsika ja Astronoomia Instituudi koosseisus edasi geofüüsika observatoorium. (Ohvril, 1993).

1. märtsil 1952. aastal lõpetati Liivi tänava vaatlusväljakul meteoroloogilised mõõtmised nii geofüüsika observatooriumi kui ka hüdrometi süsteemi jaamades ja viidi need üle aktinomeetriaaama. Sealt koliti 1965. aastal Tõravere koos astronoomidega.

Praegu tegutseb Tartu Ülikooli Meteoroloogia Observatooriumi otsene järglane Eesti ilmteenistuses Tartu-Tõravere meteoroloogiajaamana, mis kuulub ühtlasi WMO päikesekiirguse mõõtmise baasjaamade auväärsesse nimistusse.



Joonis 7. Metobsi vaatlusväljak J. Liivi tänaval 1930ndatel aastatel (Tartu MJ pass, 1946).

Figure 7. Observation site in J. Liivi Street.

Kirjandus

- Bericht über die Verhandlungen des Internationalen Meteorologen-Congresses zu Wien 2. – 16. September 1873. Protokolle und beilagen. Wien: Hof- und Staatsdruckeri, 1873.
- Heino, R., 1994. Climate in Finland during the period of meteorological observations. Finnish Meteorological Institute Contributions, No 12.
- Humboldt, A. v. 1817. Des lignes isothermes et de la distribution de la chaleur sur le globe. Paris: Perronneau.
- Kirde, K. 1938. Tartu Ülikooli Meteoroloogia Observatooriumi arenemine ja teaduslik tegevus 1918–1938. Eesti Loodus, 1-2, 29–35.
- Kongo, L. 1977. Johann Karl Friedrich Weihrauch – Tartu ülikooli esimene füüsilise geograafia ja meteoroloogia professor. Tartu ülikooli ajaloo küsimusi V, 123–137.
- Kupffer, A.T. 1837. Observations météorologiques et magnétiques, faites dans l'Empire de Russie. St.-Pétersbourg: Académie des sciences.
- Liidemaa, H. 1992. Tartu Ülikooli Meteoroloogia Observatooriumi rajamine ja meteoroloogia areng Eestis aastatel 1865–1918. Teaduse ajaloo lehekülgi Eestist VIII, 63–79.
- Liidemaa, H. arhiiv. TÜ KHO 130-18.
- Lüdecke, 2010. Von der Kanoldsammlung (1717–1726) zu den Ephemeriden der Societas Meteorologica Palatinae (1781–1792). Meteorologische Quellen zur Umweltgeschichte des 18. Jahrhunderts. In: Popplow, M. (hrsg.). Landschaften agrarisch-ökonomischen Wissens. Strategien innovativer Ressouccennutzung in Zeitschriften und Sozietäten des 18. Jahrhunderts (Cottbuser Studien zur Geschichte der Technik, Arbeit und Umwelt, Bd. 30). Münster: Waxmann, S. 97–119.

- Lüdecke, Tammiksaar, E., Wutzke, 2000. Alfred Wegener und sein Einfluss auf die Meteorologie an der Universität Dorpat (Tartu). – *Meteorologische Zeitschrift*, 9(3), 175–183.
- Mürk, H. 1992. Meteoroloogia- ja klimatoloogiaalases uurimistööst Eestis 1920–1940. Teaduse ajaloo lehekülgi Eestist VIII, 80–98.
- Palm, H. 1992. Meteoroloogia õpetamisest Tartu ülikoolis aastatel 1919–1940. Teaduse ajaloo lehekülgi Eestist VIII, 99–122.
- Pung, T. 2006. Oettingeni anemograafist. Tartu Ülikooli ilmade observatooriumi 140. juubeli konverentsi ettekanded. *Publ. Geophys. Univ. Tartuensis*, 19–36.
- Tartu meteoroloogiajaama pass. 1946. Eesti Keskkonnaagentuuri fond.
- Tammiksaar, E. 2005. Trends in the development of meteorology at Dorpat university in the 19th century. – *Publicationes Instituti geographici Universitatis Tartuensis (Carl Kalk 200. Ajaloolise klimatoloogia sümposiumi)*, 97, 17–22).
- Tankler, H., Kuznetsova, Z. 1992. Tartu teadlased ja Venemaa meteoroloogiakeskus – Füüsika Peaobservatoorium. Teaduse ajaloo lehekülgi Eestist VIII, 7–29.
- Tarand, A. 1992. Meteoroloogilised vaatlused Eestis enne 1850. aastat. Teaduse ajaloo lehekülgi Eestist VIII, 30–50.
- Oettingen, A. v. 1926. Haus und Heimat. In: Eggers, Alexander (Hg.): *Baltische Lebenserinnerungen*. Heilbronn: Eugen Salzer Verlag, S. 169–182).
- Ohvril, H. 1993. Mis eelnes keskkonnafüüsika instituudile? Meteo.phys.ut.ee/kkfi/index_files/alinnas/Mis_eelnes.
- Viiekümneaastased keskmised meteoroloogilistest vaatlustest 1866–1915. 1919. Tartu Ülikooli Ilmade Observatoorium.
- Рыкачев М. 1899. Исторический очерк Главной физической обсерватории за 50 лет ее деятельности. 1849–1899. С.-Петербург: Императорская академия наук.

Different locations of the Tartu University Meteorological Observatory

Ain Kallis

Tallinn University of Technology and Estonian Environment Agency

Summary

This paper provides an overview of how different locations of the Tartu University Meteorological Observatory changed in the course of a ninety-year period.

The establishment of a meteorological station at Tartu University in 1865, (officially named the Tartu University Meteorological Observatory (Metobs) in 1876), opened a new era of systematic instrumental observations and continuous time series in Estonia. The first director of the Observatory was prof A. J. von Oettingen.

In 1865–1952, the Metobs changed its location in Tartu five times. 26 years were spent at Tiigi St 1; 33 years at Tiigi St 15 and 26 years at J. Liivi St 1. The observation site in J. Liivi Street was more up to the standards of the time. In the postwar years (1944–1952), the Metobs shared the site with the Tartu Meteorological Station.

Tartu-Tõravere Meteorological Station, which is now a member of the WMO Baseline Surface Radiation Network, can be considered as the successor of the Tartu University Metobs.

Tallinna Mereobservatoorium

Janet Laidla

Tartu Ülikooli muuseum

1. Sissejuhatus

Tallinna Mereobservatooriumil (1919–1920) on lühike, kuid sündmusterohke ajalugu. Observatooriumi tegevusest on ilmunud ülevaatlik populaarteaduslik artikkel Peedu Sammalsoo (2002) sulest ning pisteliselt on observatooriumi tegevust mainitud erinevates Eesti meteoroloogia ajalugu puudutavates artiklites. Käesoleva artikli eesmärk on anda ülevaade mereobservatooriumi ajaloost ja tegevusest. Kuna senistes lühikestes teadetes on käsitletud peamiselt observatooriumi meteoroloogiliste vaatluste korraldamist, on siin pisut suurema tähelepanu all observatooriumi astronoomiaalne tegevus. Artikli autor soovib tänada Arto Olli ja Erki Tammiksaart oluliste nõuannete ja viidete eest.

Artikkel põhineb Tallinna Mereobservatooriumi fondil 1663, mida säilitatakse Eesti Rahvusarhiivis, kuid mis pole täielik. Täiendavat materjali observatooriumi tegevuse kohta leidub ka teistes sõjaväe ja riigiasutuste fondides ning Tartu ülikooli isikutoimikutes. Allikmaterjal on lünklik ning kuna observatooriumi tegevus näis olevat osalejatele piisavalt rutiinne, avavad allikad igapäevast tegevust pigem ainult juhtudel, kui tegevus ei vastanud nõuetele või oli oodata uuendusi. Seetõttu ei ole ka siin võimalik vastata kõikidele uurijat huvitavatele küsimustele.

2. Tallinna Mereobservatooriumi asutamine

19. sajandi esimesel poolel leiti Venemaa keisririigis meteoroloogiale rakendust põhiliselt meresõidu arendamisel. Oluline panus meteoroloogia arengule Venemaal oli Adolph Kupfferil (1799–1865), kelle initsiatiivil asutati 1835. aastal Mäeinstituudi juures Peterburis Normaalsobservatoorium. Kupffer laiendas meteoroloogilist tegevust ja vaatlusi ka Mereministeeriumi süsteemis. 1849. aastal asutati Venemaa meteoroloogiakeskuseks kujunev Füüsika Peaobservatoorium. Esimese maailmasõja ajal muutus meteoroloogia Venemaal sõjaliselt oluliseks valdkonnaks. 1915. aastal loodi Sõjameteoroloogia Peavalitsus (Glavmet), mida juhtis Boriss Golitsõn (Tankler jt, 1992). Tallinnas asus juba 19. sajandi teisest poolest I astme vaatlusjaam, mis allus mereministeeriumile ning mille tegevuse jätkajaks Tallinna mereobservatooriumi võib pidada (Pae, Tammiksaar, 2016 käesolevas kogumikus).

Ranna-, Side- ja Päästevalitsuse alluvuses olev meteoroloogiajaam loodi veebruaris 1919 merejõudude juhataja päevakäsuga 46. Selle ajutiseks ülemaks määrati professor Erich Schönberg ning tema abiks ajutiselt meteoroloog Vladimir Ivanov (ERA.527.1.1).

Meteoroloogiajaam loodi ajal, mil Eesti Vabadussõda oli kestnud vaid mõned kuud. Paralleelselt maavägede formeerimisega, ehitati üles ka mereväge eesotsas ülemjuhataja Johan Pitka ja staabiülema kapten-leitnant Herman Salzaga. Esimeseks Eesti mereväe aluseks oli sakslaste kaudu eestlastele jäänud suurtükilaev, mis sai nimeks „Lembitu.“ Reaalselt kaitses Tallinna sadamat Vabadussõja ajal Suurbritannia laevastik. Inglise

püüdsid kinni kaks Vene miiniristlejat ning andsid need üle Eesti mereväele. Nende aluste nimeks said vastavalt „Vambola“ ja „Lennuk“ (Eesti Vabadussõda, 1937).

Mereilma prognoosid olid olulised nii mereväe tegevuse kui kaubanduse seisu- kohast. Eestlased said 1918. aasta detsembrist alates sõjasaagina neli bolševistliku Venemaa lipu all sõitvat laeva, mis vedasid Londonisse lina- ja puitu. Vastu saadi toidu- aineid, mida Eestil oli hädasti vaja. Korrapärane kaubavahetus Eesti ja välismaa vahel taastus 1919. aasta veebruari lõpus (Eesti Vabadussõda, 1937).

Samal ajal alustas tegevust ka mereilmajaam. Meteoroloogiajaam vajas tegevuse käimalükkamiseks korralikke ruume ning elementaarset mööblit. Märtsi esimesel nädalal katsetati meteoroloogilisi instrumente ja kronomeetreid ning seati kokku kavad nii meteoroloogilisteks vaatlusteks kui õige aja teenistuseks. Eeskujuks võeti Peterburis asunud Nikolai peaabseeriumi varasemad ringkirjad ja ettekirjutused. Korralised vaatlused algasid 2. märtsil 1919. Nende käigus mõõdeti või määrati õhurõhku, -tempe- ratuuri ja -niiskust, pilvisust, sademete liiki, tuule suunda ja kiirust. Vaatlusi tehti kolm korda päevas: kell 7 hommikul, kell 13 pärastlõunal ja kell 21 õhtul. Tartu ülikooli meteo- roloogiaabseeriumist ja mujalt otsiti teateid teiste meteoroloogiajaamade kohta. Ülem Erich Schönberg sõitis 18. märtsil Soome, et hankida uusi vajalikke instrumente ja vaatlusjuhendeid ning katsetada elavhõbeda termomeetrit (ERA.528.1.8).

14. mail nimetati meteoroloogiajaam ümber Tallinna Mereabseeriumiks, mille juhatajaks jäi Erich Schönberg. Meteoroloogiajaama ümberkorraldamisest mereabseeriumiks tekkis töös seisak, mis oli tingitud kolimisest suurematesse ruumidesse (ERA.1663.1.3). Lisaks oli võimalik suurendada mereabseeriumi personali.

3. Tallina Mereabseeriumi tegevus

Tallinna mereabseeriumi põhitegevuseks oli mereilma ennustamine ja õige aja edasi andmine maa- ja merejõududele (Kirde, 1938). Iseenesestmõistetavalt huvitas mereväe peamiselt ilmastikuolukord merel ning seda arvestati erinevate operatsioonide kavandamisel ja läbiviimisel. Lisaks saadeti ilmateateid vähemalt alates 1919. aasta juunist ka ülemjuhataja staapi ja lennuväe ülemale (ERA.1663.1.3). Aja jooksul kavandas noor abseerium endale ambitsioonikamaid ülesandeid, eriti astronoomiliste vaatluste alal, mis sulgemise tõttu jäid siiski tegemata.

Tallinna mereabseeriumi käsutuses oli kaks hoonet. Üks asus Salongi (praegu Weizenbergi) tänav 16, milles asus kantselei, juhataja, astronoomi ja jaamade inspektori kabinet ning raamatukogu ja töökoda. Lasnamäel nn vaatluste majas ja Valge tuletorni all olid telegraaf, telefon, meteoroloogia osakond koos meteoroloogia- ja astronoomiariistadega (ERA.1663.1.3). Kui kõigeks muuks olid ruumid sobilikud, siis astronoomi tööks olid tingimused sobimatud. Ilma sobiva vaatlustornita pidi astronoom passaažiriista igal õhtul õue viima ja betoonpostile asetama. Selline edasi-tagasi liikumine aga vähendas ajamääramis- tulemuste täpsust, millest küll telegraafi ja raudtee jaoks piisas (ERA.1663.1.3). Kui aga mereabseerium oleks hakanud kaugsõidukaptenite kronomeetreid võrdlema, siis oleks ajamääramine pidanud olema täpsem. Abseeriumi juurde kavandati ka masti, mille tipust iga päev kell 12 Greenwichi aja järgi lastakse alla suur pall, mille järgi laevad saavad oma ajamõõtjaid korrigeerida. Lisaks plaaniti ehitada eraldi hoone, milles on sobivad köetud ruumid kronomeetrite jaoks, lahtikäivate luukidega kõik passaažiriista jaoks ning pööratava kupliga torn, mille ehituse põhjenduseks toodi aruandes seda, et siis

oleks võimalik määrata observatooriumi täpsed geograafilised koordinaadid. Viidati ka võimalusele tulevikus sellist observatooriumi õppeeesmärkidel kasutada (ERA.1663.1.3). Tegelikult oli Lasnamäel Valge tuletorni läheduses asunud ühekordne puidust observatoorium, milles oli esik, vaatleja tuba ja alussammastega vaatlusruum, kuid see oli 19. sajandi keskpaigast alates kõdunenud ja varemetes. Hoone ehitati üles pea sama koha peale alles 1921. aastal kui koostati uut geodeetilist võrgustikku. Nende tööde juhataja oli taas Erich Schönberg (Vuuk, 1955).

Üldjuhul observatooriumi materjalid vaatlustegevust ei kajasta. Alguses paika pandud vaatlusrutiini ja ilmakaartide koostamist muudeti kas mõne uue instrumendi või käsu järel. Sünoptikud koostasid ilmaennustusi ja ilmakaarte mitu korda päevas, kuid laiali saadeti enamasti vaid kord päevas (Sammaloo, 2002). Võrdlevaid ilmateateid saadi Skandinaaviast ja Soomest, alates juulist 1919 saadeti neid Helsingisse ka vastu (ERA.1663.1.3).

Tallinna mereobservatoorium rajas uusi ja haldas olemasolevaid II järgu vaatlusjaamu Pärnus, Kundas, Vilsandil, Narva-Jõesuus, Kiltsis ja Vaindloo tuletornis. Arutati ka Viljandisse jaama loomist. II järgu jaamade ja seal asuvate instrumentide taatlemise ja hooldamisega tegelesid põhiliselt instrumentide osakonna juhataja ja inspektor (ERA.1663.1.1, ERA.1663.1.3, Sammaloo 2002).

Lisaks ilmateadetele tegutses mereobservatooriumi juhtimisel ka Eesti õige aja teenistus. Põhiliselt tegeles sellega astronoom, keda sel otstarbel teenistuses peetigi. Astronoomi kohuseks oli iga päev hommikul esimese asjana võrrelda erinevaid kronomeetreid, seejärel kell 12 anda õige aja signaal ning vähemalt kord päevas raadio teel võtta vastu ajasignaal Eiffeli ja Naueni sidejaamadest. Õiget aega pidi astronoom kontrollima vähemalt kord nädalas ka tähistaeva liikumise järgi (ERA.1663.1.1). Sammaloo toob esile õige aja määramise kohalike vaatluste abil, kuid suure tõenäosusega olid olulisemad Eiffeli ja Naueni raadiosignaalid. Tartu tähetorni tegevusaruanded aastatest 1919–1940 viitavad, et õige aja määramisega kohalike instrumentide abil tegeleti peamiselt hobi-korras ja määravaks olid raadio teel saadud ajasignaalid (EAA.5374.1.351). Vaevalt, et olukord Tallinnas veelgi sobimatute tingimuste korral oleks olnud erinev. Kui mereobservatoorium oleks tõesti andnud täpset aega ka kaugsõidulaevade kronomeetritele, siis oleks kohalike astronoomiliste mõõtmiste tähtsus ehk suurenenud.

Juulist 1919 saadeti nii ilmateadet kui õiget aega edasi telegraafiinide ühendamisel. Kava järgi ühendati viis minutit enne keskpäeva kõik Eestis olevad telegraafiinid observatooriumis asuva telegraafiaparaadiga, mille järel edastati nii õige aja signaal kui ka järgmise päeva ilmaennustus. Samuti anti Balti jaamast raudtee telegraafiini mööda sama teave suurematesse raudteejaamadesse laiarööpalise raudtee ääres ja Sadama jaamast telefoni teel kitsarööpmelise raudtee jaamadesse (ERA.1663.1.3). Ülemjuhataja Johan Laidoneri käsul tuli ilmateateid iga päev väeosade lähistel asuvates asulates nähtavasse kohta välja panna, et eraisikud neid samuti lugeda saaks (ERA.1663.1.1).

Koostööd tehti Tartus asuvate astronoomia ja meteoroloogia observatooriumitega. Mõlemast saadi laenuks instrumente, kirjandust ja nõuandeid (ERA.1663.1.1; ERA.1663.1.3). Välisriikidest suheldi eelkõige Soome ja Skandinaavia ilmajaamadega. Soomega aitas kontakte luua Eesti saadik Oskar Kallas. Norraga peeti kirjavahetust, et sealtkaudu saaks edastada Islandi ja Fääri saarte ilmateateid Eestisse. Taani meteoroloogia instituudiga suheldi seoses ilmateadete väljasaatmisega ja sooviti kursis olla nende poolt välja antud trükistega (ERA.1663.1.3).

4. Instrumendid

Mereobservatooriumi likvideerimisel koostatud nimekirjast nähtub, et lühikese tegevusaja jooksul oli observatoorium kogunud arvestatava hulga instrumente. Mitmed neist olid küll vaid teistest asutustest laenuks saadud. 1919. aasta veebruari keskel saabusid Tartu ülikoolist passaažiriist ja kolm kronomeetrit. Kuu lõpus lisandus Narva merekoolist sekstant, astronoomiline pikksilm ning taevagloobus (ERA.1663.1.1). Mais 1919 olid observatooriumis ja sellele alluvates jaamades regulaarses kasutuses baromeeter, barograaf, termograaf, termomeeter, (ka miinimum- ja maksimumtermomeeter), psühromeeter, hügromeeter ja anemomeeter (ERA.528.1.8). Tallinnas kasutati ka kronomeetreid ja passaažiriista õige aja teenistuse jaoks. Likvideerimiskomisjoni nimekirjad näitavad lisaks näiteks heliograafi, anemograafi, nefoskoobi, teodoliidi ja teiste instrumentide olemasolu (ERA.1663.1.12). Tuleb meeles pidada, et osa nimekirjas olnud instrumente oli kasutuses ka II järgu jaamades.

Kalleid, kuulsate instrumendivalmistajate tehtud teadusriistu annetas mereobservatooriumile baltisaksa ärimees ja amatöörastronoom Edgar Hoepfener, kellelt saadi näiteks Londoni ettevõtte John Barwise astronoomia kronomeeter ning 19. sajandi algusest pärinev kuulsa Saksa optiku Fraunhoferi komeediotsija ehk väike läätseskoop (ERA.1663.1.1). Estonia puiesteel asuvas elumajas eraobservatooriumi omanud Hoepfener kinkis riistad tõenäoliselt seetõttu, et elumaja läks müüki (Vuuk, 1955). Observatooriumi instrumente (v.a kronomeetreid) hooldas palgal olev mehaanik (ERA.1663.1.1; ERA.1663.1.3).

5. Koosseis

Lühikese tegevusaja jooksul jõudis mereobservatooriumist läbi käia üle kahekümne töötaja. Ametitest olid esindatud juhataja, sünoptik, instrumentide osakonna juhataja, hüdrometeoroloog, aeroloog, revident, kirjutajad, vaatlejad, raadiotelegrafist, käskjalad, mehaanik ja sünoptiku abi. Juhataja, sünoptiku, hüdrometeoroloogi ja astronoomi ametikohtadel eeldati nähtavasti kõrgemat (ja soovitatavalt erialast) haridust. Lisaks pakuti ka võimalust oma teadmiste täiendamiseks (ERA.1663.1.1; ERA.1663.1.8).

Observatooriumi võtmeisikud olid juhid Erich Schönberg (1882–1965) ja Karl Frisch (Kaarel Kirde, 1892–1953), sünoptikud Voldemar Kurrik (1878–1925) ja August Tõllassepp (1885–1970, vt pikemalt Pae ja Tammiksaar, 2016 käesolevas kogumikus), astronoom ja Tallinna Õpetajate Seminari direktor Villem Nano ning instrumentide osakonna juhataja, hilisem Tartu tähetorni juhataja Taavet Rootsmäe (1885–1959). Pikemalt kirjeldame kahe juhataja – Schönbergi ja Kirde – elukäiku.

Esimeseks mereobservatooriumi juhiks oli Erich Karl Wilhelm Schönberg (ka Schoenberg, sünd 27.12.1882 Varssavis, surn 23.02.1965 Münchenis). Ta õppis Varssavi gümnaasiumis ning töötas seejärel Riia laevatehases ning kavatses astuda merekorpusesse. Schönberg õppis ka tsaar Nikolai nimelises mereinseneride kutsekoolis Kroonlinnas enne kui ta 1902. aastal astus Varssavi ülikooli füüsika-matemaatikateaduskonda. Pärast Varssavi ülikooli sulgemist üliõpilaste revolutsioonilise tegevuse tõttu 1905. aastal, õppis Schönberg lühikest aega Strasbourgis (Želnin, 2004; Pustõlnik 2006). Juba 1905. aastal sügisel astus ta Tartu keiserlikku ülikooli füüsika-matemaatikateaduskonda, mille ta lõpetas 1907. aastal kandidaadi kraadiga (EAA.402.1.29407).

1907. aastal asus Schönberg tööle Tartu tähetorni assistendina. Järgnevalt täiendas ta end Saksamaal Kielis, kus kaitses 1912. aastal doktoridissertatsiooni. Vene impeerium

ei tunnustanud Saksa teaduskraade, mistõttu pidi Schönberg 1918. aastal kaitsma siin teadusmagistri kraadi. Kui tähetorni toonane juhataja Konstatin Pokrovski sõitis 1915. aastal tähetorni varadega Nižni Novgorodi ja sealt edasi Permi, sai Erich Schönbergist realselt tähetorni põhihaldaja (Želnin, 2004). Schönbergi uurimisteedeks oli tähetorni geograafiline laius ja põhjapooluse korrapärase liikumine ning heleduse jaotumine Saturni rõngastel ja Jupiteri kettal. 1916. aastal sõitis ta lühikeseks ajaks Pulkovo observatooriumi, et kasutada sealseid vaatlusriistu (Pustõlnik, 2006).

Veebruaris 1919 sai Schönberg meteoroloogiajaama juhiks ning mais Tallinna Mereobservatooriumi juhatajaks. Juulis vabastati ta sellest ametist teadmata põhjusel. Seejärel koostas ta koos Hjalmar Mäega projekti observatooriumi rajamiseks Nõmmele Glehni lossi juurde, mis pidi oma tähtsuse poolest ka Tartu tähetornile silmad ette andma (Lõhmus jt, 2008). Sama aasta detsembris võeti Schönberg hüdroloogia, lootside ja tuleornide valitsuse juurde astronoom-geodeedi kohusetäitjaks (ERA.1662.1.7).

Alates 1920. aastast jagas ta end Soome ja Eesti vahel, viies Eesti sõjaväe topograafilise osakonna koosseisus läbi astronoomilis-geodeetilisi uuringuid Loode-Eestis (mis jäid kahjuks lõpetamata). 1925. aastal kolis ta koos soomlannast abikaasaga Saksamaale ning juhatas aastail 1926–1943 Breslau (nüüd Wrocław) observatooriumi. 1943. aastal sõitis ta Teise maailmasõja tõttu Münchenisse, kus ta töötas oma surmani 1965. aastal (Želnin, 2004, Pustõlnik 2006). Münchenis jätkas ta Tartus alustatud fotomeetriste töödega (Wilkens, 1965).

Schönbergi järel sai 1. juulil juhataja kohusetäitjaks Kaarel Kirde (kuni 1935. aastani Karl Frisch, sün 14.11.1892 Pärnu maakonnas Halinga vallas, surm 25.05.1953 Northfieldis, Ameerika Ühendriikides). Kirde õppis Pärnu gümnaasiumis, mille lõpetamise järel 1913. aastal astus ta Tartu keiserlikku ülikooli füüsika-matemaatikateaduskonda matemaatika osakonda. Kirde lõpetas ülikooli kandidaadikraadiga 1918. aastal ning talle tehti juba siis ettepanek asuda tööle ülikooli juures ja evakueeruda ülikooliga Venemaale, kuid ta ei saanud väljasõiduluba (EAA.2100.2.341, Aruksaar, 1992).

Vabadussõja ajal mobiliseeriti Kirde rahvaväkke. Tema sõjaväeteenistus algas 14.12.1918, kuid reaalsest sõjategevusest Kirde osa ei võtnud. Enne mereväge teenis ta insenerpataljoni tööroodu kirjutajana ja suurtükiväe tagavarapataljonis. Märtsis 1919 viidi ta merejõudude staapi ja määrati rannavalve-, side- ja päästejaamade valitsusse. 14. mail nimetati ta mereobservatooriumi hüdrometeoroloogiks ja seejärel mereobservatooriumi juhataja ajutiseks kohusetäitjaks (ERA.495.7.1849).

Kirde kibeles tagasi ülikooli ja palus endale augustis 1919 määrata abiraha, et ennast professori kutseks ette valmistada. Kuigi ülikool tema püüdlusi toetas, ei lubanud merevägi teda enne sõja lõppu ametist vabastada. Pärast teenistusest vabastamist astus Kirde kuulsa meteoroloogi Alfred Wegeneri vahendusel Saksamaale Hamburgi ülikooli (Lüdecke jt, 2000), kus ta kirjutas ja kaitses väitekirja „Die Schichtgrenzen in der freien Atmosphäre“. Eestisse tagasi tulles töötas Kirde esmalt põllumajandusmeteoroloogia võrgu juhatajana, mis liideti hiljem ülikooliga. Ülikoolis alustas Kirde eradotsendina ning 1925. aastal määrati ta meteoroloogia ja geofüüsika dotsendiks viieks aastaks, 1930. aastal sai ta meteoroloogia ja geofüüsika erakorraliseks professoriks, mis muudeti 1933. aastal korralise professori kohaks (EAA.2100.2.341). 1944. aastal põgenes Kirde Eestist. 1944–1945 oli ta Poolas, seejärel kuni 1950. aastani Saksamaal ning 1950–1953 Ameerika Ühendriikides, kus ta suri (Kals, 1993). Kirde oli silmapaistev teadlane ja Eesti meteoroloogiajaamade võrgustiku rajaja.

6. Tegevuse lõpetamine

Jaauari lõpus 1920, vahetult enne Tartu rahu sõlmimist, arutasid Eesti Asutava Kogu rahaasjanduse komisjon ja Haridusministeerium mereobservatooriumi edasist saastust. Sõjamineerium taotles raha mereobservatooriumi laiendamiseks, kuid rahaasjanduse komisjon leidis, et observatoorium võiks asuda Tartu ülikooli juures. Haridusministeerium vastas, et ülikooli juures juba eksisteerib observatoorium ning mõistlik oleks Tallinnasse jätta meteoroloogiajaam ning observatoorium sulgeda (ERA.1108.1.69).

Vähemalt märtsi alguses oli plaan mereobservatooriumi väljaheitamiseks endiselt laual, kuid 16. märtsil 1920 arutati sõjamineeriumis mereobservatooriumi ja hüdrograafia osakonna küsimusi ning otsustati, et hüdrograafia osakond jääb merejõudude juurde, üks aeroloog läheb lennue teenistusse ja merekaartide trükkimine jääb topograafia osakonna ülesandeks. Ülejäänud osas tuleb mereobservatoorium üle anda Tartu ülikoolile. Esialgse plaani kohaselt pidi tähetorn lisaks õige aja teenistusele üle võtma ka ilmaennustuste koostamise ja edastama järgmise päeva ilmateated kella neljaks kõikidele rannapunktile (ERA.31.1.756).

Likvideerimiskomisjon, koosseisus leitnant Leimann, professor Schönberg ja sünoptik Kurrik, alustas aga tööd alles aprillis 1920. Mereobservatooriumi varad teaduriistade ja dokumentidega tuli juhatajalt üle võtta ning mereväe hüdrograafia osakonna ja Tartu ülikooli vahel ära jagada (ERA.1663.1.12).

Aprilli alguses esines hüdrograafia osakond nõudmisega, et osa astronoomilisi instrumente jääks nende kasutada. Tartu ülikooli esindajad Taavet Rootsmäe ja Georg Konrad Koch vaidlustasid selle soovi, sest esialgne kokkulepe oli näinud ette teisiti (ERA.1663.1.13). Tekkinud vaidlus jõudis peaministri tasemele, kes saatis sõjamineeriumile kirja, milles ta nõudis riistade üle andmist ülikoolile. Hüdrograafia osakond saaks neid omakorda ülikoolilt vastastikuse kokkuleppe alusel laenuks (ERA.31.1.1516), mis ka toimus (EAA.5374.1.351). Schönbergi kaitseks astus välja V. Kurrik, kes kirjutas 14. aprillil peaministrile, et kuna Tartu tähetornil on juba mitmeid astronoomilisi instrumente, võiks hüdrograafia osakonnale (kui seal juba astronoom töö on) jätta instrumendid, sest ilma nendeta pole tal seal midagi teha (ERA.31.1.756). Likvideerimiskomisjoni poolset asjade käiku peegeldavad mereobservatooriumi materjalid säilikus ERA.1663.1.13, mille põhjal võiks pidurdajateks pidada ülikooli esindajaid. Ülikooli poolne aruanne on säilikus ERA.31.1.1516, mille järgi olid viivitajad likvideerimiskomisjoni liikmed.

Kaarel Kirde vabastati oma kohalt 4. mail 1920 (ERA.495.7.1849) ning sellega võib lugeda mereobservatooriumi tegevust lõpetatuks.

7. Kokkuvõte

Tallinna Mereobservatoorium loodi ja laienes Eesti Vabadussõja tingimustes sõja ning oma esimesi samme tegeva riigi vajadusi ja võimalusi silmas pidades. Vabadussõja lõppedes lõppes ka observatooriumi tegevus. Rahuajal jäid sõjaväe juurde väiksemad ametkonnad ning kulude kokkuhoiu eesmärgil ja dubleerimise vältimiseks võtsid teadus- ja õppetegevuse üle Tartu ülikooli juures asuvad meteoroloogia ja astronoomia observatooriumid, mis sel perioodil jõudsalt arenesid. Mitmed mereobservatooriumis töötanud inimesed jätkasid erialast tööd Tartu tähetornis või meteoroloogiaobservatooriumis. Iseisva Eesti ilmaennustuse ja õige aja teenistuse seisukohast oli mereobservatoorium küll lühike, kuid mitte vähetähtis peatükk.

Kahtlemata vajaks Tallinna Mereobservatooriumi ajalugu veelgi põhjalikumat uurimist. Huvitav oleks asetada mereobservatooriumi tegevus Vabadussõja konteksti või võrrelda selle tegevust teiste riikide kaasaegsete mereobservatooriumitega. Segane on ka kahe observatooriumi – Tallinna Mereobservatooriumi ja Tartu Meteoroloogiaobservatooriumi – omavaheline suhe ja staatus, sest kuigi ressursse võidi suunata Tallinna, tegutseti realselt samaaegselt mõlemal pool.

Viited ja kirjandus

Riigikantselei.

ERA.31.1.756 Isikute ja riigiasutuste ettepanekud ning valitsuse korraldused side ja transpordi taastamise, vabariigi võidulaenu realiseerimise, Tallinna Mereobservatooriumi valdaja määramise ja teistes küsimustes.

ERA.31.1.1516 Aruanne Mereobservatooriumi varade üleandmise kohta Tartu Ülikooli valitsusele. Tartu Keiserlik Ülikool.

EAA.402.1.29407 Schoenberg, Erich Karl Wilhelm.

Sõjavägede staap.

ERA.495.7.1849 Kirde, Kaarel Karli p.

Merejõudude Staap.

ERA.527.1.1 Merejõudude juhataja päevakäsud.

Rannavalve, Side- ja Päästejaamade valitsus.

ERA.528.1.8 Ülevaated Merejõudude Staabile valitsuse tegevuse kohta.

Haridusministeerium.

ERA.1108.1.69 Haridusministeeriumile teadmiseks saadetud Asutava Kogu istungite päevakorrad ja otsus Mereobservatooriumi asutamise kohta. 1920.

Hüdrograafia, Lootside ja Tuletornide Valitsus.

ERA.1662.1.7. Valitsuse ülema päevakäsud.

Mereobservatoorium.

ERA.1663.1.1 Mereobservatooriumi juhataja päevakäsud.

ERA.1663.1.3 Kirjavahetus meteoroloogia alal, tegevusaruanded ja arvulise koosseisu teatelehed.

ERA.1663.1.8 Mereobservatooriumis teeninud isikute teenistuskäigu raamat.

ERA.1663.1.12 Mereobservatooriumi likvideerimise komisjoni esimehe päevakäsud. 9.04.1920–28.08.1920.

ERA.1663.1.13 Likvideerimiskomisjoni protokollid, aktid ja aruanded varade üleandmise kohta.

Eesti Vabariigi Tartu Ülikool.

EAA.2100.2.341 Kirde, Karl.

EAA.2100.1.2039 Frisch, Karl.

Tartu tähetorn.

EAA.5374.1.351 Aruanded teadusliku töö ja õppetegevuse alal.

Aruksaar, H., 1992. Kaarel Kirde – esimene eestlasest geofüüsika professor Tartu Ülikoolis. – Teaduse ajaloo lehekülgi Eestist VIII, 231–249.

Eesti Vabadussõda 1918–1920, 1937. Vabadussõja Ajaloo Komitee. Tallinn.

Kals, A., 1993. Lisandusi Kaarel Kirde eluloole. – Akadeemia, 6, 1278–1286.

Kirde, K., 1938. Tartu Ülikooli meteoroloogia observatooriumi arenemine ja teaduslik tegevus 1918–1938. – Eesti Loodus, 1/2, 29–35.

Lõhmus, L., Harvig, V., Aas, T., 2008. Dr. E. Schoenbergi ja H. Mäe ettepanek rajada Glehni parki tähetorn. – Tallinna Tähetorn V, 2, 7–20.

- Lüdecke, C., Tammiksaar E., Wutzke, U., 2000. Alfred Wegener und sein Einfluss auf die Meteorologie an der Universität Dorpat (Tartu). – *Meteorologische Zeitschrift*, 9, nr 3, 175–183.
- Pae, T., Tammiksaar, 2016. E. August Tõllassepp – Eesti esimesi meteoroloogide, *Publicationes Geophysicales Universitatis Tartuensis*, 51, Tartu, lk 49–60.
- Pustõlnik, I., 2006. Noore astronoomi Erich Schoenbergi (1882–1965) teekond Tartu Observatooriumis. – *Tartu Tähetorni kalender 2007*, 71–76.
- Sammaloo, P., 2002. Unarusse jäänud nimed: Mereobservatoorium. – *Meremees*, 4, 28–29.
- Tankler, H., Kuznetsova, Z., 1992. Tartu teadlased ja Venemaa meteoroloogiakeskus – Füüsika peaobservatoorium. – *Teaduse ajaloo lehekülgi Eestist VIII*, 7–29.
- Želnin, G., 2004. Tartu Observatoorium 1805–1948. – *Tartu Observatooriumi Virtuaalne Muuseum*: <http://www.aai.ee/muuseum/Main/Downloads/Observatoorium.pdf>.
- Vuuk, A., 1955. Astronoomiliste vaatluste ajaloost Tallinnas. – *Tartu Tähetorni kalender 1955*, 52–26.
- Wilkens, A., 1965. Erich Schoenberg [nekroloog]. – *Bayerische Akademie der Wissenschaften Jahrbuch*. München.

Tallinn Naval Observatory

Janet Laidla

University of Tartu Museum

Summary

The meteorological station which had been founded in February 1919, in the first months of the Estonian Independence War (1918–1920), was reorganised into the Tallinn Naval Observatory in May 1919. The Observatory's main tasks were the prediction of weather, distribution of weather reports and charts and the accurate time data service.

Over twenty individuals worked at the Observatory during its short time of operation. It was led by Erich Schönberg, who was relieved by Kaarel Kirde (Karl Frisch) in July 1919. The Observatory had several subsections all over the Estonian coast as well as on the islands. It borrowed and acquired a notable collection of meteorological and astronomical instruments.

The Naval Observatory was closed after the end of the war, because both an astronomical and a separate meteorological observatory had already been active in Tartu, affiliated to the university. Instruments not needed by the navy were distributed between these two observatories and many specialists who had served at the Naval Observatory found placements in Tartu.

Arthur von Oettingen ja paljuheliilised häälestussüsteemid

Mart Humal

Eesti Muusika- ja Teatriakadeemia

Arthur von Oettingen (1836–1920) on muusikaajaloos tuntud eelkõige dualistliku traditsiooni rajajana 19. sajandi saksa harmooniaõpetuses (Humal 2002). Dualismi ideede viitab juba tema esimese uurimuse pealkiri – *Harmoniesystem in dualer Entwicklung* (Oettingen 1866). 19. sajandi muusikateooria ajaloo uurija Peter Rummenhölleri sõnul isoleerustab Oettingeni teooriakäsitlust muusikaliste nähtuste taandamine nende formaalloomulisele aspektile (Rummenhöller 1967, 83). Dualism – mažoori ja minoori käsitlemine teineteise peegelpildina – on Oettingenil lahutamatu seotud nn puhta häälestuse taotlusega, mida ta püüdis järjekindlalt nii teoorias põhjendada kui ka praktikas läbi viia (Goldbach 2009).

Üks vanimaid tuntud häälestussüsteeme, nn pütaagorlik häälestus lähtub kolmest kõige lihtsama võnkesagedussuhtega (ja seega kõige heakõlalisemast) “puhtast” konsonantsist: puhtast oktavist (1:2), puhtast kvindist (2:3) ja puhtast kvardist (3:4).⁶ Teatavasti on pütaagorliku puhta kvindi suurus 701,95 senti (ehk tänapäeva võrdtempereeritud häälestuse pooltoonilise sajandikosa). Kui moodustada järjest 12 sellist kvinti, tekib pütaagorlik kvindiring⁷, mis on 23,46 senti ehk nn Pythagorase komma võrra suurem kui seitse oktaavi. Tänapäevane võrdtempereeritud häälestus jagab selle suuruse võrdselt 12 kvindi vahel, saades tulemusena täpselt 700-sendise võrdtempereeritud kvindi.

Alates renessansiajast lisandusid eelnimetatud pütaagorlikele konsonantsidele ka suur ja väike tertis, mille võnkesagedussuhted on vastavalt 4:5 ja 5:6. Kahjuks kõlavad nad pütaagorlikus häälestuses kaunis ebapuhtalt. Nimelt annavad neli pütaagorlikku kvinti järjestikku nn pütaagorliku suure tertsi (407,82 senti), mis on 21,506 senti ehk nn süntoonilise komma võrra suurem kui puhas (võnkesagedussuhtega 4:5) suur tertis (386,314 senti). 400-sendine tänapäeva võrdtempereeritud suur tertis asetseb nende kahe suuruse vahel, olles siiski märksa lähemal pütaagorlikule kui loomulikule.

Kuni 15. sajandi alguseni kasutati üldiselt häälestust, kus kõik kvindid ei ole võrdsed – lisaks üheteistkümnele puhtale kvindile leidub selles üks Pythagorase komma võrra väiksem nn hundikvint (Lindley 1987, 121). Saavutamaks maksimaalselt puhtaid kvinte ja tertse, on katsetatud mitmesuguseid paljuheliilisi häälestussüsteeme, kus oktaavis on rohkem kui 12 erinevat heli. Neist tuntuimad on 19-, 31- ja 53-heliilised temperatsioonid.

⁶ Intervallide suurused pooltoonides on järgmised: väike sekund (näiteks c–des) – 1, suur sekund (c–d) – 2, väike tertis (c–es) – 3, suur tertis (c–e) – 4, puhas kvart (c–f) – 5, tritoon (suurendatud kvart c–fis või vähendatud kvint c–ges) – 6, puhas kvint (c–g) – 7, väike sekst (c–as) – 8, suur sekst (c–a) – 9, väike septim (c–b) – 10, suur septim (c–h) – 11, puhas oktaav (c–c) – 12.

⁷ Kvindiring on kaheteistkümne puhta kvindi järjestikune, mis läbib kromaatilise helirea kõik 12 heli, näiteks c–g–d–a–e–h–fis–cis–gis/as–es–b–f–c.

Oettingeni *Reininstrument* ortotonofoonium, mida ta kirjeldab raamatus *Das duale Harmoniesystem* (Oettingen 1913), lähtub 53-helilisest temperatsioonist.⁸

Kui moodustada puhas pütaagorlik kvindiring neli korda järjest, läbides nii 48 kvinti, on tulemuseks 28 oktavi ja neljakordne Pythagorase komma, st 93,84 senti. Kui lisada sellele veel viis kvinti, mis hõlmavad kaks oktavi ja pütaagorliku suure septimi (1109,7 senti), kõlab 31 oktavi järel algushelist vaid 3,615 senti kõrgem heli. Selle suuruse jagamisel võrdsele 53 kvindi vahel tekib 53-heliline võrdtempereeritud häälestus, mille puhas kvint suurusega 701,890 senti on ainult 0,065 senti väiksem kui pütaagorlik kvint. Sama häälestuse 384,9-sendine suur tertis on 1,4 senti väiksem kui 386,3-sendine puhas suur tertis.

Teatavasti on kaheksa puhta kvindi summa – pütaagorlik suurendatud kvint (815,64 senti) – ainult 1,95 senti suurem kui võnkesagedussuhtega 3:5 puhas väike sekst (813,69 senti).⁹ Samapalju erineb ka kaheksa puhta kvardi summa (pütaagorlik vähendatud kvart) puhtast suurest tertisist. See asjaolu on üks 53-helilise võrdtempereeritud häälestuse lähtepunkte.

Joonisel 1 (Oettingen 1913, 256) on oktavis 53 klahvi sisaldava Oettingeni ortotonofooniumi helid paigutatud nn helivõrgustikuna (*Tonnetz*) seitsmele reale ja üheksale veerule. (Joonisel iga heli tähtnimetuse all olevad kaks ringis numbrit märgivad vastava heli järjekorranumbrit helireas, vasakpoolne laskuvasuunaliselt, parempoolne tõusvasuunaliselt lugedes. Iga heli juures olev alumine number näitab heli kõrgust millioktavidena¹⁰, võrreldes helivõrgustiku keskel asuva heliga d , mille kõik numbrid on nullid.) Ridades on helid järjestatud vasakult paremale tõusvate puhaste kvintidena, veergudes alt üles tõusvate loomulike suurte tertsidena. Eri ridades asuvad samanimelised helid on oma kõrguselt erinevad. Seda erinevust märgivad kriipsud (*Kommastrich*'id) noodinimetuste peal või all. Võrreldes keskmises reas olevate (ilma ala- ja ülakriipsuta) helidega, madaldab üks ülakriips ja tõstab üks alakriips heli süntooniline komma ehk 21,5 sendi võrra, kaks kriipsu kahekordse süntooniline komma ehk 43 sendi võrra jne. (Trükitehnilistel põhjustel on käesolevas artiklis asendatud üla- ja alakriipsud heli tähtnimetusele lisatud roomanumbriliste üla- ja alaindeksitega I, II või III, olenevalt kriipsude arvust, näiteks $\bar{a} = a^I$; $\underline{a} = a_I$.)

⁸ Teatavasti ei võimalda ükski oktav võrdseteks osadeks jagav jaotus saada akustiliselt puhtaid, täisarvuliste võnkesagedussuhetena 2:3, 3:4, 4:5 jne väljendatavad intervallid oma täpsel kujul. Kuid eelloetletud paljuheliiliste jaotuste puhul tekkivate helide hulgast on võimalik leida selliseid, mis annavad nimetatud täisarvulistele suhetele tunduvalt lähedasemaid intervallid kui tavapärasel 12-helilisel võrdtempereeritud häälestuses. Viimane oli küll tuntud juba mitu sajandit enne Oettingeni ja oli tema ajal juba valdavalt kasutusel, kuid teda kui maksimalisti see ei rahuldanud.

⁹ Tänapäeva võrdtempereeritud häälestuses on suurendatud kvint (näiteks *c-gis*) võrdne väikese sekstiga (*c-as*) ja vähendatud kvart (*c-fes*) suure tertisiga (*c-e*).

¹⁰ Üks millioktav võrdub 1,2 sendiga.

**Tastenreihenfolge
des 53stufigen dualen Reinstruments
nebst Schwingungslogarithmen:**

Knopf-Tasten Vergleich mit bb, fes ersetzt durch b, d, fis

<u>ais</u>	<u>eis</u>	<u>his</u>	<u>fisis</u>	<u>cisis</u>	<u>gisis</u>	<u>disis</u>	<u>aisis</u>	<u>eisis</u>
		(11) (42)	(33) (20)	(2) (51)	(24) (29)	(46) (7)	(15) (38)	
626	211	796	381	966	551	136	721	306
<u>fis</u>	<u>cis</u>	<u>gis</u>	<u>dis</u>	<u>ais</u>	<u>eis</u>	<u>his</u>	<u>fisis</u>	<u>cisis</u>
(37) (16)	(6) (47)	(28) (25)	(50) (3)	(19) (34)	(41) (12)	(10) (43)	(32) (21)	
304	889	474	059	644	229	814	399	984
<u>d</u>	<u>a</u>	<u>e</u>	<u>h</u>	<u>fis</u>	<u>cis</u>	<u>gis</u>	<u>dis</u>	<u>ais</u>
(1) (52)	(23) (30)	(45) (8)	(14) (39)	(38) (17)	(5) (48)	(27) (26)	(49) (4)	
982	567	152	737	322	907	492	077	662
<u>b</u>	<u>f</u>	<u>c</u>	<u>g</u>	<u>d</u>	<u>a</u>	<u>e</u>	<u>h</u>	<u>fis</u>
(18) (35)	(40) (13)	(9) (44)	(31) (22)	(0) (0)	(22) (31)	(44) (9)	(19) (40)	(35) (18)
660	245	830	415	000	585	170	755	340
<u>ges</u>	<u>des</u>	<u>as</u>	<u>es</u>	<u>b</u>	<u>f</u>	<u>c</u>	<u>g</u>	<u>d</u>
	(4) (49)	(26) (27)	(48) (5)	(17) (36)	(39) (14)	(8) (45)	(30) (23)	(52) (1)
338	923	508	093	678	263	848	433	018
<u>eses</u>	<u>bb</u>	<u>fes</u>	<u>ces</u>	<u>ges</u>	<u>des</u>	<u>as</u>	<u>es</u>	<u>b</u>
	(21) (32)	(43) (10)	(12) (41)	(34) (19)	(3) (50)	(25) (28)	(47) (8)	(16) (37)
016	601	186	771	356	941	526	111	696
<u>ceses</u>	<u>geses</u>	<u>deses</u>	<u>asas</u>	<u>eses</u>	<u>bb</u>	<u>fes</u>	<u>ces</u>	<u>ges</u>
	(38) (15)	(7) (46)	(29) (24)	(51) (2)	(20) (33)	(42) (11)		
694	279	864	449	034	619	204	789	374

ersetzt durch fis, d, b Knopf-Tasten Vergleich mit his, fisis

Joonis 1. Oettingeni ortotonofooniumi helivõrgustik (Oettingen 1913).

Figure 1. Tonnetz of Oettingen's Orthotonophonium (Oettingen 1913).

53-helilises võrdtempereeritud häälestuses on oktav jagatud viiekümne kolmeks 22,64-sendiseks osaks. Nimetatud häälestuse suur tertis (364,9 senti) sisaldab 17, puhas kvint aga 31 sellist osa. Kui liikuda joonise 1 keskel asetsevast helist *d* nelja kvindi võrra vasakule, jõuame noodini *b*, millest järgmine noot peaks olema *es*, kuid seda vaadeldavas helivõrgustikus pole. 53-helilises võrdtempereeritud häälestuses on sellega aga identne ülemise naaberrea äärmine parempoolne heli *dis*¹, millest kolm kvinti allapoole jääb heli *fis*¹. Nii ongi selles helivõrgustikus samastatud kaheksa laskuva kvindi või kaheksa tõusva kvardi kaugune heli tõusva suure tertsi kauguse heliga.

Oma töös *Die Grundlage der Musikwissenschaft und das duale Reininstrument* (Oettingen 1916. 185, Tafel 15, II) kirjeldab Oettingeni pilli, mida ta ise nimetab *Quint-Sexten-Reininstrument* ja mille klaviatuuril on igas oktavis 59 klahvi. Sellele vastav helivõrgustik on kujutatud joonisel 2. Viimases koosnevad read endiselt puhastest kvintidest, veerud aga mitte suurtest tertsidest, vaid suurtest sekstidest. (Selle joonise ülemise ja alumise rea helid, nagu ka ülalt teise rea kaks esimest ja alt teise rea kaks viimast heli, ei kuulu 59-helilise oktaviga pilli heliritta, vaid tulevad kasutusel alles 71-helilise oktaviga pilli puhul.)

					⑦	⑥			
						$\overline{\overline{G}}_{118}$	$\overline{\overline{D}}_{118}$	$\overline{\overline{A}}_{103}$	$\overline{\overline{E}}_{118}$
						533	118	703	288
$\overline{\overline{C}}_{118}$	⑥ $\overline{\overline{G}}_{118}$	⑤ $\overline{\overline{D}}_{118}$	$\overline{\overline{A}}_{118}$	$\overline{\overline{E}}_{118}$		$\overline{\overline{B}}_{118}$	$\overline{\overline{F}}_{118}$	⑤ $\overline{\overline{C}}_{118}$	④ $\overline{\overline{G}}_{118}$
871	456	041	626	211		796	381	966	551
$\overline{\overline{E}}_{118}$	$\overline{\overline{B}}_{118}$	$\overline{\overline{F}}_{118}$	$\overline{\overline{C}}_{118}$	④ $\overline{\overline{G}}_{118}$	③ $\overline{\overline{D}}_{118}$	$\overline{\overline{A}}_{118}$	$\overline{\overline{E}}_{118}$	$\overline{\overline{B}}_{118}$	
134	719	304	889	474	059	644	229	814	
$\overline{\overline{G}}_{118}$	③ $\overline{\overline{D}}_{118}$	② $\overline{\overline{A}}_{118}$	$\overline{\overline{E}}_{118}$	$\overline{\overline{B}}_{118}$	$\overline{\overline{F}}_{118}$	$\overline{\overline{C}}_{118}$	$\overline{\overline{G}}_{118}$	$\overline{\overline{D}}_{118}$	
397	982	567	152	737	322	907	492	077	
$\overline{\overline{B}}_{118}$	$\overline{\overline{F}}_{118}$	$\overline{\overline{C}}_{118}$	$\overline{\overline{G}}_{118}$	$\overline{\overline{D}}_{118}$	$\overline{\overline{A}}_{118}$	$\overline{\overline{E}}_{118}$	$\overline{\overline{B}}_{118}$	$\overline{\overline{F}}_{118}$	
660	245	830	415	000	585	170	755	340	
$\overline{\overline{D}}_{118}$	$\overline{\overline{A}}_{118}$	$\overline{\overline{E}}_{118}$	$\overline{\overline{B}}_{118}$	$\overline{\overline{F}}_{118}$	$\overline{\overline{C}}_{118}$	② $\overline{\overline{G}}_{118}$	③ $\overline{\overline{D}}_{118}$	$\overline{\overline{A}}_{118}$	
923	508	093	678	263	848	433	018	603	
$\overline{\overline{F}}_{118}$	$\overline{\overline{C}}_{118}$	$\overline{\overline{G}}_{118}$	③ $\overline{\overline{D}}_{118}$	④ $\overline{\overline{A}}_{118}$	$\overline{\overline{E}}_{118}$	$\overline{\overline{B}}_{118}$	$\overline{\overline{F}}_{118}$	$\overline{\overline{C}}_{118}$	
186	771	356	941	526	111	696	281	866	
④ $\overline{\overline{A}}_{118}$	⑤ $\overline{\overline{E}}_{118}$	$\overline{\overline{B}}_{118}$	$\overline{\overline{F}}_{118}$	$\overline{\overline{C}}_{118}$	$\overline{\overline{G}}_{118}$	$\overline{\overline{D}}_{118}$	⑤ $\overline{\overline{A}}_{118}$	⑥ $\overline{\overline{E}}_{118}$	
449	034	619	204	789	374	959	544	129	
$\overline{\overline{C}}_{118}$	$\overline{\overline{G}}_{118}$	$\overline{\overline{D}}_{118}$	⑥ $\overline{\overline{A}}_{118}$	⑦					
712	297	882	467						

Joonis 2. Oettingeni Quint-Sexten-Reininstrument'i helivõrgustik (Oettingen 1916).

Figure 2. Tonnetz of Oettingen's *Quint-Sexten-Reininstrument* (Oettingen 1916).

Nagu ma märkisin oma “Kommentaaris Oettingeni ortotonofooniumi häälestuse kohta” (Humal 2009, 106 ja 108), pakub selline 59-helilise oktavi helivõrgustik tähelepänuväärset võimalust, mida Oettingen ise võib-olla ei aimanudki. Nimelt võimaldab see kergesti tuletada eriti puhtaid intervale sisaldava 118-helilise võrdtempereeritud oktavi helivõrgustiku.

			5 <i>dis</i> ^{III}	74 <i>ais</i> ^{III}	25 <i>eis</i> ^{III}	94 <i>his</i> ^{III}	45 <i>fisis</i> ^{III}	114 <i>cisis</i> ^{III}	65 <i>gisis</i> ^{III}
16 <i>e</i> ^{II}	85 <i>h</i> ^{II}	36 <i>fis</i> ^{II}	105 <i>cis</i> ^{II}	56 <i>gis</i> ^{II}	7 <i>dis</i> ^{II}	76 <i>ais</i> ^{II}	27 <i>eis</i> ^{II}	96 <i>his</i> ^{II}	
47 <i>g</i> ^I	116 <i>d</i> ^I	67 <i>a</i> ^I	18 <i>e</i> ^I	87 <i>h</i> ^I	38 <i>fis</i> ^I	107 <i>cis</i> ^I	58 <i>gis</i> ^I	9 <i>dis</i> ^I	
78 <i>b</i>	29 <i>f</i>	98 <i>c</i>	49 <i>g</i>	0 <i>d</i>	69 <i>a</i>	20 <i>e</i>	89 <i>h</i>	40 <i>fis</i>	
109 <i>des</i> ₁	60 <i>as</i> ₁	11 <i>es</i> ₁	80 <i>b</i> ₁	31 <i>f</i> ₁	100 <i>c</i> ₁	51 <i>g</i> ₁	2 <i>d</i> ₁	71 <i>a</i> ₁	
22 <i>fes</i> _{II}	91 <i>ces</i> _{II}	42 <i>ges</i> _{II}	111 <i>des</i> _{II}	62 <i>as</i> _{II}	13 <i>es</i> _{II}	82 <i>b</i> _{II}	33 <i>f</i> _{II}	102 <i>c</i> _{II}	
53 <i>asas</i> _{III}	4 <i>eses</i> _{III}	73 <i>heses</i> _{III}	24 <i>fes</i> _{III}	93 <i>ces</i> _{III}	44 <i>ges</i> _{III}	113 <i>des</i> _{III}			

			64 <i>a</i> ^{III}	15 <i>e/dis</i> ^{III}	84 <i>h/ais</i> ^{III}	35 <i>fis/eis</i> ^{III}	104 <i>his</i> ^{III}	55 <i>fisis</i> ^{III}	6 <i>cisis</i> ^{III}
75 <i>b</i> ^{II}	26 <i>f</i> ^{II}	95 <i>c</i> ^{II}	46 <i>g/fis</i> ^{II}	115 <i>d/cis</i> ^{II}	66 <i>a/gis</i> ^{II}	17 <i>dis</i> ^{II}	86 <i>ais</i> ^{II}	37 <i>eis</i> ^{II}	
106 <i>des</i> ^I	57 <i>as</i> ^I	8 <i>es</i> ^I	77 <i>b/ais</i> ^I	28 <i>f/eis</i> ^I	97 <i>c/his</i> ^I	48 <i>fisis</i> ^I	117 <i>cisis</i> ^I	68 <i>gisis</i> ^I	
19 <i>fes</i>	88 <i>ces</i>	39 <i>ges</i>	108 <i>des/cis</i>	59 <i>as/gis</i>	10 <i>es/dis</i>	79 <i>ais</i>	30 <i>eis</i>	99 <i>his</i>	
50 <i>asas</i> ₁	1 <i>eses</i> ₁	70 <i>heses</i> ₁	21 <i>fes/e</i> ₁	90 <i>ces/h</i> ₁	41 <i>ges/fis</i> ₁	110 <i>cis</i> ₁	61 <i>gis</i> ₁	12 <i>dis</i> ₁	
81 <i>ceses</i> _{II}	32 <i>geses</i> _{II}	101 <i>deses</i> _{II}	52 <i>asas/g</i> _{II}	3 <i>eses/d</i> _{II}	72 <i>heses/a</i> _{II}	23 <i>e</i> _{II}	92 <i>h</i> _{II}	43 <i>fis</i> _{II}	
112 <i>eseses</i> _{III}	63 <i>heseses</i> _{III}	14 <i>feses</i> _{III}	83 <i>ceses/b</i> _{III}	34 <i>geses/f</i> _{III}	103 <i>deses/c</i> _{III}	54 <i>g</i> _{III}			

Joonis 3. 118-helilise võrdtempereeritud oktavi helivõrgustik.
Figure 3. Tonnetz for the system of 118.

118-heliline võrdtempereeritud häälestus lähtub asjaolust, et kui lisada üheksale pütaagorlikule kvindiringile (ehk 108 kvindile) veel kümme puhast kvinti, on läbitud 69 oktavi ja kõlab algushelist 30,64 senti kõrgem heli. Kui jagada see suurus 118 kvindi vahel, on tulemuseks 701,69-sendine kvint, mis on pütaagorlikust 0,26 sendi võrra väiksem. Võrreldes 53-helilise võrdtempereeritud häälestuse 701,890-sendise kvindiga on see pisut ebapuhtam. Seevastu erineb 118-helilise võrdtempereeritud häälestuse 386,44-sendine suur terts loomulikust ainult 0,12 sendi võrra, olles seega üle kümne korra puhtam kui 53-helilise võrdtempereeritud häälestuse 384,9-sendine suur terts.

118-helilise võrdtempereeritud oktavi helivõrgustiku moodustamiseks piisab, kui asetada 59-helilise oktavi helivõrgustiku peale või alla teine samasugune. Nii moodustub kaheosaline helivõrgustik, mille ühe osa keskmeks on d ja teise osa keskmeks sellest 600 sendi kaugune identse kõrgusega enharmooniliste¹¹ helide paar as/gis . Joonisel 3 ongi kujutatud selline kaheosaline helivõrgustik. Selle alumise, as/gis -keskse osa kõigis ridades on kolm keskmist heli märgitud samasuguste enharmooniliste helipaaridena nagu kesk-heli. Seejuures koosneb selle osa iga rida neist helidest, mis jäävad ülemises, d -keskses osas vastava rea äärmistest helidest väljapoole.

Selle helivõrgustiku 118 helist võib moodustada järgmise tõusva helirea (igale poolrasvases kirjas järjekorranumbrile järgneb vastava heli tähtnimetus; ilma tärnita järjekorranumbriga helid kuuluvad võrgustiku d -kesksesse, tärniga järjekorranumbritega helid aga as/gis -kesksesse ossa; järgneb vastava heli kaugus keskkelist sentides):

0 d 0,00; 1* $eses_I$ 10,17; 2 d_I 20,34; 3* $eses/d_{II}$ 30; 51, 4 $eses_{III}$ 40,68; 5 dis^{III} 50,85; 6* $cisis^{III}$ 61,02; 7 dis^{II} 71,19; 8* es^I 81,36; 9 dis^I 91,52; 10* es/dis 101,69; 11 es_I 111,86; 12* dis_I 122,03; 13 es_{II} 132,20; 14* $feses_{III}$ 142,37; 15* e/dis^{III} 152,54; 16 e^{II} 162,71; 17* dis^{II} 172,88; 18 e^I 183,05; 19* fes 193,22; 20 e 203,39; 21* fes/e_I 213,56; 22 fes_{II} 223,73; 23* e_{II} 233,90; 24 fes_{III} 244,07; 25 eis^{III} 254,24; 26* f_{II} 264,41; 27 eis_I 274,58; 28* f/eis^I 284,75; 29 f 294,91; 30* eis 305,08; 31 f_I 315,25; 32* $geses_{II}$ 325,42; 33 f_{II} 335,60; 34* $geses/f_{III}$ 345,76; 35* fis/eis^{III} 355,93; 36 fis^{II} 366,10; 37* $eisis^{II}$ 376,27; 38 fis^I 386,44; 39* ges 396,61; 40 fis 406,78; 41* ges/fis_I 416,95; 42 ges_{II} 427,12; 43* fis_{II} 437,29; 44 ges_{III} 447,46; 45 $fisis^{III}$ 457,63; 46* $g/fisis^{II}$ 467,80; 47 g^I 477,97; 48* $fisis^I$ 488,14; 49 g 498,30; 50* $asas_I$ 508,47; 51 g_I 518,64; 52* $asas/g_{II}$ 528,81; 53 $asas_{III}$ 538,98; 54* g_{III} 549,15; 55* $fisis^{III}$ 559,32; 56 gis^{II} 569,49; 57* as^I 579,66; 58 gis^I 589,83; 59* as/gis 600,00; 60 as_I 610,17; 61* gis_I 620,34; 62 as_{II} 630; 51; 63* $heseses_{III}$ 640,68; 64* a^{III} 650,85; 65 $gisis^{III}$ 661,02; 66* $gisis/a^{II}$ 671,19; 67 a^I 681,36; 68* $gisis^I$ 691,52; 69 a 701,69; 70* $heses_I$ 711,86; 71 a_I 722,03; 72* $heses/a_{III}$ 732,20; 73 $heses_{III}$ 742,37; 74 ais^{III} 752,54; 75* b^{II} 762,71; 76 ais^{II} 772,88; 77* b/ais^I 783,05; 78 $heses$ 793,22; 79* ais 803,39; 80 b_I 813,56; 81* $ceses_{II}$ 823,73; 82 $heses_{II}$ 833,90; 83* $ceses/b_{III}$ 844,07; 84* h/ais^{III} 854,24; 85 h^{II} 864,41; 86* ais^{II} 874,58; 87 h^I 884,75; 88* ces 894,91; 89 h 905,08; 90* ces/h_I 915,25; 91 ces_{II} 925,42; 92* h_{II} 935,60; 93 ces_{III} 945,76; 94 his^{III} 955,93; 95* c_{II} 966,10; 96 his^{II} 976,27; 97* c/his^I 986,44; 98 c 996,61; 99* his 1006,78; 100 c_I 1016,95; 101* $deses_{II}$ 1027,12; 102 c_{II} 1037,29; 103* $deses/c_{III}$ 1047,46; 104* $hisis^{III}$ 1057,63; 105 cis^{II} 1067,80; 106* des^I 1077,97; 107 cis^I 1088,14; 108* des/cis

¹¹ Enharmoonilise paari moodustavad kaks tänapäeva võrdtempereeritud häälestuses samakõlalist, kuid harmooniliselt tähenduselt erinevat heli, näiteks cis/des , dis/es jne.

1098,30; 109 des_I 1108,47; 110* cis_I 1118,64; 111 des_{II} 1128,81; 112* $eses_{III}$ 1138,98; 113 des_{III} 1149,15; 114 $cisis_{III}$ 1159,32; 115* $d/cisis^{II}$ 1169,49; 116 d^I 1179,66; 117* $cisis$ 1189,83.

Sellest loetelust ilmneb, et naaberhelid paiknevad siin üksteisest 10,17 sendi kausel ja enamasti vaheldumisi helivõrgustiku kummaski osas. Erandiks on juhud, kus helile alaindeksiga III järgneb heli ülaindeksiga III – siis on nad võrgustiku samas osas, vastavalt kõige alumisel ja kõige ülemisel real (näiteks $eses_{III}$ ja dis^{III} , mis mõlemad on võrgustiku d -keskses osas).

Kummagi osa helid moodustavad omaette katkematu kvindiringi. Ridades olevate naaberhelide järjekorranumbrid erinevad üksteisest 69 võrra (näiteks helivõrgustiku d -keskse osa helidel d ja a vastavalt 0 ja 69), sest puhas kvint koosneb kuuekümmne üheksast 10,17-sendisest osast. Igas reas on üheksa heli, millest kahe äärmise vahel moodustub suurendatud kvint (näiteks võrgustiku d -keskse osa keskmisel real $b-fis$). Nagu ka 53-helilise oktavi puhul, on see suurendatud kvint võrdsustatud puhta väikese sekstiga. Kvindiringi jätkumisel alumisele naaberreale tekib alati vähendatud sekst¹² (näiteks eelmainitud keskmiselt realt järgmisele reale $fis-des_I$), mis on võrdsustatud puhta kvindiga. Ka üleminekul võrgustiku d -keskselt osalt as/gis -kesksele osale ja tagasi tekkivad suurendatud kvindid (vastavalt $des_{III}-a^{III}$ ja $g_{III}-dis^{III}$) on võrdsustatud puhaste kvintidega. Seevastu üleminekul d -keskse osa äärmise parema või vasaku veeru helilt as/gis -keskse osa sama rea vastavalt esimesele või kolmandale enharmoonilisele helipaarile või vastupidi tekib 10,17 sendi võrra väiksem kvint, mis koosneb 68 osast (näiteks helide fis ja des/cis vahel, mille järjekorranumbrid on vastavalt 40 ja 108, või helide es/dis ja b vahel, mille järjekorranumbrid on vastavalt 10 ja 78).

Helivõrgustiku veerud (mis koosnevad suurtest sekstidest) moodustavad võrgustiku mõlema osa peale kokku tõusva suurte sekstide või laskuva väikeste tertside ringi.¹³ Laskuvates väikestes tertsidest moodustuks see järgmiste järjekorranumbritega helidest:

6*, 37*, 68*, 99*, 12*, 43*, 74, 105, 18, 49, 80, 111, 24, 55*, 86*, 117*, 30*, 61*, 92*, 5, 36, 67, 98, 11, 42, 73, 104*, 17*, 48*, 79*, 110*, 23*, 54*, 85, 116, 29, 60, 91, 4, 35*, 66*, 97*, 10*, 41* 72*, 103*, 16, 47, 78, 109, 22, 53, 84*, 115*, 28*, 59*, 90*, 3*, 34*, 65, 96, 9, 40, 71, 102, 15*, 46*, 77*, 108*, 21*, 52*, 83*, 114, 27, 58, 89, 2, 33, 64*, 95*, 8*, 39*, 70*, 101*, 14*, 45, 76, 107, 20, 51, 82, 113, 26*, 57*, 88*, 1*, 32*, 63*, 94, 7, 38, 69, 100, 13, 44, 75*, 106*, 19*, 50*, 81*, 112*, 25, 56, 87, 0, 31, 62, 93, (6*) jne.

Nagu sellest loetelust ilmneb, reastuvad siin veergude kaupa ülalt alla vaheldumisi helivõrgustiku d - ja as/gis -kesksesse ossa kuuluvad helid. Kuna iga väike terts koosneb kolmekümne ühest 10,17-sendisest osast, erinevad veergudes olevate naaberhelide järjekorranumbrid 31 võrra.

¹² Tänapäeva võrdtempereeritud häälestuses on vähendatud sekst ($c-asas$) võrdne puhta kvindiga ($c-g$).

¹³ Kuna tänapäeva võrdtempereeritud häälestuses koosneb oktav kaheteistkümnest, väike ja suur terts aga vastavalt kolmest ja neljast pooltoonist, sisaldab selles häälestuses suurte sekstide või väikeste tertside ring ainult neli ja suurte tertside või väikeste sekstide ring ainult kolm erinevat heli (ega läbi seega kõiki oktavi helisid).

Suured tertsid paiknevad selles helivõrgustikus diagonaalidel suunaga vasakult alt paremale üles. Nagu võrgustikust ilmneb, on nendel, nagu ka vastupidistel diagonaalidel naaberhelide järjekorranumbrite vahe paarisarv, antud juhul 38 (näiteks võrgustiku d -keskse osa helidel d ja fis^1 , vastavalt järjekorranumbritega 0 ja 38), sest suur terts koosneb kolmekümne kaheksast 10,17-sendisest osast. Seetõttu ei saa siin moodustada ühtset kõiki helisid sisaldavat suurte tertside ringi, vaid tekivad kaks ringi – üks paarisarvuliste ja teine paarituarvuliste järjekorranumbritega helidest, ja nimelt järgmisel kujul:

102, 22, 60, 98, 18, 56, 94, 14*, 52*, 90*, 10*, 48*, 86*, 6*, 44, 82, 2, 40, 78, 116, 36, 74, 112*, 32*, 70*, 108*, 28*, 66*, 104*, 24, 62, 100, 20, 58, 96, 16, 54*, 92*, 12*, 50*, 88*, 8*, 46*, 84*, 4, 42, 80, 0, 38, 76, 114, 34*, 72*, 110*, 30*, 68*, 106*, 26*, 64*, (102) jne.

43*, 81*, 1*, 39*, 77*, 115*, 35*, 73, 111, 31, 69, 107, 27, 65, 103*, 23*, 61*, 99*, 19*, 57*, 95*, 15*, 53, 91, 11, 49, 87, 7, 45, 83*, 3*, 41*, 79*, 117*, 37*, 75*, 113, 33, 71, 109, 29, 67, 105, 25, 63*, 101*, 21*, 59*, 97*, 17*, 55*, 93, 13, 51, 89, 9, 47, 85, 5, (43*) jne.

Nagu neist loeteludest ilmneb, reastuvad siin diagonaalide kaupa alt üles vaheldumisi helivõrgustiku d - ja as/gis -kesksesse ossa kuuluvad helid. Diagonaal, mis lõikub helivõrgustiku parempoolse äärega, jätkub sama rea vasakpoolseimast helist, näiteks järgneb esimese suurte tertside ringi esimeses diagonaalis algushelile järjekorranumbriga 102 samalt real olev heli järjekorranumbriga 22.

Diagonaalidel suunaga paremalt alt vasakule üles paiknevad nn väikesed täistoonid, mis puhtas häälestuses moodustuvad võnkesagedussuhtega 9:10 helide vahel. Selle diagonaali naaberhelide järjekorranumbrite vahe on samuti paarisarv, nimelt 18.¹⁴ Seetõttu tekivad kaks väikeste täistoonide ringi – jällegi üks paarisarvuliste ja teine paarituarvuliste järjekorranumbritega helidest, ja nimelt järgmisel kujul:

102, 2, 20, 38, 56, 74, 92*, 110*, 10*, 28*, 46*, 64*, 82, 100, 0, 18, 36, 54*, 72*, 90*, 108*, 8*, 26*, 44, 62, 80, 98, 116, 16, 34*, 52*, 70*, 88*, 106*, 6*, 24, 42, 60, 78, 96, 114, 14*, 32*, 50*, 68*, 86*, 104*, 4, 22, 40, 58, 76, 94, 112*, 12*, 30*, 48*, 66*, 84*, (102) jne.

43*, 61*, 79*, 97*, 115*, 15*, 33, 51, 69, 87, 105, 5, 23*, 41*, 59*, 77*, 95*, 113, 13, 31, 49, 67, 85, 103*, 3*, 21*, 39*, 57*, 75*, 93, 111, 11, 29, 47, 65, 83*, 101*, 1*, 19*, 37*, 55*, 73, 91, 109, 9, 27, 45, 63*, 81*, 99*, 117*, 17*, 35*, 53, 71, 89, 107, 7, 25, (43*) jne.

Ka siin reastuvad diagonaalide kaupa alt üles vaheldumisi helivõrgustiku d - ja as/gis -kesksesse ossa kuuluvad helid. Diagonaal, mis lõikub helivõrgustiku vasakpoolse äärega, jätkub parempoolseimast helist kaks rida kõrgemal, näiteks järgneb teise väikeste täistoonide ringi viimases diagonaalis algushelile järjekorranumbriga 53 kaks rida kõrgemal olev heli järjekorranumbriga 71.

¹⁴ Ka nn suurte täistoonide puhul (puhtas häälestuses võnkesagedussuhtega 8:9, näiteks $d-e$), on järjekorranumbrite vahe paarisarv, nimelt 20.

Erinevalt siinkirjeldatud 53- ja 118-helilistest võrdtempereeritud häälestustest, pole Oettingeni ortotonofooniumi häälestus rangelt võttes võrdtempereeritud. Kuigi Oettingeni arvates võib 53-helilist võrdtempereeritud häälestust pidada praktiliselt täiesti puhtaks (Oettingen 1913, 256), leidis ta siiski, et “selline astmete ühetaoline järjestus ei paku mingit teaduslikku huvi” (samas, 270). Seetõttu kasutas ta oma helivõrgustiku igas reas ja veerus kõrvuti olevate helide vahel ainult puhta häälestuse intervalle (kvinte ja tertse). Nagu ma eelmainitud “Kommentaaris” märkisin, kõigub tal seetõttu kvindiringi naaberhelide vaheline intervall piires 21,5 kuni 29,6 senti. Sellest hoolimata ei erine see kunagi võrdtempereeritud häälestuse omast rohkem kui 4,4 senti, mis on peaaegu märkamatu suurus (Humal 2009, 106).

* * *

Oettingeni arvates võib puhta häälestusega ortotonofooniumi rakendada mitte ainult teaduslikel ja pedagoogilistel, vaid ka kunstlikel eesmärkidel (Oettingen 1916, 274). Eelmainitud Peter Rummenhölleri meelet on see lootus utoopiline, nii nagu ka Oettingeni püüe uue süsteemi loomise teel muusikateooriat reformida (Rummenhöller 1967, 91). Samas on tema sõnul Oettingenil esimest korda muusikateooria ajaloos muutunud muusikateoreetilised nähtused täielikult fungeerivaiks (*total fungibel*), mistõttu tekiks oht kaotada side reaalsusega, kui ei lisanduks materiaalne tegur – püüe süsteemis ettekujutatut ja kombineeritud ka kõlaliselt realiseerida, ja seda just tänu ortotonofooniumile, mida Rummenhöller iseloomustab kui “muusikateoreetilise formalismi materialiseerunud ideed” (samas).

Kirjandus

- Goldbach, Karl Traugott 2009. Arthur von Oettingen ja tema orthotonophonium oma aja kontekstis. – Res musica 1, Tallinn: EMTS, EMTA, 47–69.
- Humal, Mart 2002. Arthur von Oettingeni panus harmooniaõpetuse arengusse. – Teater. Muusika. Kino, 2002, 2, 53–60.
- Humal, Mart 2009. Kommentaarid Oettingeni ortotonofooniumi häälestuse kohta. – Res musica 1, Tallinn: EMTS, EMTA, 103–108.
- Lindley, Mark 1987. Stimmung und Temperatur. – Hören, Messen und Rechnen in der frühen Neuzeit. Geschichte der Musiktheorie. Band 6, herausgegeben von Frieder Zaminer. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 111–331.
- Oettingen, Arthur von 1866. Harmoniesystem in dualer Entwicklung. Dorpat und Leipzig: W. Glaser.
- Oettingen, Arthur von 1913. Das duale Harmoniesystem. Leipzig: C. F. W. Siegel.
- Oettingen, Arthur von 1916. Die Grundlage der Musikwissenschaft und das duale Reininstrument. – Abhandlungen der mathematisch-physischen Klasse der kgl. Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften 34. Leipzig: B. G. Teubner.
- Rummenhöller, Peter 1967. Musiktheoretisches Denken im 19. Jahrhundert. Regensburg: Gustav Bosse.

Arthur von Oettingen and Multiple Divisions of the Octave

Mart Humal

Estonian Academy of Music and Theatre

Summary

Arthur von Oettingen (1836–1920) is known as the founder of a dualistic tradition in the nineteenth-century German harmonic theory. Besides that, he advocated a system of tuning based upon pure fifths and pure major thirds.

In order to attain maximally pure fifths and thirds, various multiple divisions of the octave have been proposed since the fifteenth century. Most frequently the systems of 19, 31 and 53 tones per octave are used. Oettingen's *Reininstrument* 'Orthotonophonium', described in his book *Das duale Harmoniesystem* (1913), is based on the system of 53. In this book, he arranged fifths and major thirds into a table – *Tonnetz* – where series of pure fifths appear on horizontal axes and pure thirds on vertical axes. The *Tonnetz* of 'Orthotonophonium' is presented in Figure 1. Figure 2 presents another *Tonnetz*, used by Oettingen in his following study *Die Grundlage der Musikwissenschaft und das duale Reininstrument* (1916) for the so-called *Quint-Sexten-Reininstrument*. This *Tonnetz*, in which pure major sixths, rather than major thirds, appear on vertical axes, contains several multiple divisions of the octave, the second-to-large of them being the system of 59.

The *Tonnetz* of the system of 59 can be used as a model for the construction of a *Tonnetz* for the system of 118 (Figure 3). This *Tonnetz* consists of two parts a tritone apart. The first of them, with the tone D as its centre, is identical to the *Tonnetz* of Oettingen's system of 59 (on technical grounds, the *Kommastrichen*, used by Oettingen above or below the names of notes, are replaced by the super- and subscripts I, II, and III). The second part, located below the first one, has two enharmonically equal tones A flat/G sharp as its centre.

Whereas the tones in both parts of this *Tonnetz*, when taken separately, make up continuous cycles of fifths, the consecutive tones of the system of 118 are mostly located alternately in its two parts. Like the cycle of fifths, there is also a single continuous cycle of minor thirds (or major sixth) going through the entire system. On the other hand, there are two separate cycles of major thirds, as well as two cycles of minor and major whole tones, one of them consisting of tones with even order numbers and the other – of those with odd order numbers.

August Tõllassepp – Eesti esimesi meteoroloogide

Taavi Pae ja Erki Tammiksaar
Tartu Ülikooli geograafia osakond

1. Sissejuhatus

August Tõllassepa nimi on teenimatult puudu Eesti meteoroloogia ajaloost. Nii koh-tame 1992. aastal ilmunud meteoroloogia ajaloole pühendatud kogumikus Tõllassepa nime kahel korral vaid möödaminnes (Teaduse... 1992)¹. Siiski on tal mitmeid teeneid Eesti meteoroloogia arengus, eelkõige selle teadusharu populariseerimisel eesti keeles emakeelse teaduse sünniaastail. Lisaks eelnevale oli August Tõllassepp tegev ka poliitiku ja ajakirjanikuna. Kõigil eelnimetatud elualadel ei tõusnud ta küll kunagi esirinda ja ilmselt just selline killustumine ongi põhjus, miks temast niivõrd vähe on kirjutatud. Käes-olev uurimus valgustab tema meteoroloogiaalast tegevust. Suurem osa August Tõllassepa eluloolistest andmetest põhinevad esiautori valduses olevatel August Tõllassepa käsi-kirjalistel materjalidel².

2. August Tõllassepa kujunemisaastad

August Tõllassepp sündis 1885. aasta 2. novembril Tartumaal Kongutal Soova talus. 1900. aastal asusid tema vanemad Tartu, kus ta lõpetas 1905. a linnakooli. Juba Tartu linnakoolis tutvus ta Taavet Rootsmäega³, kes oli huvitatud astronoomiast ja tema mõjul hakkas ka A. Tõllassepp seda õppima. Koolimees Juhan Lang on meenutanud⁴: „Too-kordsel linnakooli õpilasel, hiljem meteoroloogina ja ajakirjanikuna tuntuks saanud August Tõllassepal oli tõeline pikksilm ja ta kutsus enese poole vaatlema koolivendi D. Rootsmanni ja mind“. Pärast linnakooli õppis Tõllassepp edasi veel Treffneri gümnaasiumis, kuid ei lõpetanud seda. Juba 1902. aastast alates tegi Tõllassepp kaastööd ajalehele Postimees, kus 1908. aastal sai ka kindlama koha. See võimaldas tal tõsisemalt mõelda edasiõppimisele. 1910. aastal asus A. Tõllassepp õppima Rostovtsevi eraülikooli füüsika-matemaatika teaduskonda.

20. sajandi esimese kümnendi lõpus ja teise alguses leiame Tõllasseppa sageli kaasa löömas mitmesugustes ühiskondlikes ettevõtmistes. 1909. aasta 28. aprilli Postimehes on teade, et ta on „Karskuse Sõbras“ pidanud kõne teemal „Kuidas teaduslist mõtlemisviisi

¹ Lühielulood temast on ilmunud Eesti ajakirjanikkude lühibiograafilises leksikonis (Kurvits ja Pallas, 2014) ja ka Eesti lennunduse biograafilises leksikonis (Lään, 2006). Lisaks ilmus lehe-küljepikkune nekroloog Looduseuurijate Seltsi aastaraamatus (Pae, 1973). Humoristliku persooni-keskse ülevaate Tõllassepast on andnud Karl August Hindrey (Hoia Ronk, 1926).

² August Tõllassepa abikaasa Rosalie Tõllassepp oli esiautori kauge sugulane. Kuna Tõllasseppa-del lapsi polnud, siis nendest mahajäänud raamatud ja paberid jõudsid käesoleva loo esiautorini. Tõllassepa materjalide hulgas on mitu 1950. aastatel tema enda poolt kirjutatud eluloovarianti.

³ Taavet Rootsmäe (aastani 1936 David Rootsmann). Eesti astronoomide koolkonna rajajaid. 1919–1948 Tartu Tähetorni direktor. 1919–1959 Tartu Ülikooli astronoomiakateedri juhataja.

⁴ <http://www.aai.ee/muuseum/Kalender/HTML/index.html?professortaavetrootsmaemale.htm>

kasvatada“ ning see oli osa pikemast ettekandetsüklist. Samas on märgitud, et kuulajaid oli vähe. Järgnevatel aastatel leiame Postimehest sageli, et Tõllassepp kõneleb erinevatel loodusteaduslikel teemadel (nt. sabaga tähtedest, maavärisemistest, keemiast, „päikese perekonnast“, vee tegevusest). Tõllassepp on tegev olnud ka Eesti Rahva Muuseumi töö propageerimisel. Nii on näiteks 16. septembril 1912 toimunud Raadi rahvahariduse seltsis kõneõhtu „Kodu ümbruse uurimine ja Eesti Rahva Muuseum“ (Postimees 17. sept. 1912). 1912. aastal on Tõllassepp kokku pidanud ERM-i „saadikuna“ 20 kõnet (Õunapuu, 2011). Seega võime öelda, et Tõllassepp tegeles agaralt nii loodusteadusliku maailmavaate levitamisega kui ka rahvusliku suurettevõtmise – Eesti Rahva Muuseumi – idee selgitamisega. Rahvavalgustuslikku tööd on Tõllassepp hiljem jätkanud ka Tallinnas Rahvaülikoolis (Tallinna Teataja 4. nov. 1919, lk 3).



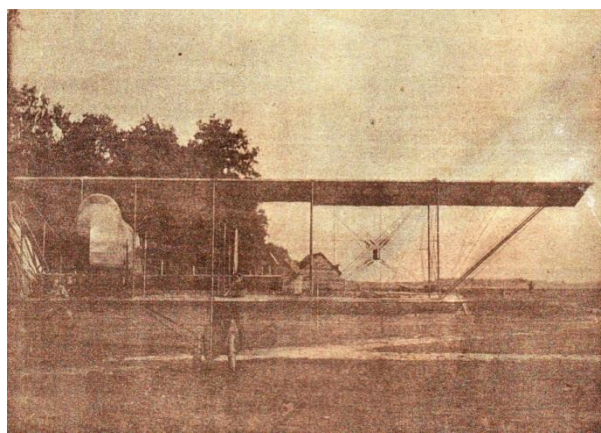
Joonis 1. August Tõllassepp 1927. aastal Pärnus.

Figure 1. August Tõllassepp in Pärnu in 1927.

3. Meteoroloog ja aeroloog Vene impeeriumi perioodil

Esimese maailmasõja puhkemise järel tuli ka Tõllassepal 1915. aastal siirduda sõjaväkke. Armee vajab meteorolooge ning tal kästi õppida Pavlovski meteoroloogia observatooriumis. 1916. aasta kevadel kursuste lõppedes suunati Tõllassepp Kiievis asunud lennukite peastaabi juures tegutsenud aeronavigatsiooni keskjaama katseosakonna vanemvaatlejaks. Oma töökohal puutus ta kokku mitme suurnimega Vene lennunduses, sest tema ülesandeks oli katseosakonna lennuki katsetamine kõrgemate õhukihtide uurimiseks, kasutades meteorograafi, millelt sai andmeid õhurõhu, temperatuuri ja niiskuse kohta. Mitmete nurjunud katsete järel õnnestus Tõllassepal meteorograaf paigutada lennuki kandepindade vahele selliselt, et õhuvoolud ei takistanud näitude võtmist. Niiviisi

saadi andmeid kuni 3000 m kõrguselt. Enamasti kasutati sellal kõrgemate õhukihtide uurimiseks pilootpalle ning arvati, et neil on kindel vertikaalne kiirus. Tõllassepp leidis, et pallide vertikaalne kiirus ei ole konstantne, vaid tavaliselt väheneb koos kõrgusega. Palli suurem vertikaalne kiirus õhu madalamates kihtides on seletatav võimsate tõusuvooludega maapinna läheduses. Samuti võib esineda ka langevaid õhuvoolusid ja need võivad jällegi palli vertikaalkiirust vähendada. Just seetõttu prooviti kõrgemate õhukihtide uurimiseks 1910. aastatel kasutusele võtta lennukit. Käsikirjaliseks jäänud raamatus „Meie õhkkond II“ (1925) kirjeldab Tõllassepp meteorograafi asetamise probleemi järgnevalt: „Loomulik on, et meteorograafi ei saa asetada lenduri lähedusse, sest seal võib nii hästi temperatuur kui ka niiskus teine olla kui vabas õhus. Meteorograaf peab lendurist kui ka mootorist võimalikult kaugemal olema. Katsetest on selgunud, et kõige parem on meteorograaf asetada lennuki kandepindade vahele. Et aga lennuki maandumise korral, kunas tõuge kaunis suur on, meteorograaf mitte vigastusi ei saaks ega meteorograafi kella mehhanism mitte seisma ei jääks, mida on karta ka enne lennuki tõusu ta maad mööda jooksmisel, sellepärast asetatakse meteorograaf vedrude abil kandepindade vahele“.



Joonis 2. Meteorograaf asetatuna lennuki kandepindade vahele (Телласепъ, 1916).

Figure 2. Meteorograph placed between wings (Телласепъ, 1916).

Tõllassepa saavutused meteorograafiga rahuldasiid aeronavigatsiooni keskjaama juhatajat Aleksander Friedmani. Tema korraldusel koostas Tõllassepp ülevaate, kuidas kasutada lennukit kõrgemate õhukihtide uurimiseks. See ülevaade paljundati Petrogradis ja saadeti laiali Vene lennuväeosadele⁵ (Телласепъ, 1916). Klimatoloog Boris Dzerdzejevski (Дзердзеjevский, 1949) on nimetanud Tõllasseppa kui esimest meteorograafiliste lendude läbiviijat. Seoses sellega on Tõllassepp ise oma ühes käsikirjalistest elulugudest kirjutanud: „Kuigi B. L. Dzerdzejevski kirjutisest saab aru, nagu oleksin mina esimesena maailmas lennukit kõrgemate õhukihtide uurimisel kasutanud, ei tea ma selle kohta midagi öelda. Küll võin aga seda väita, et olin esimene Venemaal ja et esimesed süstemaatilised lennud maailmas kõrgemate õhukihtide uurimiseks algasid 1916. aastal Kiievis

⁵ Üks eksemplar on esiautori valduses, Eesti raamatukogudes see puudub.

minu korraldusel.“ Täna sel päeval teame, et Saksamaal teostati esimene meteorograafia lend 1912. aastal lennunduspioneer Ferdinand von Hiddessen juhitud. Tulemused olid tulenevalt vibratsioonist küll ebausaldusväärsed, kuid katsetusi jätkati ja 1913. aastal asuti treenima piloote selleks ettevõtmiseks (Kington, 2005). Seega pole Tõllassepp kindlasti esimene maailmas, küll võime aga öelda, et Esimesele maailmasõjale eelnevatel ja ka sõja-aastatel selle teemaga aktiivselt tegeleti ja Tõllassepp oli Venemaal nende uuringute eesotsas.

1916. aasta suvel tegi Tõllassepp veel pilootpallide vertikaalkiiruse mõõtmisi ning tegeles vene lennunduse ja kaasaegse aero- ja hüdrodünaamika rajaja Nikolai Žukovski juhendamisel lennukilt pommi langemise kiiruse küsimustega Krimmis Katša lennukoolis. 1917. aasta oktoobris⁶ määrati Tõllassepp Kiievi lennuväe peastaabi poolt Hersonis asunud lennukooli peameteoroloogiks ja sealse aeroloogiajaama juhatajaks. Enne ametisse astumist saadeti ta aga Petrogradi (alates 1914. Peterburi ametlik nimetus) füüsika peaabstervatooriumi juurde ennast täiendama.

Selleks, et mõista Tõllassepa edasist tööd meteoroloogina ning Eesti Vabariigi meteoroloogia ajaloo arengu peamisi probleeme, on vajalik väike tagasivaade Vene impeeriumi meteoroloogiliste vaatluste ajalukku. 1849. aastal asutatud Peterburi füüsika peaabstervatooriumi ülesanne oli rajada ja koordineerida Vene impeeriumi erinevate ministereeriumite, nende allasutuste ja teadus- ning kaubandusseltside juurde rajatud meteoroloogiajaamade tööd kogu riigi ulatuses. Kõige tähtsam oli saavutada vaatluste tegemine ühtse meetodika järgi ja ühtemoodi taadeldud instrumentidega. 1850. aastaks oli see õnnestunud vaid kokku viieteistkümnes jaamas üle impeeriumi (Рыкачев 1899: 209),⁷ kuid olukord ei paranenud enne Peterburi teaduste akadeemia korralise liikme šveitsi meteoroloogi Heinrich Wildi nimetamiseni 1868. aastal füüsika peaabstervatooriumi juhiks. Enne Wildi direktorina töötanud baltisakslane Adolf Theodor Kupffer ja Tartu ülikooli geofüüsikaproffessor Friedrich Ludwig Kämtz vaid unistasid sellest võimalusest.

1860. aastate algul hakkas ameerika meteoroloog Matthew Fontaine Maury maailmas arendama meteoroloogiajaamade võrgustikku, ülesandega ennustada torme. Vene mereministereerium soovis endale sarnast võrku ning küsis peaabstervatooriumilt instruksioone, kuidas seda teha ja kuhu oleks vaja rajada jaamasid. Peaabstervatooriumi ettepanek oli rajada Läänemerele esimese järgu vaatlusjaam Tallinna, mis koordineeriuks teise järgu rajatavate jaamade tööd Narvas, Paldiskis, Haapsalus, Pärnus, Riias ja Liepajas (Рыкачев 1899: 215–216). Mereministereeriumi hüdrograafia departemang asuski oma vahendite eest meteoroloogiajaamasid Läänemere äärde rajama ning vaatlusandmed saadeti otse peaabstervatooriumisse. 1870. aastal rajati jaamad Tallinnas ja Riias, 1871.

⁶ Küll mahatõmmatuna on ta ühes käsikirjalises eluloos kirjutanud järgmist: “1917. sügisel tehti minule aeronavigatsiooni keskjaama teenijate koosoleku poolt ettepanek võtta vastu lahkunud A. A. Friedmani asemel jaama juhataja koht. Tervislistel põhjustel tuli minul kahjuks sellest auväärsest pakkumisest loobuda“.

⁷ Näiteks Eesti alal oli tehtud meteoroloogilisi vaatlusi juba 1731. aastast kokku 154 kohas, kuid need ei olnud piisava kvaliteediga, et neid saanuks kajastada füüsika peaabstervatooriumi aruannetes (vrd. Bergmann 1892: 175–180). Alles Arthur Joachim von Oettingeni vaatlused Tartu ülikooli meteoroloogia observatooriumis (Metobs) alates 1866. aastast olid piisavad Peterburi peafüüsikaobservatooriumi aruandes kajastamiseks. 1870. aastal liideti Tartu Metobs esimese järgu jaamana Peterburi peafüüsikaobservatooriumi vaatlusjaamade võrku (Kongo, 1977).

aastal Paldiskis, 1876. aastal Liepajas ning 1877. aastal rajas Venemaa kaubanduse ja tööstuse selts jaama Pärnus (Вильд 1871: 45–46; 1873: 46; 1877: 51; 1880: 142).

Seega eksisteeris 20. sajandi algul kaks vaatlusjaamade võrku: Tartu meteoroloogia observatoorium (I järgu jaam) koos oma võrguga allus Peterburi füüsika peobservatooriumile, Tallinna I järgu meteoroloogiajaam oma võrguga allus aga mereministeeriumi hüdrograafia departemangule. Kui kaua Tõllassepp oli 1917. aasta lõpul ja 1918. aasta algul kaosesse sattunud Petrogradis ja kui kaua ta täpselt oli sealse füüsika peobservatooriumi juures ametis, ei ole praegu selge. Igal juhul näitavad erinevad andmed, et tema ülesandeks sai ühel hetkel hüdrograafia departemangule kuulunud jaamadevõrgu käigus-hoidmine.

4. Meteoroloogina Eesti Vabariigis

1919. aasta jaanuaris astus Tõllassepp Eestis sõjaväe vabatahtlikku lennuväesalka⁸ ja 1919. aasta mais ühines Eesti sõjaväe loodud Tallinna mereobservatooriumiga, mis moodustati hüdrograafia departemangu I järgu Tallinna meteoroloogiajaamast⁹. Edasise perioodi kohta pakub head ülevaadet Rahvusarhiivis säilitatav Mereobservatooriumi fond¹⁰. Näiteks on 1919. aasta kohta olemas lühikeste perioodide kaupa ülevaadet mereobservatooriumi töötajate tegemistest. Aruandest 15. mai – 14. juuni loeme, et aeroloog Tõllassepp täitis sünoptiku abi kohuseid ja võttis osa ka meteoroloogia õpperaamatu kokkuseadmisest (koos Voldemar Kurrikuga). Ühtlasi tegi ta vaatlusi rahvusvahelise programmi järgi pilootpallidega. Järgmises aruandes on märgitud, et Tõllassepp oli Kurrikul abiks sünoptiliste kaartide joonistamisel. Juulikuu alguses on märgitud, et lisaks eelmainitud töödele võttis ta osa õiste ajasignaali vastuvõtmisest ja kohaliku õige aja väljaarvutamisest ning täitis ka instrumentide osakonna juhataja kohuseid. Aruannetest nähtub, et Tõllassepp töötaski palju koos Voldemar Kurrikuga, keda samuti võib pidada üheks Eesti esimeseks meteoroloogiks¹¹. Kurrikuga koostöös valmis neil tõlketööna

⁸ ERA.1663.1.8, 12

⁹ ERA 1663.1.7 pg-ta

¹⁰ ERA 1663

¹¹ Voldemar Kurrik (1878–1925) oli eesti koolmeistri ja rahvusliku liikumise tegelase Juhan Kurriku (1849–1922) poeg. 1898–1917 õppis vaheaegadega Tartu Ülikoolis matemaatikat. Siinkohal toome täisteksti A. Tõllassepa järelhüüdest Kurrikule, mis ilmus 17. juuli Postimehes 1925.

Eile sängitati Tartus maamulda Woldemar Kurrik. Wähed tundsid teda. Selleks oli ta liiga tagasihoidlik, oli sunnitud rohkem iseenele elama, et teda oleks laialt tuntud. Mitte kunagi ette-tükkiw, mitte kunagi pealekäiw, waikse iseloomuga, sõbralik ja leplik kõigeaga, elas ta laiemale hulgale tähelepanemata. Ainult ta lähedal seisjad, need, kellega temal oli iga päew tegemist, oskasid teda hinnata kui inimest ja tema laialisi teadmist meteoroloogia alal. Woldemar Kurrik oli üks nendest vähestest, kelle huwid ei piirdunud mitte ainult oma eriala meteoroloogiaga, waid kes tundis huvi kogu teaduse wastu ja mõneski teises küsimuses peale meteoroloogia tundis enese õige kodus. Suur hulk kirjutusi meie ja wäljarnaa ajakirjades näitawad, kui mitmekesiselt haritud ja kui hoolsa töömehe oleme laotanud. Weel Paar päewa tagasi ilmus tema sulest „Eesti kirjanduses“ kirjutus J.Kunderist ja „Agu’s“ kirjutus kalendri reformist. Selle kõrwal weel käes-olewal aastal rida kirjutusi maalikunstist, teatrist, muusikast jne. Selle laialise huwi peale vaatamata oli siiski meteoroloogia tema armsamaks teaduseks, millele ta oli pühendanud oma elu. Palju aastaid oli ta meil sellel alal ainukeseks eriteadlaseks, kes täie õigusega wõis eri-

käsikiri „Ilmastik – meteoroloogia ainenä“ (122 lk). See tõlgiti vene meteoroloogi Gennadi Ljuboslavski raamatu põhjal¹². Ilmselt on tegemist sama raamatuga, mille koostamist mainiti ka observatooriumi tegevusaruandes.

1920. aasta kevadel, mil Tallinna mereobservatoorium ja selle võrk allutati Tartu ülikooli juures tegutsenud meteoroloogia peobservatooriumile, jätkasid nad Tartus koos Kurrikuga sünoptikutööd. 1920. aastate alguses ilmus Tõllassepalt kaks raamatut. Neist esimene – „Vanasõnad ilmadest“ – ilmus 1920. aastal Rahvaülikooli kirjastuses (koostatuna peamiselt Tallinnas) (Tõllassepp, 1920). See oli esimene sedasorti kogumik, milles prooviti kokku võtta eestlaste ütlemissed ilmade ja ilmaennustamise kohta. Raamatu eessõnas valgustab Tõllassepp ka teose koostamislugu. Nimelt oli temani jõudnud Jaan Gutvesi¹³ käsikiri ilmatarkuse sõnadest, mida viimane oli kogunud kümmeaasta eest ja edutult üritanud avaldada. Tõllassepp oli käsikirjaga tutvunud 1917. aastal Eesti Kirjanduse Seltsis ning iseloomustab käsikirja kui lihtsalt „teatavas järjekorras väljakirjutatud ilmatarkuse sõnu“. Vanasõnad põhinesid Gutvesi ja veel nelja kaaskorjaja informatsioonile (Avinurmest, Kabalast, Raplast ja Haanjust), kes olid vastanud ajakirjanduses ilmunud üleskutsele. Tõllassepp märgib, et Gutvesi vanasõnakogum pole esinduslik, kuna täiesti puuduvad merega seonduvad vanasõnad. Tõllassepp on Gutvesi kogule (500 vanasõna) umbes sadakond vanasõna juurde kogunud¹⁴ (teiste hulgas on infot saatnud näiteks Artur Toom Vilsandist) ning on need tundemärkide järgi grupeerinud. Üle poole

teadlase nime kanda ja kuni viimase silmapilguni meil esimesena püsida. Keegi ei ole meil Eesti kliima uurimisealal nõnda palju ära teinud kui W. Kurrik. Tema viimaseks suuremaks tööks oli „Eesti kliima“, mis ilmus „Eesti looduses.“ Peale selle on tema poolt rida üksikasjalisi uurimisi meie kliima kohta, milledest ainult osa on avaldatud, kuna teised veel trükkimist ootavad. Tähtsamad nendest on üksikute maakondade kliima uurimised, Soome lahe tormid, Eesti sademed ja lumekate jne. Mõned nendest kirjutustest, mis on ilmunud meil üksikutes kuukirjades, väärivad isearulist tähelepanu. Üheks sarnaseks suuremaks ja huwitavamaks tööks on läinud aastal „Agronomias“ ilmunud kirjutus, milles selgitatakse ilmastiku ja viljakaswu wahekorda. Peab ütleva, et selle töö tulemused meile õige huwitavad on ja et ta on meil ainukeseks sellesarnaseks tööks. Kahju, et W. Kurrikul ei läinud korda ka teisi sarnaseid uurimisi lõpule viia. W. Kurriku suuremaks tööks meteoroloogia alal on tema „Meteoroloogia“ õpperaamat koolidele. See töö, mis temalt aastaid nõudis, sai alles läinud aastal valmis ja anti haridusministeeriumi toetusel välja. 1919. aastast alates on W. Kurrik ilmade ennustajaks, alguses Tallinnas mereobservatooriumis ja 1920. aastast ülikooli meteoroloogia observatooriumis tegew olnud. See tänamata närwide peale käiw töö, mis ei anna sulle ei päewa- ega öörahu, waid alati nõuab walwelolekut, mõjus ka Kurriku nõrga terwise peale nõnda, et ei suutnud enam wastu pidada. Kurriku surmapäew on Eesti meteoroloogiale tõsiseks leinapäevaks, iseäranis aga veel nendele, kes teimaga elus kokku puutusid, kes temaga meteoroloogi alal ühes töötasid. Need wähesed lähedalseisjad teawad, et Woldemar Kurrikuga oleme kaotanud tõsise töömehe, inimese, kes oma elu ka kõige raskematel silmapilguni kellegile ei keelanud ja kelle mälestus alati armsaks jääb. Puhka rahu. Sa wäsimata töömees!

¹² Tõlgiti Gennadi Ljuboslavski raamatu „Основания учения о погоде“ teisest trükist (1915), mis oli toleaeegse Venemaa üks parimaid meteoroloogiaõpikuid. Käsikiri asub TÜ raamatukogus.

¹³ Jaan Gutves (1866–1937) oli Haanja valla tähtsamaid kultuuritegelasi olles „... kirjanik, ajakirjanik, luuletaja, komponist, koorijuht, peokõneleja, organisator, seltsitegelane, 1905.a. mäsuline, vanavarakoguja, muinsustegelane, loodusesõber jne.“ Postimees, 5. september 1936.

¹⁴ Ilmselt on kogumise taga ajalehes Tallinna Teataja 31. dets 1919 ilmunud üleskutse. Vanasõnad pidi saatma kas Eesti Kirjanduse Seltsi või siis Johannes Voldemar Veski kodusele aadressile.

raamatust võtab enda alla Tõllassepa arutus ja seletus vanasõnade paikapidavuse üle ilmade ennustamisel. Ta puudutab ka meteoroloogiliste oskussõnade probleemi ning vanasõnade teaduslikku väärtust. Raamatu lõpus on toodud kõigi vanasõnade jaotus 14 klassi lähtuvalt vanasõna iseloomust. See raamat on ajendanud veel tänaselgi päeval analüüsima vanasõnade paikapidavuse küsimust ilmade ennustamisel (vt. Sepp, 2013).

Teine raamat „Meie õhkkond“ ilmus 1923. aastal Tartus (Tõllassepp, 1923a). Sissejuhatavas tekstis on Tõllassepp öelnud, et seni pole eesti keeles ilmunud ühtegi raamatut, mis annaks ülevaate meteoroloogiast. Raamatu keelelist korrektuuri luges Johannes Voldemar Veski. Raamatu esimene osa käsitleb peamiselt meteoroloogia olemust ja tähtsust ning ka ajalugu ja meteoroloogiajaamade süsteemi korraldust. Teise osa raamatust moodustab õhkkonna (atmosfääri) kirjeldus. Raamatu lõpus on kolmel leheküljel toodud kasutatud kirjandus, kusjuures iga allika taha on lühidalt lisatud ka teose iseloomustus. Peamiselt koosneb see nimekiri saksakeelsetest väljaannetest. Järgneval aastal ilmus meteoroloogiaalane teos ka Tõllassepa kolleegilt Voldemar Kurrikult (1924). Siinkohal pole selge, miks kaks töökaaslast oma jõudusid pole ühendanud ja on eraldi teoste kallal tegutsenud. Üheaegselt ilmunud teoseid võime pidada esimesteks eestikeelseteks ülevaatlikeks meteoroloogiaraamatuteks. Siinkohal võib veel lisada, et Kurrikult ilmus 1924. aastal ka esimene Eesti kliimaatiline liigestus (Kurrik, 1924). Käesoleva kirjutise esiautori valduses on veel käsikiri, mis on eessõna järgi raamatu „Meie õhkkond“ järg. Sissejuhatuses mainib Tõllassepp: „Raamatu kokkuseadmisel on püütud võimalikult rohkesti igasuguseid andmeid anda. See on küll töö suuremaks ja isegi kohati arusaamiseks raskemaks teinud kui see on lubatav rahvaraamatule, kuid selle peale vaatamata pidasin nende andmete toomise siiski tarvilikuks, sest puudub ju meil emakeeles meteoroloogiline erikirjandus, kust meteoroloogiast huvitatud lugeja võiks andmeid leida.“ Eessõnas avaldab ta tänu meteoroloogia observatooriumi assistendile Johannes Süttile ja ka Kurrikule ning keelelise abi eest J. V. Veskile. Eessõna lõpeb dateeringuga 1925. Käsikiri koosneb üheksast peatükist: päikese kiirgamine, temperatuuri mõõtmine, maapinna temperatuur, merepinna temperatuur, õhu temperatuur maapinna läheduses, temperatuur Eestis (mis põhineb Johannes Süti kandidaaditööl, vt Sütt, 1924), temperatuur ja taimeriik, kõrgemate õhukihtide uurimine, kõrgemate õhukihtide temperatuur. Nagu näha on eraldi ja suhteliselt põhjalik peatükk pühendatud kõrgematele õhukihtidele, temale, milles Tõllassepp oli kahtlemata spetsialist.

Vabariigi algusaastail avaldas Tõllassepp ka mitmeid meteoroloogiaalaseid kirjutisi Eesti ajakirjanduses. Eelkõige ilmusid need Postimehes, kuid Tallinna perioodil ka Päevalehes. Järgnevalt on toodud ülevaade Tõllassepa meteoroloogiaalasest tegevusest Eesti ajakirjanduses aastail 1918–22 (kui pole teisiti märgitud, on lood ilmunud Postimehes).

1918

Põllumajanduslik meteoroloogia Venemaal (Post. lisa nr 2); Pilved ilmade ettekuulutajana (Post. lisa nr 3); Meteoroloogia igapäevaelus (9.III); Põllumajanduse meteoroloogia ülesannetest (18.V); Vanarahva ilmatarkus (18.; 25.V); Meteoroloogia ja põllumajandus (8.VI).

1919

Ilmakaarte nimetused (Pvl. 1.X); Oktoobrikuu külmad (Pvl. 5.XI); Torm (Pvl. 28.XI)

1920

Külm jaanuarikuu (Pvl. 31.I); Meil tuleks meteoroloogiline keskasutus luua (Pvl. 4.III); Missuguseks saab meie tänavune kevade ja suvi ilmade poolst (16.III); Mõned loodusteaduslised oskussõnad (Pvl. 1.VI).

1921

Kuidas suur sula tuli? (11.I); Meteoroloogia ja igapäeva elu (8.II); Põllumees ja ilmad (4.IV); Rahesajud ja rahekahjud (15.VI); Meteoroloogia õpetamine koolis (8.VII); Ilmade seisukord (4.VIII); Kui suures piirkonnas on ühesugused ilmad (Tallinna Teataja, 29. X).

1922

Ilmakaart ilmade ennustamiseks (Laevandus, 8); Meteoroloogia observatooriumi ilmade ettekuulutamise osakonna Tallinna üleviimine (2.I, anonüümsena); Kas on mõtet Tallinna meteoroloogia observatooriumi asutamiseks (3.I); Kas käib ilmade ettekuulutamine Tartu meteoroloogia observatooriumile üle jõu? (5.I); Mis tuleks meil ilmade ettekuulutamiseks teha? (11.I); Ilmakaart ja ilmade ettekuulutamine (30.VI; 3.VII); Mis tuleks ilmajaamade võrgu korraldamiseks teha (7.X).

Tõllassepa artiklite hulgast leiame nii ilmaennustuste seletusi kui ka tagantjärele (ekstreemsete) ilmanähtuste analüüse. Huvipakkuvad on ka meteoroloogiavõrgu korraldust käsitlevad artiklid, millest leiab fakte noore vabariigi meteoroloogiasüsteemi ülesehitamise mõtestamiseks. Selles põrkuvad nii Tallinna-Tartu vastasseis (vt joonis 3) kui ka vabariigi vaesus. Kuigi 1920. aastal toodi meteoroloogia observatoorium Tartusse, oli endiselt ka neid, kes soovisid, et keskne asutus peaks ikkagi asuma Tallinnas¹⁵. Konkreetsemalt oli ajendiks 1921. aasta oktoobri alguses Soome lahel möllanud torm¹⁶, mida (Tartust) ette ei osatud ennustada. See viis mõtled selleni, et ilmaennustust on vaja peamiselt meremeestele ja seetõttu peab ilmade ennustamine toimuma mere ääres.

Peamine eestkõneleja oli „keegi“ Vladimir Ivanov, kes töötas varemalt mereobservatooriumis¹⁷. Tõllassepp seletas järgnevatel päevadel Postimehes põhjalikult asjaolusid, miks see torm jäi ennustamata (torm tuli idast ja ilmasteenistustel puudus kontakt Venemaa meteoroloogiateenistusega) ning tõi maailmast palju näiteid kohtadest, kus meteoroloogiakeskused ei asu mere ääres, vaid kaugel sisemaal (nt Pariis). Ühe huvitava probleemi, mis seostus Tartu meteoroloogia observatooriumiga, tõi Tõllassepp välja aga seoses raadiotelegrammide vastuvõtmisega. Kuna observatooriumi lähedal asus haavakliinik, siis raadiolainete vastuvõtmist segas sealne röntgeniapparaat (Post. 11 I).

¹⁵ 1920. aastal oli selle taga hilisem tuntud poliitik Hjalmar Mäe (Post. 2. jaanuar, lk 3).

¹⁶ 1921. aasta 5. oktoobri Päevaleht kirjutab pealkirja „Haruldane maru maal ja merel“, et linnas on palju puid murdunud ning paljude ankrus seisnud laevade olukord on kriitiline. Sama päeva Postimees teatab, et Viru rannas on mitmed purjelaevad hukka saanud ning Narva ligidal on madalikule jooksnud üks inglise aurik. Ka Kadrioru randa on mitu purjelaeva paisatud.

¹⁷ Tõllassepp kirjutab temast üheltpoolt kui tundmatust isikust, teisalt toob tema kohta palju fakte, mis näitab, et nad on koos ka töötanud. 1919. aasta juunis on neid igatahes koos mainitud Mereobservatooriumi juhataja päevakäsus (ERA 1663.1.1, l. 2).



Joonis 3. Karikatuur, mis naeruvääristab ideed viia meteoroloogia observatoorium tagasi Tallinna (Post., 1922 11.I).

Figure 3. Caricature ridiculing the idea to move the meteorological observatory back to Tallinn. Published in Post. on 11 January 1922.

1923. aastast Tõllassepal pikemaid meteoroloogiaalaseid artikleid enam ei ilmu. Võime küll oletada, et järgnevatel aastakümnetel ilmunud lühikeste anonüümsete ilma-teadete ja ka maailma ekstreemseid ilmastikunähtuseid kajastavate lühinuppude taga on Tõllassepa käsi¹⁸. 1923. aastal leiame ühe tähelepanuväärse artikli hüdroloogia valdkonnast. Aasta viimasel päeval ilmus Postimehes ülevaade Emajõe veeseisust viimase poole-saja aasta jooksul. See hõlmab peaaegu kogu lehekülje ja on varustatud mitme tabeli ja graafikuga. Artiklit on ajendanud kirjutama 1923. aasta sügisene kõrge veeseis Emajões (28. novembril 354 cm üle nulli). Kuigi artiklil autor puudub, leiame 1924. aasta ajakirjast Loodus selle artikli tutvustuse, kus on öeldud, et autoriks on just Tõllassepp (tutvustava artikli autori allkirjaks on –i–, suure tõenäosusega Gustav Vilbaste).

1923. aastal esineb Tõllassepp I üleriiklikul loodusloo ja maateaduse kongressil referaadiga meteoroloogilistest vaatlustest. Ta soovib muretseda kõigile koolidele ühesugused vaatlusriistad, teeb ettepaneku ka kirjastustegevuseks, kus eelkõige oleks vaja esimeses järjekorras avaldada pilvede atlas ja üldine juhatuskiri meteoroloogilisteks vaatlusteks (Tõllassepp, 1923b). Tõllassepp soovib, et meteoroloogia lisataks maateaduse tunnide koosseisu, mille vastu olid jällegi geograafid eesotsas Anton Partsi ja Edgar Kantiga, kuna see vähendanuks niigi nappide geograafiatundide hulka¹⁹.

¹⁸ Eesti Kirjandusmuuseumi August Annisti fondis (EKA.F 218, M65:25) on säilitamisel ühe Tõllassepa käsikirja algus (Ilmade ennustamine, 14 lk). Annist toimetas aastatel 1931–1940 Eesti Kirjanduse Seltsi poolt väljaantavat populaarteaduslikku raamatusarja „Elav Teadus“ ning võib oletada, et see käsikiri oli mõeldud seal avaldamiseks. Kui nii, siis tegeles Tõllassepp ilma-teemaga veel ka 1930. aastatel, kuid tulemuselt.

¹⁹ Anton Partsi kirjavahetus Johannes Gabriel Granöga Soome Kirjanduse Seltsis Helsingis (Partsi kiri Granöle 8.IV 1923).

5. Lahkumine meteoroloogia observatooriumist ja ajakirjanikutöö

1924. aasta 14. märtsil on Tõllassepp kirjutanud meteoroloogia observatooriumi juhatajale lahkumispalve²⁰, mis ka rahuldati. 27. märtsil ilmub lahkumisteade ka ajalehes Postimees, kus on lisatud, et edaspidi pühendab Tõllassepp oma jõu täielikult tööle Postimehe toimetuses. Tema poolt valgustatav teemadering oli enamasti seotud majanduse ja väliskaubandusega ning paljudel aastatel on võimalik tuvastada üle saja artikli²¹. Sellega oli ta kindlasti üks Postimehe põhilistest töötajatest ning tema roll ja panus Postimehe juures vajaks veel eraldi uurimust. Põhjalikumatest kirjutistest ilmus temalt 1940. aastal artikkel, mis käsitles inimese kasvatamise kulusid ja rahvasse investeeritud kapitali (Tõllassepp, 1940). Arno Raagi (1974) järgi oleks seda tööd võinud kasutada ka Tartu Ülikooli lõputööna, kuid puuduv keskharidus seda ei võimaldanud. Lisaks ajakirjanikutööle oli ta poliitikamaastikul Postimehe peatoimetaja Jaan Tõnissoni ustav jänger, kuuludes nii III (1926–29), IV (1929–32) kui ka V riigikogusse (1932–34(37)), täites nii IV kui ka V riigikogu koosseisus, ühtlasi ka juhatuses esimese abisekretäri ülesandeid. Tõllasseppa on Tõnissonile „kaasajooksmisses“ suisa süüdistatud (Raag, 1974). Kindlasti polnud Tõllassepp poliitikas esilekerkiv isik, seda juba oma iseloomuomaduste poolest.

6. Keerulised aastad ja tagasi meteoroloogia juurde

1940. aasta suvest kuni 1941. aasta veebruarini töötas Tõllassepp ajakirjanikuna Tartu Kommunisti toimetuses ja edasi kuni Tartu vallutamiseni sakslaste poolt oli ta Tartu linna Täitevkomitee plaanikomisjoni vanemaks ökonomistiks. Suurema osa Saksa okupatsiooni ajast oli ta töötu, kuid lühemat aega oli ta siiski tegev ka Postimehes. Nii näiteks kogus ta andmeid Tartu linna kütteprobleemide kohta ja avaldas sellest ka põhjaliku artikli (Post 6.V 1942). Nõukogude okupatsiooni alguses oli ta jällegi Täitevkomitee plaanikomisjonis vanemaks inspektoriks.

14. aprillil 1945. aastal Tõllassepp arreteeriti. Sõjaväe prokurör leidis ühest sõja ajal Postimehes ilmunud kirjutisest lause, mis tema arvates olevat saksasõbralik²². 1945–1950 viibis Tõllassepp vangis, mil pöördus tagasi oma vana armastuse – meteoroloogia – poole. Ta koostas vanglas töö „Ilmade ennustamine eestlaste vanasõnade põhjal“, mille käsikirja ta edastas vangla kultuurosakonna ülemale, kuid rohkem märke sellest tööst pole säilinud. 1957. aastal ilmus ajakirjas Noorus ülevaade vanade eestlaste tähistaevast²³, mis põhines suuresti Kirjandusmuuseumi rahvaluule arhiivil (Tõllassepp, 1957). Siinkohal tasub meenutada, et astronoomia oli üks teemadest, millest Tõllasseppa huvi loodusteaduste ja meteoroloogia vastu alguse sai. Vangla-aastail alustas ta ka tööga „Meteoroloogia kõigile“, mis lõplikult ilmus alles 1960. aastal sarjas „Teaduse teedelt“ (Tõllassepp, 1960).

²⁰ EAA.2100.6.287.

²¹ On säilinud Tõllasseppa märkmikud, kuhu ta on sisestanud andmeid oma kirjutistest.

²² ERAF.129 SM.1.11400. ENSV Riikliku Julgeoleku Komitee lõpetamata uurimistoimikute kollektsioon, August Tõllasseppa isikutoimik.

²³ On säilinud 15. lk konspekt „Vanade eestlaste tähistaevas“, mis on ilmselt avaldatud artikli pikem versioon.

7. Kokkuvõte

August Tõllassepp oli Eesti üks esimesi meteorolooge. 1920. aastate esimesel poolel ilmunud raamatud ja arvukad ajaleheartiklid täitsid mitmeski mõttes pioneerirolli, sest toona eestikeelne akadeemiline meteoroloogiaalane kirjandus puudus. Töötades Vene tsaaririigi sõjaväes, puutus ta kokku Vene lennunduse suurnimedega, tegeledes väga vara aerometeoroloogia probleemide lahendamise, sarnaselt muu maailmaga. Võime vaid spekuloida, kas Tõllassepast oleks saanud üks esimesi eestlasest meteoroloogia eriteadlasi, kui ta oleks saanud vastava kõrghariduse. Siiski, ilmselt rahalistel põhjustel, valis Tõllassepp noores vabariigis ajakirjaniku- ja poliitikutöö. Loomuomadustelt tagasihoidlikuna ei tõusnud ta ei poliitiku ega ka ajakirjanikuga rambivalgusesse. Siiski võib tema rahvalgustuslikku tööd ajalehes Postimees pidada vägagi nimetamisväärseks, sest kokku tegi ta seda peaaegu 40 aastat. Tema pärastõjajärgne tegevus näitas aga, et vana armastus loodusteaduse vastu ei olnud ununenud ning 1960. aastal ilmunud populaarteaduslik raamat „Meteoroloogia kõigile“ oli ilusaks lõppakordiks ühele pikale ja keerulisele eluteele. Et Tõllassepa panus meteoroloogia arengusse pärast Teist maailmasõda Eestis päris unustusesse ei vajanud, osutab fakt, et 1965. aastal, mil tähistati Tartu meteoroloogia observatooriumi 100. aastapäeva, sõidutasid uue põlvkonna nimekad meteoroloogid Herman Mürk ja Heino Tooming Tõllassepa aukülasena juubeliaktusele (Tooming, 2001). August Tõllassepp suri 1970. aasta detsembris ja on maetud Tartus Pauluse kalmistule.

Tänu

Uurimust on rahastanud Eesti Teadusagentuur (IUT2-16 ja IUT2-17).

Kirjandus

- Bergmann, R. 1892. Über die Vertheilung und Thätigkeit der meteorologischen Stationen in Russland, von der ersten Anfängen bis zum Jahre 1889 inclusive. – Repertorium für Meteorologie, 15(11).
- Hoia Ronk, 1926. August Tõllassepp. – Kaasaegsed. Tartu, 109–110.
- Kington, J. A., 2005 The Role of Weather Flights in the History of Meteorology. – From Beaufort to Bjerknes and beyond: Critical perspectives on observing, analyzing, and predicting weather and climate. Stefan Emeis and Cornelia Ludecke (eds.). Algorismus, 52, 215–224.
- Kongo, L. 1977. Johann Karl Friedrich Weihrach – Tartu ülikooli esimene füüsilise geograafia ja meteoroloogia professor. Tartu ülikooli ajaloo küsimusi V, 123–137.
- Kurrik, V. 1924. Meteoroloogia, ehk, Ilmateaduse õpetus. Tartu, 192 lk.
- Kurrik, V. Eesti kliima valdkonnad. – Loodus, nr. 9, 473–485.
- Kurvits, R., Pallas, A. 2014. Brendekenist Peegliini. Eesti ajakirjanduse biograafiline lühileksikon 1689–1940. Tartu, 208 lk.
- Lään, V. 2006. Kes on kes Eesti lennunduses. Tallinn, Tartu, 239 lk.
- Pae, A. 1972. August Tõllassepp [nekroloog]. – Eesti Loodusuurijate Seltsi aastaraamat. 62, 223–224.
- Raag, A., 1974. Saatuslikus kolmnurgas. Mälestusi 1939–1944. Lund, 239 lk.
- Sepp, M. 2013. Ilmavanasõnad ja ilmastikuteadus. – Eesti Loodus, 9, 21–25.
- Sütt, J. 1924. Temperatuuri olud Eestis. Magistritöö TÜ raamatukogus, 99 lk.
- Teaduse ajaloo lehekülgi Eestis VIII, 1992. Toim. H. Mürk. Tallinn, 280 lk.
- Tooming, H. 2001. Ilm ja inimesed. Tallinn, 326 lk.
- Tõllassepp, A. 1920. Vanasõnad ilmadest. Tallinn, 112 lk.
- Tõllassepp, A. 1923a. Meie õhkkond. Tartu: Loodus, 90 lk.

- Tõllassepp, A. 1923b. Meteoroloogilised vaatlused. – *Kasvatus*, 7, 216–217.
- Tõllassepp, A. 1940. Inimese kasvatamise kuludest ja rahvasse investeeritud kapitalist meil. Tallinn, 20 lk.
- Tõllassepp, A. 1957. Vanade eestlaste tähistaevas. – *Noorus*, 5, 20–21.
- Tõllassepp, A. 1960. Meteoroloogia kõigile. Tallinn, 292 lk.
- Õunapuu, P. 2011. Eesti Rahva Muuseumi loomine ja väljakujunemine. *Dissertationes historiae Universitatis Tartuensis*, 23.
- Вильд Г. И. 1871. Отчет по Главной физической обсерваторий за 1870 год. – Приложение к XIXому тому Записок Императорской академии наук, № 5. С-Петербург: Императорская академия наук.
- Вильд Г. И. 1873. Отчет по Главной физической обсерваторий за 1871 и 1872 год. – Приложение к XXIIому тому Записок Императорской академии наук, № 1. С-Петербург: Императорская академия наук.
- Вильд Г. И. 1877. Отчет по Главной физической обсерваторий за 1875 и 1876 год. – Приложение к XXXому тому Записок Императорской академии наук, № 7. С-Петербург: Императорская академия наук.
- Вильд Г. И. 1880. Отчет по Главной физической обсерваторий за 1879 и 1880 год. – Приложение к XLIIому тому Записок Императорской академии наук, № 1. С-Петербург: Императорская академия наук.
- Рыкачев М. 1899. Исторический очерк Главной физической обсерватории за 50 лет ея деятельности. 1849–1899. С.-Петербург: Императорская академия наук.
- Телласеп, А. 1916. Установка змейкового метеорографа на аэроплане (1916), autori valduses.

August Tõllassepp – one of the first Estonian meteorologists

Taavi Pae and Erki Tammiksaar
Institute of Geography, University of Tartu

Summary

The article gives an overview about one of the first Estonian meteorologists – August Tõllassepp. Tõllassepp was also active as a journalist and a politician, and therefore, his works in meteorology are less known. He was born in Tartu County in 1885. Having studied some years at the Rostovtsev Private University, he worked within the system of meteorology and aerology of the Russian Empire during WWI, where he met many outstanding Russian scientists, among them Nikolay Zhukovsky. His most important scientific contribution involved investigations of higher levels of the atmosphere by planes (using the meteorograph). After Estonia's gaining of independence, Tõllassepp worked for the Estonian national meteorological system. He published several books (e.g. *Proverbs about weather*, 1920; *Our atmosphere*, 1924). Starting from 1924, he worked as a journalist at the newspaper *Postimees*, mainly addressing economic issues. After WWII, he returned to the field of meteorology and in 1960 he published a popular scientific book *Meteorology for all*. Tõllassepp died in Tartu in 1970.

Eesti meteoroloogilise digitaalse andmebaasi ja andmetöötuse ajaloo

Tiina Tammets
Eesti Keskkonnaagentuur

1. Sissejuhatus. Digitaalne andmetöötlus kuni 1991. aastani

Infotehnoloogia muutub tänases maailmas väga kiiresti ja sellepärast on oluline üles tähendada Eesti meteoroloogilise digitaalse andmetöötuse algusaja mõned verstapostid. Allpool toodud ülevaade sisaldab olulisemaid sündmusi Eesti digitaalse meteoroloogilise andmetöötuse ajaloo ja kasutatud digitaalsetest andmebaasidest alates taasiseseisvumise eelsest ajast kuni vaatluste automatiseerimiseni ja üleminekuni Oracle'i andmebaasile 2003. aastal.

Meteoroloogiliste andmete arvutitöötusele mindi üle endises NSVLiidus 1970-ndate aastate alguses. Esialgu toimus kogu töötlus Novosibirskis, hiljem aga Moskva külje all Kaluga oblastis, Obninskis. Digitaliseeritud andmed säilitati vaid Obninskis suurtel magnetketastel. Valmistatud meteoroloogilised tabelid saadeti postiga Eestisse ja need on säilitatud Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Fondis.

2. Iseseisvale andmetöötusele üleminek. Ülesanded ja plaanid

Juba enne Eesti taasiseseisvumist töötati meteoroloogide poolt välja Eesti Vabariigi meteoroloogia, hüdroloogia ja keskkonnaseire kontseptsioon. Seega oldi Eesti taasiseseisvumisel valmis jätkama vabariigi meteoroloogilist teenindamist. Eesti meteoroloogiatalitus läbis edukalt välisekspertide poolt läbi viidud ekspertiisi. Samas märgiti, et tegemist ei ole iseseisva riigi meteoroloogiatalitusega ja et üheks olulisemaks vajakajäämiseks oli iseseisva andmebaasi puudumine. Iseseisva andmebaasiga on aga seotud kogu meteoroloogiajaamade andmete kogumise, kontrolli, töötlemise, tabelite vormistamise ja säilitamise süsteem. Selline süsteem oli Eestist kadunud 20–25 aastat tagasi, mil loodi Üleliiduline Meteoroloogiliste Andmete Automatiseeritud Töötlemise Keskus. Eesti meteoroloogiatalitus kaotas sellega töökogemuse, ametikohad ja kvalifitseeritud kaadri. Seega seisis ees vastava süsteemi taasloomine. Ülesandega hakkas tegelema tollase Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituudi (EMHI) teadusuuringute osakonna rakendusklimateoloogia sektor eesotsas Jaan Jõgiga. EMHI teadusuuringute osakond kujunes Eesti Agrometeoroloogia Laboratooriumi baasil. Laboratoorium loodi 1966.a ja ta kuulus kuni 1976. aastani Leningradi Vojeikovi nim Geofüüsika Peaobservatooriumi alla, 1976–1977. aastal Obninskis asuva Eksperimentaalmeteoroloogia Instituudi ja aastail 1977–1991 Üleliidulise Põllumajandusmeteoroloogia Teadusliku Uurimise Instituudi koosseisu.

Rakendusklimateoloogia sektori ülesanneteks EMHI-s olid Eesti meteoroloogia andmebaasi taasloomine, andmete arvutitöötuse organiseerimise, säilitamise ja publitseerimisega seotud tegevus ning Eesti kliima teaduslik uurimine, samuti sellega seonduvate rakenduslike aspektide analüüs. Meteoroloogilise andmebaasi loomise eelduseks on meteoroloogiajaamade andmete kogumise, kontrolli, korrigeerimise ja töötuse süsteemi olemasolu, millega tagatakse andmete säilimine ja kättesaadavus kasutajatele.

Tolleaegsed meteoandmed põhinesid vaatlejate poolt mõõdetud, hinnatud, kodeeritud ja kodeeringutena edastatud failidel või telegrammidel. Sünoptilistest andmetest erinevad kuu lõpus kogutud andmed oma kontrollituse tasandilt ja mahult (vaadeldavate või mõõdetavate elementide hulgalt). Kliimandmetest, mis hiljem kanti WMO ametlikku andmebaasi CLICOM, erinevad meteoroloogilise andmebaasi andmed ridade pikkuse poolest, elementide hulgalt ja esitusviisilt ning ettevalmistustasemelt. Rakendusklimateoloogia sektori ees seisvad ülesanded olid:

• ***Meteoroloogilise režiimi andmebaasi ja tabelite koostamine, millega seondus:***

1. Meteoroloogiajaamade ja -postide (sademetejaamade) vaatlusandmete kogumine, kontrollimine, töötlemine ja säilitamine.
2. Kuu lõpus vaatlusandmete kokkuvõtete koostamine. Nendes kokkuvõtetes tuuakse välja kõikide meteoelementide vaatlusandmed nii päevade kui täht-aegade viisi, päeva, dekaadi ja kuu keskmised näitajad, meteoelementide äärmusväärtused jm. Andmed säilitatakse pikaajaliseks hoidmiseks magenetlintidel.
3. Meteoroloogiliste tabelite väljatrukkimine paberile nende säilitamiseks Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Fondis (EMHF-s).

• ***Meteoroloogiliste kuukirjade väljaandmine***

Kuukirjad sisaldaksid dekaadide ja kuude viisi vaatlusjaamade põhiliste meteo-elementide keskmisi ja äärmusväärtusi koos nende esinemise aegadega. Materjal esitatakse lisaks koondtabelitele ka kaartide, graafikute ja skeemide kujul, samuti oleksid lisatud tekstilised ülevaated. Üldist huvi pakkuvad materjalid publitseeritaks ja neid kuukirju oleks võimalik tellida. Kitsamat huvi pakkuvad materjalid säilitataks arhiivis. Pikaajaliseks säilitamiseks ja edasiseks töötlemiseks oleks andmed kantud magnetlintidele automatiseeritud süsteemi spetsiaalsesse blokki. Kuukirjade koostamise sagedus oleks üks number kuus, võimalik ka harvemini.

• ***Meteoroloogiliste ülevaadete, artiklite, kaartide ja teatmike koostamine***

Planeeriti välja anda meteoroloogilised aastaraamatud, mis sisaldaksid kuukirjade alusel koostatavaid aasta kokkuvõtteid, samuti meteoroloogilisi teatmematerjale ehk kliimateatmikke. Kliimateatmike ülesandeks on esitada meteolementide pikaajalisi keskmisi väärtusi ehk kliimanorme ja nende statistilisi näitajaid, samuti kliimatrende, kliimatelementide jaotuste kaarte ja kliima rajoneeringu skeeme, selgitavat ja ülevaatlikku teksti jne. Kliimateatmikud võiksid sisaldada ka rakenduskliima andmeid (agro-, ehitus-, kuu-rortkliima jne). Kliimateatmike koostamise intervall peaks olema seotud majanduse planeerimise etappidega, näiteks iga 5 või 10 aasta järel. Need koostatakse aastaraamatute alusel. Tuleb märkida, et kahjuks on aastaks 2016 ilmasteenistuse poolt EMHI-s, praeguses Keskkonnaagentuuris välja antud vaid kolm kliimateatmikku: Eesti kiirguskliima teatmik (koostajad V. Russak ja A. Kallis, 2003); Eesti lumikatte teatmik (koostajad H. Tooming ja J. Kadaja, 2005) ja Eesti ilmariskid (koostaja T. Tammets, 2008; 2012).

• **Rahvusvaheline andmete edastamine Maailma- ja Euroopa meteoroloogia- ja kliimaorganisatsioonidele**

Eesti vaatlusandmete edastamine toimub vastavalt kokkuleppele Maailma Rahvusvahelisse Meteoroloogiaorganisatsiooni (WMO) asukohaga Ashville'is; Ülemaailmsesse Kliima Vaatlussüsteemi (GCOS) Ashville'is; Euroopa kliimaandmebaasi (ECA&D). Igakuiselt on Eesti vaatlusandmed lingitud ka Euroopa Meteoroloogia Organisatsiooni Kliimaprogrammi (EUMETNET ECSN) kodulehele. Oli vaja täita ka nõudmised tõendite, ekspertiisi jm alusel hinnangute andmiseks aasta või päeva meteoroloogilise režiimi kohta.



Joonis 1. WMO peasekretäri G.O.P. Obasi külaskäik EMHI teadusuuringute osakonda Sakus 1993.a.

Figure 1. WMO Secretary-General G. O. P. Obas visiting the Research Department of the Estonian Meteorological and Hydrological Institute (EMHI) in Saku in 1993.

3. Andmete edastamine jaamadest ja nende arvutitöötlus EC tüüpi suurarvutite abil

1992. aastal oli EMHI-s 23 meteoroloogiajaama ja 58 meteoroloogia- ja hüdroloogiaposti. Andmete edastamine jaamadest toimus sünoptiliste telegrammide, tekstifailidena salvestatud kliimakodeeringute ja vaatlusvihikute abil. Tol ajal olid elektroonilised sidekanalid veel tulevikumuusika. Kõik ilmavaatluse tulemused kanti vaatlusvihikutesse (seda tehakse kliimajaamades tänini). Keskusesse edastatavad tulemused kodeeriti, kuna see võimaldas saata andmed minimaalse mahuga ja võimalikult väheste vigadega.

1992. aastal sõlmiti leping tollaegse Eesti Maaviljeluse ja Maaparanduse Teadusliku Uurimise Instituudiga Sakus suurarvuti EC-1045 kasutamiseks ja personali kaasamiseks meteoroloogilisse andmetöötlusesse. Kahjuks tehti suurarvuti programmid oma aja ära elanud VELGOL-s ja neid ei saanud hiljem personaalarvutitele üle kanda. UNIX süsteemi ostmine aga käis instituudile üle jõu. Alguses loodeti ära kasutada Obninski Hüdro-meteoroloogiliste Andmete Maailmakeskuse kogemusi, seejuures plaaniti hankida ka

sealset tarkvara. Tabelite struktuur jäi analoogiliseks varasemate tabelitega, põhiline muudatus oli keele osas. 1992. aastaks planeeriti andmete sisestamise, süntaktilise kontrolli, esmase töötamise ja tabelite koostamise tarkvara loomine. Korraga tuli teha nii möödunud aja (1991–1992) kui laekuvate andmete töötlust. Kontrolli ja korrigeerimise tarkvara planeeriti juurutada järgmiseks aastaks.

1993. aastaks oli projekti „Eesti Vabariigi meteoroloogiliste andmete kogumise, töötlemise, säilitamise, rakendamise ja klimatoloogilise üldistamise süsteemi alused“ raames valminud meteojaamadest saabuva alginfo kogumise, töötlemise ja säilitamise automatiseeritud süsteem arvutil EC-1045 ja koostatud katselised meteoandmete tabelid (MT-1). 1994. a planeeriti selle süsteemi täiustamine ja juurutamine, kuid 1994 maikuu arvutuskeskus likvideeriti ja arvuti demonteeriti. Ees seisis ülesanne: väljatöötatud arvuti-programmid kanda demonteeritava arvuti mälust magnetlintidele; kasutusel olev automatiseeritud meteoroloogiliste andmete töötlemise süsteem üle kanda mõnda teise analoogilise operatsioonisüsteemiga arvutisse. Alguses prooviti koostööd Tallinna Tehnikaülikooli arvutuskeskusega, kus katsetati väljatöötatud süsteemi üleviimist IBM tüüpi virtuaalarvutisse. Töö käigus tekkis rida raskusi operatsioonisüsteemi puudumise tõttu. See süsteem leiti Eesti Vabariigi Politseiameti Arvutuskeskusest, kus veel töötas EC-1036 arvuti. Samas plaanis ka Politseiamet arvuti kui vananenu demonteerida, seda juba 1995. aastal. Tuli hakata süsteemi ümber töötama uuemat tüüpi arvutite jaoks. Töö aga peatus programmist Ain Korjuse surma tõttu. Tehtud andmeparandused jäid algandmetesse tagasi kandmata ning digitaliseeritud tulemuste ja algandmete hilisem kasutamine oli rohkem kui keeruline. Meteojaamade andmetöötlus kestis Politseiameti suurel arvutil siiski 1996. a lõpuni. Meteoroloogia- ja hüdroloogiapostide (hilisema nimetusega sademetejaamade) andmetöötluseni suurteil arvutitel aga ei jõutudki.

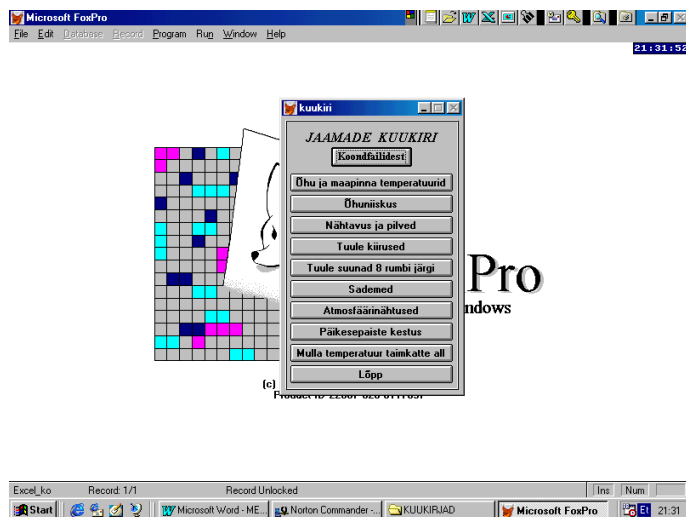
4. Personaalarvutite kasutuselevõtt. ILMAHALDURI andmetöötlussüsteemi väljatöötamine

EMHI rajamise alguses 1991. aasta lõpus oli rakendusklimatoloogia sektoris kasutada vaid aegunud Ida-Saksa personaalarvuti Robotron, millele 1994. aastal lisandus kolm personaalarvutit (2 arvutikomplekti 486DX2/66MHz 440 HDD, 4 MB RAM, VGA monitor ja 1 komplekt 486DX2/66MHz, 405MB HDD 8 MB RAM, VGA monitor; 2 printerit). Oli aga selge, et suure arvuti jaoks koostatud programme ei saa personaalarvutitel kasutada.

Alates 1994. aastast alustati sektoris originaalse meteoroloogilise andmetöötluse ja andmebaasi süsteemi väljatöötamist personaalarvutile. See sai ka oma nime – ILMAHALDUR. Programmide põhiversioon kirjutati FoxPro25 DOS-i variandis. Alustati postide andmetest (neid on nimetatud ka sademetejaamadeks, kuigi vaatluspostide mõõtmisprogrammi kuulub ka atmosfäärinähtuste fikseerimine, samuti õhutemperatuuri mõõtmine), sest need olid kogunenud alates aastast 1992 ainult käsikirjalise materjalina. See andis ka kogemuse tunduvalt keerulisema meteojaamade andmetöötluse süsteemi loomiseks. Kõikide postide ühe kuu meteoroloogiline informatsioon kodeeriti ühte tekstitüüpi faili. 1992. aastal töötas Eestis 58 meteoroloogia- ja hüdroloogiaposti. Nende vaatlusandmete kodeerimine ja sisestamine arvutisse võttis kogenud töötaja nädalatöö. Postiandmete andmetöötlussüsteemi väljatöötamine kestis 1996. aastani. Kirjutati ka juhendid nende kasutamiseks ja andmebaaside kirjeldused ning õpetati välja töötajad.

Analoogiline andmetöötlussüsteem loodi 1995–1997. aastal meteojaamade andmete haldamiseks. See süsteem oli aga tunduvalt mahukam ja keerulisem. Nii nagu postide, olid ka jaamade algandmed tekstifaili tüüpi, kujutades endast kodeeringuid, mis saadeti jaamadest kuu lõpus. Lõpuks tuli ka EC-1045 magnetketastelt ülekantud info alates 1991. aastast uuesti töödelda – kontrollida, parandada ja kanda andmebaasidesse. 1998. aastal andsime välja esimese – Tiirikoja jaama meteoandmete tabeli. Koos töökogemusega täiustasime töötuse tehnoloogilist skeemi. Iga järgmise aastaga kasvas ka klientideeninduse maht. MS Windows-i vahendite kasutamine algas põhiliselt seoses Pentium II tüüpi arvutite ilmumisega meie töölauale 1999–2000. aastal. Kokkuvõttes võib ILMAHALDURI andmetöötluse jaotada järgmiselt (joonis 3):

- Alkocodeeringute sisestamine, kontrollimine ja esmane vigade parandamine. Võimalik teha nii üksikute meteojaamade viisi kui ka ühe kuu kõikide jaamade andmetega korraga; postiaandmete puhul töödeldake ühe kuu andmeid korraga ühe algandmete faili alusel. Vigade väljatrükkimine ja parandamine alkocodeeringutes, tehtud paranduste dokumenteerimine. Selleks võrdleb spetsiaalne moodul algseid ja parandatud faile ja moodustab failierinevuste ülevaate, mis vastab tehtud parandustele. Erinevuste ülevaate väljatrükkid on ka tagasisideks vigade esinemise kohta.
- Andmete kandmine andmebaasifailidesse (79 posti ja 38 jaama). Kokkuvõtte- ehk tulemusfailide moodustamine ja mustandtabelite väljatrükk. Saadud tabelite kontroll toimus ilmavaatluste osakonnas vaatlusvihikute alusel. Leitud vead dokumenteeriti, parandati alkocodeeringud ja viidi läbi teistkordne andmetöötlus.
- Koondtabelite moodustamine kontrollitud ja parandatud andmetest, mis on viidud tulemusfailidesse. Koondtabelites olid esitatud erinevate jaamade andmed, samuti olulisemad kliimakarakteristikud iga meteoelemendi kohta. Selliste tabelite alusel viidi ilmavaatluste osakonnas läbi andmete kriitiline (ruumiline ja statistiline) kontroll. Tulevikus oleksid need tabelid aga olnud aluseks kuukirjade koostamisele. Tabelite koostamiseks töötati välja Exceli makrod. Kriitilise kontrolli järgi esitatud vead parandati alkocodeeringutes, vastava jaama andmetöötlus viidi uuesti läbi. Lõpuks printiti meteoroloogilised tabelid ja arhiveeriti lõplikud tulemusfailid. Postiaandmete kuutabelite moodustamiseks koostati hiljem ka Exceli makrod. Sademetejaamade (endiste postide) andmete töötlemine toimub tänini ILMAHALDURI ja nimetatud makrode alusel.
- Aastafailide koostamine – andmete mahu ja kättesaadavuse optimeerimiseks koostati iga aasta vaatlusandmete kohta nn aastafailid, mille alusel töötas ka kasutajaliides. Viimane võimaldas väikese tööjõu- ja ajakuluga valida kliendile vajalikke andmeid.



Joonis 2. Meteoroloogiajaamade kuukirja moodustamiseks loodud arvutimenüü MS FoxPro baasil.

Figure 2. MS FoxPro-based computer menu created for producing the monthly journal of meteorological stations.

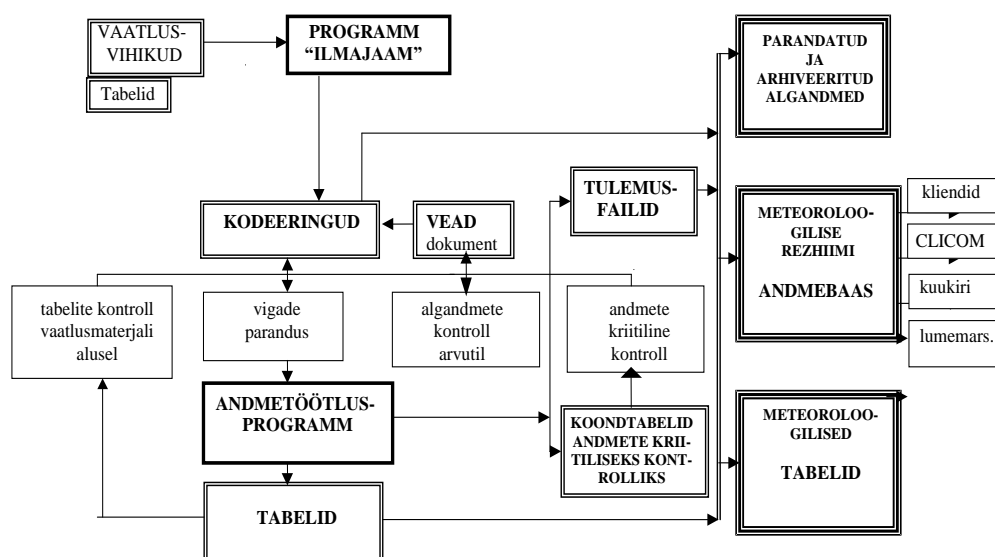
1998 aprillis esitas Jüri Rebane EMHile vaatlusandmete sisestamise ja kontrolli tarkvara paketi, mis oli mõeldud kasutamiseks meteojaamade personaalarvutites. Programm oli kirjutatud C-keeles ja mitmeid aastaid juba katselisel kasutamisel Tartu-Tõravere aktinomeetriaajas. Lisaks koostati tarbijasõbraliku eestikeelse kasutajamenüüga programmi abil sünoptilisi- ja ohutelegramme, tehti vaatlusandmete kontrolli ning saadi andmete sisestamisel ka olulist lisainfot. 1998.a mais toimunud andmetöötluse töögrupi koosolekul soovitati programm kasutusele võtta, alguses katselisel kolmes jaamas: Tiirikojal, Viljandis ja Jõgeval, hiljem ka kõigis teistes jaamades. Kui seniajani oli kasutatud sünoptiliste andmete edastamisel METNET tarkvara, siis nüüd tehti ülesandeks minna üle ühekordsele andmete sisestamisele ILMAJAAMA abil. Samas jäi alles ka andmete sisestamine vaatlusvihikusse, sest see tagas nende kontrollitavuse. ILMAJAAM on jätkuvalt kasutusel ilmteenistuse kliimajaamades automaatjaamade andmete lisamiseks ja kontrolliks manuaalsetele vaatlustele. Kahjuks postide andmete sisestamiseni ei jõutudki, sest 2001.a Jüri Rebane koondati.

Lõpptulemusena moodustus aastail 1991–2003 meteoroloogilise režiimi andmebaas, arhiveeriti digitaalsed algandmed ning tulemused; samuti väljastati igakuine meteoroloogiline informatsioon jaamade ning postide kuutabelite ning kuu koondite näol paberil ja edastati info rahvusvahelistele meteoroloogiaorganisatsioonidele ning paljudele andmekasutajaile (rahvusvahelised ja vabariiklikud uurimisprogrammid nagu BALTEX, Eurowater, Eesti Teadusfondi grantid, EMHI teised osakonnad jt). Aasta- ja kuu koondfailidesse korjatud meteoroloogilise režiimi andmete väljastamiseks oli lisatud mitmeid kasutajaliideseid (seireprogrammide valikandmete eraldamine, äärmusnäitajate jt andmete leidmine). Saadi ja jagati kogemusi mitmetel rahvusvahelistel üritustel (Tammets, 2003). Aja jooksul täienes ja muutus kaasaegsemaks nii kasutatavate arvutite, andmekandjate kui tarkvara süsteem (Windowsi vahendid, CD ROMid jm). Lume marsruut- ja jäite-härma-vaatluste andmete jaoks koostati spetsiaalsed tabelid, mille väljundvormid esitati MS

Accessis. Kõik tegevused jaamade või postide andmete töötlemisel oli viidud ühtsesse menüüsse, millele oli lisatud ka eelpool nimetatud Exceli makrod. Spetsiaalne programm moodustas ettenähtud struktuuriga ASCII faile, et viia andmeid üle 1995. aastal Eestis kasutusele võetud WMO kliimaandmebaasi CLICOM, kuhu kanti põhiliste kliimaelementide andmed alates 1991. aastast. 2002. aastal koostati metoodiline juhend „ILMAANDMETE HALDUR“ (seniajani käsikirjaline). Lõpuni jäi aktuaalseks kontrollprogrammide täiustamise teema. See sisaldas juba:

- *Süntaktilise kontrolli*: kõikide ettenähtud andmete olemasolu ja sisestavate arvude vastavuse kontrolli etteantud piirväärtustele. Sellega avastati juhuslikke vigu, mis võivad tekkida andmete kirjanekul ja kodeerimisel.
- *Semantilise kontrolli*: andmete jaamasisesel sisulise kontrolli, näiteks erinevate meteoroloogiliste omavahelise võrdluse.

Oli vaja täiustada süsteemi automaatse kriitilise (ruumilise ja statistilise) kontrolliga, võimalikult tarbijakesksete rakendusprogrammidega, arvestades ka meteoroloogiliste andmete ettevalmistamise vajadust kuukirjade ja aastaraamatu jaoks.



Joonis 3. Meteoroloogilise režiimi andmetöötlemise tehnoloogiline skeem.

Figure 3. Technological scheme of the meteorological data management.

Süsteemis säilitati meteoroloogilised andmed (nii parandatud algandmed kui andmebaasifailid) elektrooniliselt arhiivi- ehk kokkupakitud andmefailidena paralleelselt nii välismälukandjatel kui arvutis. Meteoroloogiliste andmete paberandjateks on jaamade puhul kuutabelid, mis koosnevad 10–17 A3 formaadis leheküljest, mis säilitatakse EMHF-s. Moodustatud elektrooniline arhiiv sisaldab:

- **Algandmed** iga kuu ja iga jaama kohta mahuga 36–71 kB; arhiivifail kõikide jaamade andmetega 330–430 kB, seejuures ühe aasta andmete maht kuni 4,8 MB (1995). Kõikide postide ühe kuu andmed ühes failis, mille maht on 20–100 kB; ühe aasta algandmed 640–950 kB, arhiivifailina kuni 210 kB.
- **Andmebaasifailide arv** jaamaandmete jaoks on 79 ja postide jaoks 38. Jaamade ühe kuu andmed moodustavad kuni 6 MB, arhiivifaili suurus on kuni 876 kB; postide andmed vastavalt 566 kB ja 120 kB.
- **Aastafailid** – ühe aasta kõigi meteojaamade ja postide andmed kokkupakitult arhiivifailides. Selliste failide maht on kuni 4,71 MB aasta kohta (1995), postidel 286 kB (1994).

ILMAHALDUR-i tarkvara valmis tihedas koostöös EMHI ilmavaatluste osakonnaga, et igakülgset arvestada meteojaamade ja -postide töö spetsiifikat. Nii oli oluline osa meteoroloogidel-spetsialistidel, eesotsas osakonna juhataja Elle Mettise, Milvi Sanderi, Niina Vavilova, Ene Tillmanni ja teistega. Ühtse tötlusskeemi, andmebaaside ja enamuse programme autoriks oli Koidula Vassiljeva. Tema kirjutas ka vastavad juhendid ja andmebaaside üksikasjalikud kirjeldused. Osa programme (algfailide võrdlus, kuu-koondite koostamine, kliimaandmebaasi CLICOM jaoks ettenähtud tekstifailide moodustamine) kirjutas Mae Reigo, kes tegi ära suure töö ka aastate 1991–1996 EC-arvutil töödeldud andmete ülekandmisel ja kodeeringute kontrollimisel. Projekti juht, töö koordineerija, algoritme koostaja, arendatud tötlusskeemi kaasautor ja programme



Joonis 4. Koidula Vassiljeva õpetamas noori kolleege Natalja Spirinat ja Kairi Vinti.

Figure 4. Koidula Vassiljeva teaching her young colleagues Natalja Spirina and Kairi Vint.

katsetaja oli Tiina Tammets. Aastate jooksul on töös osalenud paljud EMHI teadus- ja arenduskeskuse rakendusklimateoloogia sektori (alates 2001. aastast ilmavaatluste osakonna) töötajad: Agnes Krull, Olga Jakovleva, Tiina Sihver, Anu Sepp, Kairi Vint ja teised,

samuti Mereakadeemia tudengid-praktikandid. Süsteemi kasutati aastail 1991–2003 Eesti 23 meteojaama andmete jaoks, Pärnu jaama jaoks kuni 2004.a. Sademete- ja hüdro-meetria jaamade andmete töötlemiseks kasutatakse süsteemi siiani. Manuaalselt saadud andmed sisestatakse ja töödeldakse kõigepealt ILMAHALDURI süsteemis ja seejärel kantakse tulemused CLIDATA andmebaasi. Sealjuures koostatakse ja trükitakse välja ka meteoroloogiliste andmete kuutabelid.

Olukord muutus seoses jaamade automatiseerimisega. Esimesed Vaisala MILOS-520 tüüpi automaatjaamad paigaldati Eestis 2001. aasta lõpul kui instituudile osteti ja võeti kasutusele Oracle'i andmebaas CLIDATA. Selleks, et kõik ILMAHALDURI andmed uude andmebaasi üle viia, lisati ILMAHALDURile ka programm, mis moodustas jaamade ning postide andmetest ettenähtud struktuuriga tekstifailid.

5. WMO kliimaandmebaasi CLICOM juurutamine

Alates eelmise sajandi lõpust kuni 2003. aastani oli Eestis kasutusel WMO kliimaandmete haldussüsteem CLICOM, mis põhineb andmebaasile Data Ease. Sissejuhatuseks võeti 1995.a kevadel osa CLICOM-i arendusseminarist Bratislavas. CLICOM-iga seoses ja tänu lääne sponsorite abile saime koos süsteemiga Venemaa meteoroloogiakeskusest Obninskis kaasa põhilised Eesti kliima andmed. Lääneriigid sponseerisid Vene keskust digitaalsete andmete CLICOM-i sisestamiseks vajaliku tarkvara väljatöötamisel ja nende flopikestadele kandmisel. 1996.a aasta alguseks olid Eesti meteoroloogiaandmete arhiivid füüsiliselt Venemaalt ära toodud, kontrollitud, kopeeritud ja loodud ülevaade. Kahjuks ei andnud kaasasolnud programmid võimalust kõiki andmeid kätte saada, vaid ainult selle osa, mida sai otse CLICOMi importida. Ülejäänud osa jaoks oleks programmvarustus olnud vaja Venemaalt välja osta. CLICOMi andmebaasi administraatoriks määrati EMHI rakendusklimateoloogia sektori spetsialist Riina Pärj. Kõikide meteoroloogiliste vaatlusandmete haldussüsteemina CLICOMi kasutada ei saanud – osa andmeid oleks välja jäänud ning ka vaatlusi oleks vaja olnud kohandada uue süsteemiga. Viimane oleks tinginud ka pika üleminekuperioodi vaatluste korraldamisel. FoxPro baasil loodud süsteem meteoroloogilise režiimi andmete töötlemisel ja säilitamisel põhines seevastu täpselt kasutusel olevale vaatlussüsteemile.

6. Ülevaade Eesti Vabariigile Vene Föderatsiooni poolt üle antud Eesti meteoroloogia-jaamade digitaliseeritud arhiivimaterjalidest:

- Andmed kõige pikemate ridade puhul 18. sajandi lõpust kuni 1991. Aastani, mille kogumaht on 283 MB. Kaasas oli andmefailide struktuuri kirjeldus ning programmid, mis teisendavad teatud osa andmetest sellisteks, et neid oli võimalik sisestada CLICOMi andmeohjesüsteemi.
- Koosnes kaheksast osast, millest kolm sisaldasid ööpäeva, kolm tähtjalisi andmeid, üks nii tähtjalisi kui ööpäeva andmed ja üks kuuandmete kokkuvõtteid.
- Failid olid kantud 1,2 MB diskettidele, mida oli kokku 88.
- Kuni 1976. aastani olid failid organiseeritud jaamade viisi ja nende andmete puhul saab toetuda suhteliselt põhjalikule ülevaatele.

- Hilisemate aastate kohta oli igas failis esitatud ühe kuu andmed kõikide jaamade viisi, kusjuures üksikute kuude andmed puudusid täielikult, osades failides puudusid ka üksikute jaamade andmed.
- Enamus andmetest oli võimalik kätte saada failidest, mis moodustatakse kaasaantud programmidega, kuid osa andmetest vajasis kättesaamiseks spetsiaalseid programme, mis kahjuks puudusid.
- Postide ehk sademetejaamade andmeid üle ei antud.

Venemaalt saadud andmed tuli kontrollida, vajaduse korral parandada ning täiendada EMHF pabertabelite alusel. Samas sisestati ka uusi andmeid alates 1991. aastast, mis olid töödeldud ja arhiveeritud ILMAHALDURi süsteemis. Aastate jooksul võtsid tööst osa andmebaasi administraatori kõrval Lidia Kilk, Olga Noor, Kai Rosin jt.

Niisiis kasutati kuni 2003. aastani paralleelselt kahte andmebaasi: meteoroloogilise režiimi ehk ILMAHALDURi (FoxPro) andmebaasi ja WMO kliimaandmebaasi CLICOM. Need kaks andmebaasi erinesid oma ridade pikkuse poolest ja elementide hulgal – meteoroloogilise režiimi andmebaas sisaldas kõik meteojaamades ja -postides mõõdetud tulemusi, kuid need algasid alles aastaga 1991. CLICOMis oli meteolementide hulk piiratud, samas algasid vanimad andmerekad 19. sajandi lõpust.

7. Üleminek Oracle-i andmebaasisüsteemile CLIDATA. CLINO süsteem

Igal maal on oma meteoroloogiliste mõõtmiste spetsiifika ja traditsioonid, mida säilitatakse erinevate andmebaaside ja andmetöötlussüsteemide alusel. Selle sajandi algusest alates on Eesti meteojaamades mindud enamasti üle automaadmõõtmistele, mis tingis ka vajaduse kaasaegsema andmebaasi ja andmetöötlussüsteemi järele. Aastal 2002/2003 ostis Eesti riik Oracle'i andmebaasil põhineva ja Tšehhi Vabariigis arendatud andmetöötlussüsteemi CLIDATA. See võimaldab jooksvalt koguda nii automaatilmajaamadest saabuvaid andmeid kui manuaalselt mõõdetud ja sisestatud andmeid, mis saavad tähtajaliselt keskusesse sünoptiliste telegrammidega või on kuu lõpus kliimakodeeringute alusel töödeldud ILMAHALDURi süsteemis. Praeguseks ajaks on CLIDATAse üle viidud kõik varasemad andmed ILMAHALDURist, samuti CLICOMi andmebaasist, täiendatakse ja kontrollitakse CLIDATA andmebaasi aga ka mitmete teiste andmeridade alusel (andmed paberandjatel, ILMAHALDURis siiani töödeldavad sademetejaamade andmed jt). Perioodiliselt on laekunud ülevaated meteoroloogilise seire olukorrast Keskkonnaministeeriumi Info- ja Tehnokeskusesse (Tammets ja Krabbi, 2005). CLIDATA juures jätkab administraatorina tööd Riina Pärj, tema kõrval noored spetsialistid Veera Šisova, Epp Juust jt.

Lõpuks tuleb veel lisada mõni märkus CLINO tabelite kohta. CLINO on põhiliste kliimat iseloomustavate meteoroloogiliste elementide kuu- ning aasta keskmiste ja teiste statistiliste näitajate Exceli tabelite süsteem nii kõikide Eesti meteojaamade kohta eraldi kui ka Eesti kohta tervikuna. Selles on välja toodud ka 30-aastaste perioodide (1961–1990; 1971–2000; 1981–2010) kliimanormid kuude viisi. Aastaid tegeles selle süsteemi loomise, andmete kontrolli ja täiendamisega EMHI klimatoloog Niina Vavilova, alates 2008. aastast aga Natalja Spirina.

Kirjandus

Tammets T. 2003. Climate information and prediction service. Present state, problems and perspective. – Presentation in the RA VI CLIPS Workshop, Erfurt.

Tammets, T., Krabbi, M. 2005. Meteoroloogiline seire. – Kogumik Eesti keskkonnaseire 2004–2006. Keskkonnaministeeriumi Info- ja Tehnokeskus, 8–9.

About the history of Estonian digital meteorological databases and data processing

Tiina Tammets
Estonian Environment Agency

Summary

Digital meteorological data processing started in Estonia in 1992, when the Russian meteorological centre in Obninsk stopped this work. At first, the computer EC-1045 was used for this purpose. The original data processing system ILMAHALDUR for personal computers was developed using FoxPro25 DOS software. In the end of the 1990s, the system was ready to enter, check, process and save data obtained at the Estonian meteorological and precipitation stations. Different tasks of data processing, archiving and selecting were sampled into a unified menu bar. Checked data from 1991–2003 were saved in the meteorological database ILMAHALDUR. Estonian meteorological data before 1991, received from Obninsk, as well as an essential part of data from ILMAHALDUR have been entered into the WMO database CLICOM, which was used since 1995. CLICOM was the main climate database until the introduction of automated weather stations in Estonia. Then the new, Oracle database CLIDATA was bought and applied.

Kuidas Eesti sai EUMETSATi, ECMWF ja HIRLAMi liikmeks

Tõnu Viik

Tartu Observatoorium

Kuna ma olen kogu oma elu tegelenud kiirgusleviga, siis pole üldse imelik, et oma kursusekaaslase Enn Realo kaasabil asusin 1993. aastal tööle komisjoni, kes töötas välja Eesti kiirgusseadust. Seda komisjoni juhtis tollal keskkonnaministeeriumi õhu ja kiirguse osakonna juhataja Jaan Saar. Saime temaga headeks sõpradeks ja kui Jaan sai Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituudi (EMHI) peadirektoriks, tegi ta mulle ettepaneku võtta vastu tema nõuniku ametikoht. Jaan teadis, et ma olin NL sõjaõhujõududes teeninud pea kaks aastat Riias, Rumbula lennuvälja meteoteenistuses ja saanud selleks vastava väljaõppe. Jäin kohe nõusse. Minu peamiseks ülesandeks jäigi EMHI välissuhete korraldamine. Aga veel enne seda olid toimunud mõned olulised sündmused ja nendest me alustamegi.

Teatavasti oli Nõukogude Liidus väga võimas meteoroloogia- ja hüdroloogiaorganisatsioon, suupärase nimega Hüdromet. Ka Eestis oli see päris suur asutus, kus tööl oli ligi 800 inimest. Eesti oli ju impeeriumi läänepiiril, kustkaudu pahalased ilmingimata pidid läbi tulema, kui õitsvale impeeriumile kallale tahtsid tulla. Või siis seda kaudu oleks vaja olnud pahalasi karistama minna. Seega oli siin hädasti vaja teada ilmaolusid, mille teadmine on oluline strateegiline kaup.

Kuid Eesti taasiseseisvumise järel oli selge, et sellist hulka inimesi ilmasteenistuses Eesti üleval pidada ei jõua ja keskkonnaminister Toomas Frey kutsus Lohusalusse kokku pea kõik eesti meteoroloogiaga tegelevad inimesed ning seal arutati, mida ette võtta. Mäletan, et võeti vastu otsus luua Eesti Hüdrometi baasil Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituut. See instituut loodi 1. novembril 1991. Kuid tõsisemalt hakkas asi liikuma alles 2001. aastal, kui tolleaegne keskkonnaminister Heiki Kranich pani kokku rühma inimesi ja andis sellele rühmale nimeks “EMHI arenguprintsiipide hindamise komisjon”. See komisjon pidi arutama Eesti meteoroloogia tulevikku. Komisjoni esimeheks sai mu koolivend Andres Tarand, kes oli mõni aeg tagasi ise keskkonnaministeeriumit juhtinud. Komisjonis oli veel Rein Ratas ja Helve Kotli, poliitikute Kalev Lillo ning Jaan Saare ettepanekul ka mina (koolivend Tarandil polnud selle vastu midagi). Pidasime päris mitu koosolekut, kus asjatundjatena aeg-ajalt käisid aru andmas kaks elegantset daami – meteoroloogia osakonna juhataja Merike Merilain ja hüdroloogia osakonna juhataja Alvina Reihan.

Komisjon esitas 11. oktoobril 2001 ministrile ettekande, milles olid rõhutatult välja toodud EMHI põhiülesanded:

1. Meteoroloogiliste ja hüdrooloogiliste vaatlusandmete kogumine vaatlusvõrgu abil;
2. Meteoroloogilised ja hüdrooloogilised seisundihinnangud ning prognoosid;
3. Meteoroloogilise ja hüdrooloogilise režiimi analüüs ja üldistamine (sealhulgas kliimauuringud ning kliimamuutused), andmetöötlus, andmepankade loomine ja monitooring.

Seejuures pidas komisjon vajalikuks säilitada vaatlusvõrk tolleaegses mahus, võttes kursi mehitatud meteoroloogiajaamade asendamisele automaatjaamadega, mis praeguseks

on suures osas toimunud. Nenditi, et Eesti Vabariik lülitus 01.01.2000 rahvusvahelisse teabevahetussüsteemi Regional Meteorological Data Communication Network (RMDCN), mis tingis komisjoni ettepaneku, et EMHI infotehnoloogia tuleb põhjalikult ümber korraldada, komplekteerides selleks loodava infotehnoloogia osakonna IT-spetsialistide ja aparatuuriga. Eesti Vabariik oli sel ajal (alates 1992) juba Maaailma Meteoroloogia Organisatsiooni (WMO) liige, kus Eestit esindas EMHI, ja samuti Rahvusvahelise Tsiviilennunduse Organisatsiooni (ICAO) liige, kusjuures EMHI pidi tagama tsiviilennude lennumeteoroloogilise teenindamise. Komisjon pidas äärmiselt vajalikuks liitumist järgmiste rahvusvaheliste organisatsioonidega (vajalikkuse järjekorras):

1. Euroopa Keskpika Ilmaennustuse Keskus (ECMWF – *European Centre for Medium-Range Weather Forecast*) partnerriigi staatuses. See oli EMHile elutähtis, sest võimaldas töös kasutada Euroopa Keskuse numbriliste prognoosimudelite baasil koostatud ilmakaarte, samuti saada tasuta väljaõpet.
2. Liitumine Euroopa Meteoroloogiliste Satelliitide Organisatsiooniga (*EUMETSAT – European Meteorological Satellite Organisation*). Satelliidifotod on pilvemassiivide liikumisega seotud ilmapuutuste, sh erakordsete, kriisiolukordi tekitada võivate ilmastikunähtuste ennustamiseks hädavajalikud.
3. Liitumine Põhja-Euroopa ilmaradarite võrguga (NORDRAD), mis annab meile ligipääsu mitmete ohtlike ilmastikunähtuste (tugevad sademed, äike jms) levikufole laialdasel territooriumil. Eestis oli territooriumi nõuetekohaseks katmiseks tarvis paigaldada teine radar Tartusse.
4. Liitumine HIRLAMi nõukoguga (HIRLAM – Kõrglahutusega Piiratud Ala Modelleerimine numbrilise ilmaennustuse jaoks (*High Resolution Local Area Modelling for numerical weather prediction*)). See võimaldas Eestis käivitada oma numbrilise prognoosi ja muuta sellega Eesti ilmteenistuse naaberriikidest vähem sõltuvaks (Eestis olid vastavad spetsialistid olemas).

Komisjon tegi ettepaneku valitsusele investeerida lähiaastatel EMHI arengusse ca 97 miljonit krooni, selle sees oli EMHile oma maja ehitamine, ilmaradar Tartusse, automaatjaamade soetamine, palgafondi kasv jms. Komisjon nentis, et EMHI ümberstruktureerimine juba toimub ja töötajate arv on viimase 10 aastaga vähenenud 40%. Keskkonnaministrile tehti ettepanek võtta menetlusse ilmaseadus ja forsseerida EMHI põhimääruse kinnitamist.

Tagasi vaadates võime praegu öelda, et suurem osa komisjoni ettepanekutest on realiseeritud. Tõsi, radar sai Viljandimaale Sürgaveresse, sest seal oli pool torni juba vana tuuleveski näol olemas. Mis aga puutub rahvusvaheliste organisatsioonidega ühinemist, siis tegelikult oli töö HIRLAMiga ühinemiseks alanud juba palju varem, sest Tartu Ülikooli professor Rein Rõõm oli loonud suhted HIRLAMi kogukonnaga, kuna ta oli HIRLAMi täiustamiseks välja töötanud rõhuvälja mitte-hüdrostaatilise käsitluse. Väga tihedad sidemed olid tal Soome Meteoroloogia Instituudi töötajatega, eriti aga Mikko Alestaloga, kelle kaudu saime olulist infot ühinemise tehnilise korraldamise alalt ja ka lausa materiaalset abi.

Kuid ikkagi jõuti selle organisatsiooniga ametliku ühinemiseni alles 2006. aastal Readingis, kus asub ka ECMWFi peakorter. Tegelikult oligi enne HIRLAMi kogukonnaga ühinemist vaja olla juba ECMWFi liige või pidi ühinemisprotsess olema alanud.

2006. aastal olin Eesti esindajana Readingis kohal ja kui päevakorras tuli ette küsimus Eesti ühinemise kohta, siis lubasin, et oleme hästi tublid ning kuna Rein Rõõmu

töörühma edukas tegevus oli HIRLAMI nõukogule hästi teada, siis tollane esimees, Hollandi kuningliku meteoroloogainstituudi direktor Fritz Brouwer teatas pärast lühikest arutelu, et Eesti on vastu võetud. Muide, samal koosolekul Lätit vastu ei võetud, kuna neil polnud siis veel ühtki HIRLAMi asjatundjat. Ust siiski Läti ees päris kinni ei pandud, sest Eestile ja Norrale tehti ülesandeks lätlased järele aidata (detsembris 2015 kontrollisin – Läti pole siiani HIRLAMi kogukonna liige).

Siiski oli meie rõõm enneaegne, sest suures ühinemistuhinas oli leping Readingis jäänud alla kirjutamata. See polnud ka mingi ime, sest nõukogu liikmed olid ennekõike aktiivsed teadlased ja alles siis bürokraadid. Tegelikult polnudki mul õigust lepingut alla kirjutada, sest see õigus oli vaid peadirektoril või tema poolt volitatud isikul. Ja kui 2007.a kevadel laekus EMHile arve liikmemaksu tasumiseks, siis küsis EMHI direktor Rein Kärner õigusega, et millise paberi alusel ta seda tegema peab. Tegime siis lepingu paberil valmis ja EMHI peadirektor Jaan Saar oleks pidanud olema see mees, kes Iirimaal Corki linnas – just seal toimus 2007.a HIRLAMi nõukogu istung – oleks selle lepingu alla kirjutanud trummihelide saatel. Aga Saar oli puhkusel. Siis küsisime HIRLAMi sekretäri Jeanette Onvlee käest, et mida sellises olukorras ette võtta. Jeanette arvas, et selleks on kaks võimalust – kas Eesti esindaja sellel koosolekul viib Fritz Brouweri poolt Iirimaal allakirjutatud lepingu Tallinna ja seal kirjutab Jaan Saar alla (kui tööle on tulnud) või annab peadirektor näiteks Rein Kärnerile volikirja see leping alla kirjutada ja siis saab see volikiri lepingu ametlikuks osaks. Nii me siis Rein Kärneriga moodustasime Eesti delegatsiooni, sõitsime Iirimaale ja leping sai lõplikult kinnitatud.

Sellega sai Eesti õiguse HIRLAMi abil tehtud ilmaprognoose seaduslikult kasutada. Siinkohal on oluline märkida, et HIRLAMiga hakkas EMHIs väga aktiivselt tegelema Rein Rõõmu õpilane Arne Männik.

Vahepeal oli toimunud ka teine oluline sündmus, nimelt saabus 2005. aastal Tallinna ECMWFi peadirektor Dominique Marbouty ja kirjutab koos keskkonnaminister Villu Reiljaniga alla lepingule, et Eesti saab ECMWFi koostööpartneri liikmeks ja sellega koos ühtlasi õiguse nende prognoose kasutada. Sellele sündmusele olid eelnenud pikad läbirääkimised ECMWFigaga ja Eesti valitsusega, eriti aga välisministeeriumi ja riigikoguga, et kellel on üleüldse õigus sellisele lepingule alla kirjutada.

Need läbirääkimised venisid ja venisid ning Readingi poolt jõudsid meieni kannatamatud küsimused tulemuste kohta. Käisin nõu küsimas riigikogu keskkonnakomisjoni töötaja, nüüdseks meie hulgast lahkunud Endel Koljati käest, kellel olid niisuguste toimingu kohta rikkalikud kogemused ja kes oli meid aidanud kiirgusseaduse koostamisel erakordselt vahedate ja täpsete formuleeringute sõnastamisel. Asi hakkaski liikuma ja lõpuks anti allakirjutamise õigus keskkonnaministrile.

Samamoodi kaua venis ka ühinemine EUMETSATiga. Selle protsessi käigus olin käinud juba 2002. aastal Darmstadtis EUMETSATi peakorteris, kus spetsiaalselt Ida-Euroopa maadele korraldati EUMETSATi võimalusi tutvustav seminar ja ühtlasi ka satelliidiandmete vastuvõtijaamade reklaamimine. Seminari käigus sain ma heaks tuttavaks paljude EUMETSATi inimestega, nende hulgas ka Jose Prietoga, kes pakkus välja võimaluse korraldada Tallinnas rahvusvaheline seminar EUMETSATi satelliidiandmete kasutamiseks ja oma vastuvõtijaama ülespanemiseks. See toimuski ja oli nii edukas, et me korraldasime paari aasta pärast veel teisegi sellise seminari. Ka 2003.a osalesin ma EUMETSATi satelliitmeteoroloogia seminaril, seekord Zagrebis, kus tollane EUMETSATi peadirektor Tillmann Mohr mulle lõunasöögi järel korraliku ülekuulamise korraldas. Ikka

selles võttes, et millal Eesti EUMETSATiga ühineb. Me jõudsime järeldusele, et protsessi kiirendamiseks oleks kasulik, kui peadirektor ise selle ürituse tähtsuse rõhutamiseks Baltimaid külastaks. Nii sündiski, kuid külastajaks oli juba uus peadirektor.

Siinkohal on veider seda öelda, kuid Eestit aitas EUMETSATiga ühineda 2005. aasta jaanuaritorm. Sest alles siis jõudis valitsejatele pärale, et ilm on elektoraadi silmis väga tähtis asi ja EMHile avanesid rahakraanid, hoolimata sellest, et mõne omavalitsuse juhid informeerisid Eesti rahvast selles, et EMHI nagu polekski mingit suurvett ette ennustanud, sellega EMHI sünoptikuid hirmsasti solvates. Kuid minister Reiljan ei lasknud ennast eneseõigustajatel segada ning langetas otsuse, et Eesti ühinegu EUMETSATiga. Asi oli selge juba suvel, jäid veel mitmesugused juriidilised küsimused nagu taas see, et kes selle ühinemislepingu peaks heaks kiitma, kas valitsus või riigikogu. Teades riigikogu kilpkonnalikku tegutsemiskiirust (kui probleem nende isiklikku rahakotti ei puuduta), oleks riigikogu variant ühinemist vähemalt aasta võrra edasi lükanud. Õnneks selgus, et aitas valitsusest, nagu oli olnud ka ECMWFIGa ühinemise puhul. Septembris käis Tallinnas Eesti olukorraga tutvumas EUMETSATi peadirektor – endine Taani meteoroloogia instituudi direktor Lars Prahm koos Piero Valabregaga rahvusvaheliste suhete osakonnast ja Karen Ernstiga juriidilisest osakonnast.



Joonis 1. Leping EUMETSATiga on alla kirjutatud. Satelliidi mudeliga EV keskkonnaminister Rein Randver, pilti hoiab käes EUMETSATi peadirektor Lars Prahm (detsember 2005).

Figure 1. The agreement with the EUMETSAT was signed. The Minister of Environment of the Estonian Republic Rein Randver is holding the model of a satellite, the Director General of the EUMETSAT is holding the picture (December 2005).

Nii andiski valitsus Reiljanile loa tegutsemiseks. Siis aga tuli päevavalgele maadevahetusega äritsemine ning Reiljan oli sunnitud tagasi astuma. Uueks ministriks sai rahvaliitlane Rein Randver, kes oli olnud Valgamaa maavanem. Vahepeal plaanis Lars Prahm lepingu allakirjutamist Tallinnas, kuid tema tiheda tööplaani tõttu ei osutunud see võimalikuks. Lepiti kokku, et minister Randver, kes 18. detsembril 2005.a oli Brüsselis teeb tagasisõidul Tallinna põike Darmstadi, kus pidulik allakirjutamine ette võetakse. EMHI peadirektor Jaan Saar otsustas, et võtab mind sellele kohtumisele Darmstadi kaasa, kus ma pidin ministrile kiires korras tänukõne valmis kirjutama.

Sattusin seega uuesti Darmstadi, neli aastat pärast eelmist käiku. Lepingu allakirjutamise protseduur oli pidulik, kohal oli EUMETSATi peadirektor isiklikult, lisaks palju neid, kellega ma juba mitmel korral olin kohtunud (joonis 1).



Joonis 2. Michel Jarraud külastab Eestit. Paremt: presidendi nõunik Jüri Kann, EMHI peadirektor Jaan Saar, EV president Arnold Rüütel, WMO peasekretär Michel Jarraud ja autor (november 2005).

Figure 2. Michel Jarraud visiting Estonia. From the right: Adviser to the President Jüri Kann, the Director General of the EMHI Jaan Saar, the President of the Estonian Republic Arnold Rüütel, the WMO Secretary-General Michel Jarraud and the author of the present text (November 2005).

Erinevalt ECMWFist, kus Eesti on jäänudki koopereerunud liikme staatusesse, on EUMETSATiga 2013.a sõlmitud lepingu alusel Eesti selle organisatsiooni täisliige. Üksiti on mul tõsist alust arvata, et see ühinemisprotsess toimus suhteliselt kiiresti tänu keskkonnaministeeriumi juhtkonna, eriti aga minister Villu Reiljani ja kantsler Annika Uudelepa tõsisele abile.

Lõpetuseks tuleks öelda paar sõna ÜRO juures asuva agentuuriõigustega Maailma Meteoroloogiaorganisatsioonist WMO, mis loodi 1950. aastal, millega Eesti ühines 1992. a ja kus Eestit esindab praegu Eesti Keskkonnaagentuur. Selle suure organisatsiooni peasekretäriks on kolmandat perioodi Michel Jarraud, kes külastas Eestit novembris 2005. a. Teda võtsid vastu Eesti Vabariigi president Arnold Rüütel ja Tartu Ülikooli rektor Jaak Aaviksoo. Jarraud esines ka Metobsi 140. aastapäeva tähistamise konverentsil Tartus (joonis 2).

On päris selge, et Eesti ühinemine nende suurte organisatsioonidega on oluliselt parandanud meie ilmaennustuste kvaliteeti. Sama selge on ka, et sageli eelistatakse Eesti ennustustele Poola, Venemaa ja Norra omasid. Niisuguste eelistuste kohta olgu päris lõpetuseks kirja pandud üks lookene.

Kui ma veel Jaan Saare nõunik olin, siis saatis ta mind Helsingisse tutvuma Soome Meteoroloogia Instituudi kolleegide tööga. Soomlased eesotsas Mikko Alestaloga võtsid asja väga tõsiselt ja tegid mulle kapitaalse ülevaate oma asutusest koos ekskursiooniga. Mul ei jäänud muud võimalust kui vastata neile sellega, et pidasin ettekande EMHI tegevusest, mille käigus ütlesin, et mul on praegu suurepärane võimalus oma kalurist isa nimel tänada neid täpsete ilmaennustuste eest, mida mu isa kõrgelt hindas ja neid Eesti omadele eelistas. Sellele lausele järgnes kuulajate homeeriline naer ja nad seletasid mulle, et Soome kalurid kuulavad Rootsi ilmaennustusi!

Tänusõnad

Tänan Rein Rõõmu ja Rein Kärnerit, kes aitasid mul mõningaid fakte meelde tuletada.

How Estonia joined ECMWF, EUMETSAT and HIRLAM

Tõnu Viik
Tartu Observatory

Summary

After regaining its independence Estonia had to restructure its weather service. The government set up a special committee to pinpoint the necessary goals to be achieved. In this list the most imperative was to join the international organisations ECMWF, EUMETSAT and HIRLAM. Here the process of joining is described from the viewpoint of the author. Since the Estonian Republic was in making, this process was sometimes very time-consuming and thorny but our colleagues in neighbouring countries – especially in Finland – were very helpful. Our cooperation with them in the HIRLAM project was a good asset in entering the world-wide meteorological community.

Eestlaste osalusest meteoroloogilistel uuringutel Antarktikas ning kliimamuutustest lõunapolaarpiirkonnas

Enn Kaup ja Jüri Ivask

Tallinna Tehnikaülikooli Geoloogia Instituut

1. Eesti meteoroloogid Antarktikas

Eesti NSV Teaduste Akadeemia Füüsika ja Astronoomia Instituudi (FAI) 20 aastat kestnud vaatlusprogramm Antarktikas algas 8. detsembril 1965 (Kreem, 2005). Selle otseks eesmärgiks olid kõrgatmosfääri helkivate ööpilvede patrullvaatlused, kuid tegelikus hõlmasid kaugelt suurema osa kümne tegutsenud vaatleja (tabel 1) tööst meteoroloogilised, aktinomeetrilised ja osoonivaatlused.

Helkivad ööpilved kujutavad endast pilvesarnaseid moodustisi, olles samal ajal palju heledamate polaarreesofääri pilvede hõredavõitu ja „rebitud” ilmega äärenähtus. Need atmosfääri kõrgeimad pilved asuvad 76–85 km kõrgusel ja koosnevad kuni 100 nm läbimõõduga jääkristallidest, mis võivad formeeruda ka tolmuosakestel. Helkivad ööpilved on nähtavad vaid videvikus, kui Päike asub eelistatavalt 6–16 kraadi allpool horisonti ja on enamasti vaadeldavad suvekuudel laiuskraadide 50 ja 70 vahel nii põhja- kui lõunapoolkeral. Kuigi helkivaid ööpilvi vaatlus esimesena 1851. a. J. H. von Mädler Tartu Tähetornis ning sellest ajast on neid vahelduva innuga uuritud tänapäevani, pole nende olemus siiski lõplikult selge. Oluliseks verstapostiks uuringutel sai esimese Maa tehiskaaslase orbiidile jõudmine 4. oktoobril 1957. Lähikosmoses ja kõrgatmosfääris toimivate protsesside uurimine muutus seeläbi eriti aktuaalseks, millega seoses on võimalik saada olulist teavet ka helkivate ööpilvede kohta. Kujunes nii, et jällegi said oluliseks Eestis tehtavad uuringud.

Charles Villmann, kes oli varem Tallinnas asutanud amatöörastronoomide ringi ja korranud vaatluskoha Estonia pst 15 maja katusel, organiseeris vaatlusvõrgu Eestis. Vaatluspiirkonna laiendamise vajadus saatis Enn Kreemi suvel 1962 Eesti kalalaevas-tikuga vaatlustele Newfoundlandi ja Lõuna-Gröönimaa piirkonda. Vahepeal oli Villmanni eestvedamisel lõppenud uue tähetorni ehitamine Glehni pargis Tallinnas ning Villmann ise kutsutud FAI teadusdirektoriks, korraldamaks Tõraveres observatooriumi rajamist. Sealtpeale kujunes Tõraveres ka helkivate ööpilvede uurimise ülemaailmne keskus. Villmanni kaugem eesmärk oli laiendada vaatlused lõunapoolkerale ja kosmosesse. Karismaatilise isikuna jõudis ta aastal 1963 Moskvas kosmoselaevade peakonstruktori Sergei Koroljovi jutule ning saavutas mõlemad eesmärgid. Helkivate ööpilvede esinemistingimuste ja leviku uurimisel oli ka sõjaline tähtsus, ent sellest ei räägitud avalikult ega teadnud seda ka enamik vaatlejaid. Lõunapoolkera vaatlused hakkasid toimuma koostöös Arktika ja Antarktika Instituudiga, mis asus tollases Leningradis (Kreem, 2005).

Tabel 1. Eesti päritolu meteoroloogid ja aeroloogid Nõukogude Antarktika ekspeditsioonides 1965–1992 ning Soome Antarktika ekspeditsioonides 2010–2015.

Table 1. Meteorologists and aerologists of Estonian origin in Soviet Antarctic Expeditions 1965–1992 and in Finnish Antarctic Expeditions 2010–2015.

Isik	Aastad	Polaarjaam, -ala	Amet
Enn Kreem	1965–67	Mirnõi, Molodjožnaja	Meteoroloog
	1968–70	Bellingshausen	
Reino Eller	1966–68	Molodjožnaja	Meteoroloog
Rein Randmets	1967–69	Molodjožnaja	Meteoroloog
	1971–72	Molodjožnaja	
	1974–76	Vostok	
Andres Tarand	1968–70	Molodjožnaja	Meteoroloog
Jaan Ojaste	1969–71	Bellingshausen	Meteoroloog
Jaak Lembra	1971–72	Molodjožnaja	Meteoroloog
Enn Kaup	1972–73	Molodjožnaja	Meteoroloog
Vello Park	1972–74	Molodjožnaja	Meteoroloog
	1975–77	Mirnõi	
	1977–79	Mirnõi, Vostok	
	1981–83	Vostok	
Eino Martihhin	1975–76	Molodjožnaja	Meteoroloog
Vladimir Gussev	1981–83	Leningradskaja	Meteoroloog
	1984–86	Vostok	
	1990–92	Molodjožnaja	
Rein Männik	1981–83	Mirnõi	Aeroloog
	1987–88	Molodjožnaja	
Aleksei Dorogotvtsev	1988–89	Molodjožnaja	Aeroloog
Sulo Kolje	1988–90	Molodjožnaja	Aeroloog
Priit Tisler	2010–11	Aboa	Meteoroloog
	2013	Weddelli meri, <i>Polarstern</i>	
	2014–15	Aboa	
Timo Palo	2010–11	Aboa	Meteoroloog

Koostöö tähendas, et Villmanni värvatud helkivate ööpilvede vaatlejad läbisid Eestis ja Leningradis vastavad kursused ja praktika ning vormistati teadustöötajate või inseneridena tööle Nõukogude Antarktika Ekspeditsiooni teadusjaamades, kus nende peamiseks tööks oli regulaarsete meteoroloogiliste, aktinomeetriliste ja osoonivaatluste läbiviimine. Helkivate ööpilvede patrullvaatlused toimusid Tõraveres koostatud programmi alusel selleks astronoomiliselt sobivatel aegadel. Kui ööpilvede vaatlusi segasid sagedased lumetuisud ning madal pilvisus, siis mainitud regulaarsete vaatluste programm oli ajaliselt tihe. Vaatlused toimusid iga 3 või 6 tunni tagant, lisaks tuli tegelda andmete esmase töötlemise, kontrolli, sünoptiliste telegrammide koostamise, kuukokkuvõtete arvutamise ja edastamisega, ka mõõteriistade remondi ja kalibreerimisega ning suveperioodil ka sagedaste lennuilma vaatlustega. Mujal tollases N. Liidus oleks samaväärse meteojaama personal koosnenud kümnekonnast inimesest, siin aga töötas üks või kaks vaatlejat, olenevalt sellest, kas vaatlusi tehti iga 3 või 6 tunni tagant. Lisaks rakendati vaatlejaid kõõgitoimkonnas ja ülejaamalistes avraalides (erakorralistes töödes). Need oli tavaliselt füüsilised tööd nagu osalemine laevade lossimisel ja moonakastide vedamisel, jää raiumisel ja sulatamisel, lume rookimisel jne. Regulaarselt tuli „laenutada” oma keha mitmesugusteks meditsiinilisteks uuringuteks, mida kogu jaamapersonali kallal toimetasid polaar- ja kosmosemeditsiini huvides töötavad arstiteadlased.

1980ndatel aastatel tegelesid Antarktika ülemiste õhukihtide meteovaatlustega Mirnõi ja Molodjožnaja jaamades ka kolm eesti päritolu aeroloogi (tabel 1). Nende ülesandeks oli kaks korda ööpäevas, kl 00 ja 12 UT kindlustada raadiosondi saatmine võimalikult kõrgele (kuni 30 km), seda ka kõige rängemates lumetormides, saadeta meteoroloogilise informatsiooni vastuvõtmine, töötlemine ja edastamine rahvusvahelisse andmevõrku. Jaama aeroloogiameeskonnas oli tavaliselt 3–4 meest.

Pikemat aega Soome meteoroloogia instituudis töötanud ja seal PhD kraadi kaitsnud Priit Tisler on praeguse aastakümne alguses kahel suvepoolaastal teinud maalähedase õhukihi (1,5–2 km) uuringuid Soome Antarktika jaamas Aboa ning ühel uurimisreisil polaaröö kestel Weddelli merel Saksa ekspeditsioonilaeval Polarstern. Samadel uuringutel töötas Aboas ka Timo Palo Tartu Ülikoolist (tabel 1).

Sel moel on Eesti päritolu meteoroloogid-aeroloogid aastakümnetega andnud olulise panuse Antarktika uuringutesse. Antarktika lepingule vastavalt on tulemused saadaval üldiseks kasutamiseks vene (http://www.aari.aq/default_en.html) ja rahvusvahelistes andmebaasides (<https://legacy.bas.ac.uk/met/READER/data.html>) ning teatmikes (Долгин и др., 1976; Долгин и Петров, 1977; Колосова и Петров, 1981). Avaldatud on rida publikatsioone helkivate ööpilvede, meteoroloogiliste ja aktinomeetriliste vaatluste tulemustest (Белов и Крээм, 1967, 1968; Виллманн, 1966; Долгин и др., 1975; Крээм, 1968; Кауп, 1976; Kouznetsov jt., 2013; Jonassen jt., 2015).

2. Kliimamuutused lõunapolaarpiirkonnas

Süsteematiliste meteovaatluste alguseks Antarktikas võib lugeda Adrien de Gerlache'i ekspeditsioonilaevalt Belgica tehtud vaatlusi. 28. veebruarist 1898 kuni 14. märtsini 1899, kui laev oli jäätriivis Bellingshauseni mere lõunaosas. Sel ajal ja ka enne triivi algust tehti muude uuringute kõrval meteovaatlusi veel Gerlache'i väinas ja Aleksander I saare lähedal. Need olid esimesed pidevad, 15 kuu kestel tehtud vaatlused Antarktikas, suures osas lõuna pool 70. lõunalaiust, mis andsid väga olulisi andmeid talvetingimustest lõunapolaarpiirkonnas.

Järgmisel viiel aastal toimunud Antarktika ekspeditsioonide ajal tehti samuti 1–2 aastat kestnud meteovaatlusi eri piirkondades. Carsten Borchgrevinki meeskond talvitus Adare'i neemel 1899–1900, Robert Scotti ekspeditsioon talvitus Rossi saarel 1901–04 ja tegi lisaks neli retke mandri sisealadele. Järgnesid Erich von Drygalski jäätriiv aastal 1902 laeval Gauss Davise merel, Otto Nordenskjöldi ekspeditsioon Antarktika poolsaare ida- ja lääneosa saarte piirkonnas 1901–04, William Bruce'i ekspeditsioon 1902–04 laeval Scotia Weddelli mere idaosas ja Lõuna-Orkney saarestikus. Saarestiku idaosas Laurie saarel (60o45' l.l., 44o43' l.p.) algatas Bruce aastal 1903 meteovaatlused, mis on Argentina hoole all kestnud tänapäevani. See Orcadase jaama vaatlusrida on vanim Antarktikas; vanuselt järgmise Hope Bay – Esperanza (Briti-Argentina) jaama pidev rida Antarktika poolsaare põhjatipus sai alguse aastal 1945.

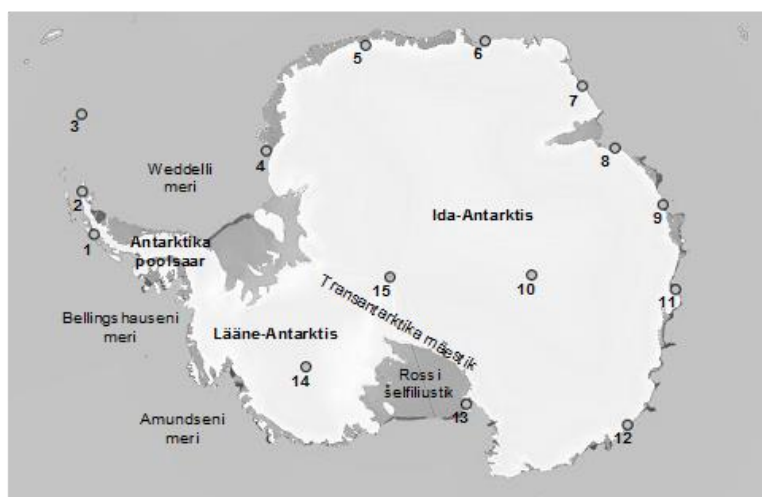
20. sajandil on hulk meteojaamu tegutsenud Antarktikas mitmeid, sageli kümneid aastaid. Kuid suurima väärtusega kliima muutuste väljaselgitamisel on pikad, enam-vähem pidevad andmereal. Tänapäeva ulatuv, tervet mandrit hõlmav, pidevalt töötavate meteojaamade võrgustik kujunes Antarktikas alles rahvusvahelise geofüüsika aasta (RGA) 1957–58 ajal, kuigi mõned jaamad töötasid ka mõni aasta varem (tabel 2).

Tabel 2. Temperatuuri aegrea rekonstruktsioonis kasutatud jaamad, number näitab asukohta joonisel 1.

Table 2. Stations used in temperature reconstructions, number shows location in Fig. 1.

Number	Jaama nimi	Lõunalaius	Idapikkus	Vaatluste algus
1	Faraday/Vernadski	65,2	-64,3	1950
2	Esperanza	63,4	-57,0	1945
3	Orcadas	60,7	-44,7	1903
4	Halley	75,6	-26,6	1957
5	Novolazarevskaja	70,8	11,8	1961
6	Syowa	69,0	39,6	1957
7	Mawson	67,6	62,9	1954
8	Davis	68,6	78,0	1957
9	Mirnõi	66,6	93,0	1956
10	Vostok	78,5	106,8	1958
11	Casey	66,3	110,5	1959
12	Dumont d'Urville	66,7	140,0	1956
13	Scott Base	77,9	166,8	1957
14	Byrd	80,0	119,5	1957
15	Amundsen-Scott	90,0	0,0	1957

Lühiajalisusele ja hõredale jaotusele vaatamata on nende jaamade vaatlusandmeid kasutatud Antarktika kliimamuutuste oluliste aspektide uurimiseks (Thompson ja Solomon, 2002; Richard jt., 2013). Nende uuringute peamised puudused on, et nad tuginevad peamiselt rannikujaamade andmetele, pöörates vähe tähelepanu Antarktise suurtele sisealadele ning käsitlemata jääb suuresti Lääne-Antarktis (tulenevalt pikaajaliste pidevate instrumentaalvaatluste nappusest regioonis, mida selles artiklis käsitletakse eraldi Antarktika poolsaarest). Paljutõotavaks alternatiiviks Antarktika viimaste aastakümnete kliima rekonstrueerimisel on peetud globaalseid atmosfääri järelanalüüse, milles kombineeritakse erinevate meteovaatluste andmeid ilmaennustuse mudelitest saadud tulemustega. Kuigi viimase aja järelanalüüsides on saavutatud olulist edasiminekut, on leitud trendid siiski osutunud väheusaldusväärseks suurtel lõunalaiustel (Marshall, 2002; Bromwich jt., 2011). Mõned rekonstruktsioonid on siiski olulisel määral osutanud Lääne-Antarktise soojenemisele alates RGA ajast (Steig jt., 2009). Samas on ilmnenud erinevused soojenemise suurus, mustris ja sesoonsuses raskendanud arusaamist nähtuse olemusest. Need vastukäivused tulenevad osaliselt Byrdi jaama temperatuurivaatluste erinevast kasutamisest (jaam 14, joonis 1). Selle jaama andmestik täidab tohutut andmelünka Rossi šelfiliustiku lääneosa, lõunapooluse ja Antarktika poolsaare vahel, ent on kahjuks mittetäielik.

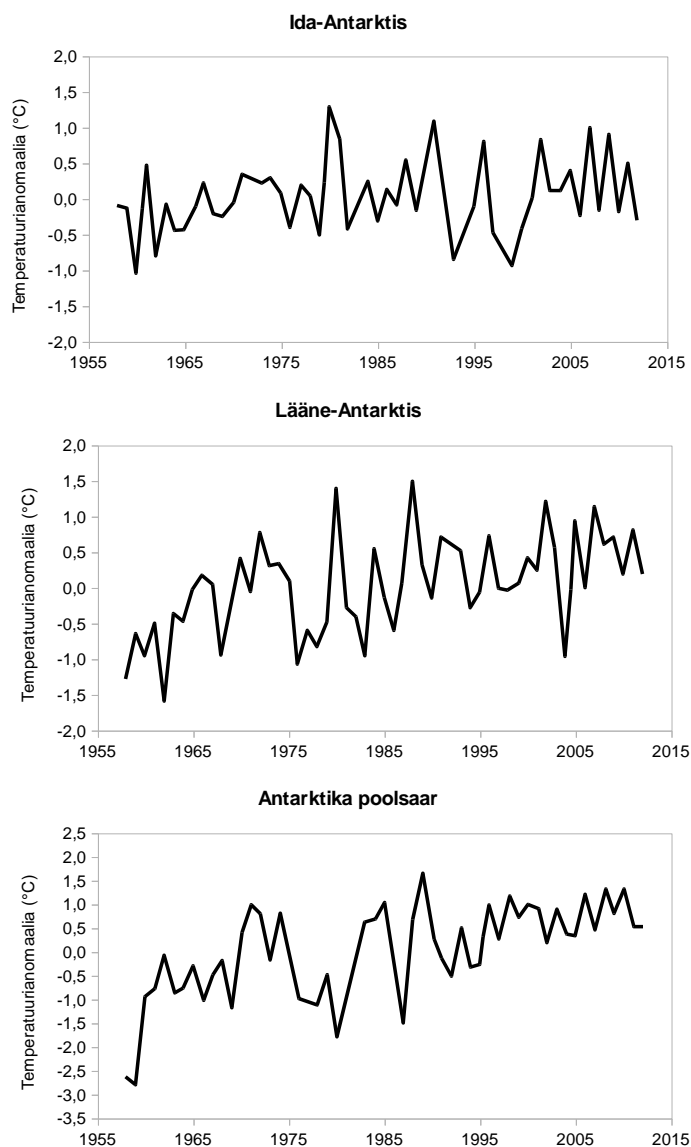


Joonis 1. Temperatuuri rekonstruktsioonis kasutatud meteojaamade asukohad. Jaamade nimed ja koordinaadid on antud tabelis 2. Märgitud on kolm peamist Antarktise regiooni: Ida-Antarktis, Lääne-Antarktis ja Antarktika poolsaar.

Figure 1. The locations of stations used in temperature reconstructions. The station names and coordinates are listed in table 2. Marked are three main Antarctic regions: East and West Antarctica and Antarctic peninsula.

Hiljuti saavutati olulist edu Byrdi jaama andmestiku lünkade täitmisel, kasutades selleks ka lähedalasuvate automaattmeteojaamade andmeid (Bromwich jt., 2013). Alljärgnevas antakse lühendatud ülevaade täiendatud andmete alusel rekonstrueeritud Antarktika õhutemperatuuri muutustest perioodil 1958–2012 Nicolas ja Bromwichi (2014) ilmunud

artikli alusel. Joonisel 2 on esitatud aasta keskmise temperatuuri anomaaliate aegread, mis on ruumiliselt keskmistatud üle kolme Antarktise regiooni. Nähtub, et nii temperatuuri muutuse ulatus kui ka muutlikkus kasvavad Ida-Antarktisest üle Lääne-Antarktise Antarktika poolsaareni.



Joonis 2. Ruumiliselt keskmistatud aasta keskmise temperatuuri anomaaliate aegread: Ida-Antarktis, Lääne-Antarktis, Antarktika poolsaar. Anomaaliad on arvatud perioodi 1960–2006 suhtes (Nicolas ja Bromwich, 2014 järgi, joonis 3).

Figure. 2. Annual mean temperature time series spatially averaged over East Antarctica, West Antarctica, and the Antarctic Peninsula. Anomalies are calculated with respect to 1960–2006. (Fig. 3 in Nicolas and Bromwich, 2014).

Tabelis 3 on esitatud temperatuuri muutuste aastakümnete trendid pisut pikema aja, aastate 1958–2012 kohta. Mis puutub aasta keskmist temperatuuri, siis on tulemused väga sarnased võrreldes perioodiga 1960–2006. Ida-Antarktise õhutemperatuuri positiivne trend $0,06 \pm 0,09$ °C aastakümne kohta jääb ka siin statistiliselt väheoluliseks. Nicolas ja Bromwich (2014) märgivad, et alates aastast 1958 oli kümneaastak 2002–11 kõige soojem Ida-Antarktilises, järgnedes märgatavalt külmemale 1990ndatele. Lääne-Antarktilises ja Antarktika poolsaarel ilmsesid oluliselt suuremad trendid, vastavalt $0,22 \pm 0,12$ ja $0,33 \pm 0,17$ °C kümnendi kohta, mis on ka kooskõlas vaatlusandmetega neist regioonidest, eriti poolsaarel ilmnevast kiirest soojenemisest (Turner jt. 2004).

Tabel 3. Rekonstrueeritud temperatuuri trendid (°C/kümnend) kogu Antarktikas ja mandri eri osades perioodil 1958–2012 aasta ja sessoonide viisi. Veapiirid vastavad 95% usaldusintervallile ($\pm 2\sigma$). Poolpaksus kirjas on toodud usaldusintervalli statistiliselt olulised trendid.

Table 3. Reconstructed temperature trends (°C/decade) in Antarctica and its different regions during 1958–2012, for all year and seasonally. The error bounds represent the 95% confidence interval. Boldface denotes trends statistically significant at this confidence level (Table 5 in Nicolas and Bromwich, 2014).

Sessoon	ANTARTIKA	Ida-Antarktis	Lääne-Antarktis	Antarktika poolsaar
Aasta	0,11±0,08	0,06±0,09	0,22±0,12	0,33±0,17
DJV	0,07±0,15	0,05±0,16	0,12±0,17	0,17±0,13
MAM	0,01±0,18	-0,03±0,20	0,08±0,21	0,32±0,21
JJA	0,16±0,20	0,09±0,23	0,28±0,27	0,58±0,36
SON	0,20±0,13	0,14±0,13	0,39±0,21	0,28±0,22

Mainitud soojenemise regionaalsed ja sesoonsed karakteristikud siinses rekonstruktsioonis on ka kooskõlas vaatlusandmetega (van Lipzig jt., 2008), maksimumiga $0,58 \pm 0,36$ (°C/kümnend) austraalsel talvel (juuni–august) Antarktika poolsaare lääneosas. Suvine (detsember–veebruar) soojenemise maksimum on aga statistiliselt oluliselt ilmnenu vaid poolsaare põhjatipus $0,17 \pm 0,13$ (°C/kümnend).

Osutub, et Transantarktika mäestik, kui topograafiline barjäär on ka eraldusjooneks, mille järgi saab temperatuuritrendi järgi eristada Ida- ja Lääne-Antarktist. Temperatuuri aegrea rekonstruktsiooni kohaselt ilmneb oluline aastakeskmise temperatuuri tõus suuremas osas Lääne-Antarktilisest, kinnitades sellega jääpuuraukude andmestiku kaudu saadud tulemusi (Thomas jt. 2013). Suurim soojenemine on ilmnenu austraalsel kevadel, $0,39 \pm 0,21$ °C aastakümne kohta.

3. Kokkuvõte ja prognoosid

Kokkuvõttes võib nentida, et temperatuuri aegread aastaist 1958–2012, ruumiliselt keskmistatuna üle kolme Antarktika regiooni, näitavad statistiliselt olulist soojenemist kogu aasta kestel Antarktika poolsaarel, talvel-kevadel Lääne-Antarktilises ning kevadel

Ida-Antarktises. Kummalgi pool Transantarktika mäestikku ilmneb temperatuuri trendides suur erinevus, eriti talvel ja kevadel. See on kooskõlas ettekujutusega, et soojenemine on peamiselt põhjustatud põhja poolt saabuva merelise õhu adveksioonist, mis levides üle Lääne-Antarktise, peatub Transantarktika mäestiku kui topograafilise barjääri ees.

Talvede soojenemine on toonud kaasa merejää olulise vähenemise Antarktika poolsaare läänerannikul ning Bellingshauseni ja Amundseni meres, tagajärjeks mereökosüsteemi muutused (näiteks jääd vajava krilli osatähtsuse vähenemine ja vabavett eelistavate salpide rolli suurenemine ning vastavalt adeeliapingviinide populatsiooni kahanemine ning valjaspingviinide arvukuse kasv jne).

Viimase aastakümne uuringud osutavad, et soojenemist Ida-Antarktises pidurdab osooniauk. Kasvuhoonegaasi osooni sisalduse järsk vähenemine kevadel põhjustab senisest enam stratosfääri jahtumist Antarktise kohal, kust senisest külmem õhk allapoole troposfääri laskudes põhjustab temperatuurierinevuse suurenemist ja vähendab soojusvahetust Antarktika ning ümbritsevate ookeanialade vahel. Osooniaugu avastamine tõi kaasa olukorra tõsiduse mõistmise maailma poliitikute ja kõigi ÜRO liikmesriikide poolt ning viis Montreali protokollini sõlmimiseni 1987. aastal, millega on keelustatud osooni hävitavate kloorfluorsüsinike paiskamine atmosfääri. Kuigi keelu mõju avaldub aeglaselt, on juba täheldatud osooniaugu mõningat vähenemist ning prognooside kohaselt taastub stratosfääri osoonikiht Antarktise kohal tööstusrevolutsiooni eelse perioodi tasemeni aastateks 2060–70 (ACCE2009; ACCE – Antarctic Climate Change and Environment).

Selleks ajaks peaks lõppema ka inimtegevuse poolt atmosfääri paisatud kahte tüüpi ainete – soojenemist põhjustavate kasvuhoonegaaside ning jahenemist põhjustavate kloorfluorsüsinike – vastassuunaliste mõjude tasakaalustumine Ida-Antarktise kohal. Edaspidiseks prognoositakse õhu soojenemist Antarktises ca 3°C võrra aastaks 2100, mis ei põhjusta siiski Ida-Antarktise jääkilbi märkimisväärset sulamist. Vastupidi, eeldatav sademete hulga kasv pigem põhjustab jääkilbi suurenemist (paksenemist). Olukord on teistsugune Lääne-Antarktises, kus ookeani ja atmosfääri regionaalse soojenemisega seostatav, juba praegu avalduv mägiliustike kiirenev merrelibisemine annab ca 10% praegu täheldatavast ookeanitaseme tõusust 2,8 mm/aastas (veapiirid 2,3–3,4 mm/a, IPCC2013). Praegu prognoositakse, et Lääne-Antarktise osatähtsus kasvab maailmamere veetaseme tõusust ja moodustab senisest suurema osa aastaks 2100, kui moodustab eeldatavast summaarsest tõusust ca 1 m, võrreldes aastaga 2010 (ACCE2013).

Kirjandus

- ACCE2009 (Antarctic Climate Change and the Environment). 2009. Toim. Turner, J., Bindshadler, R.A., Convey, P., Di Prisco, G., Fahrbach, E., Gutt, J., Hodgson, D.A., Mayewski, P.A. and Summerhayes, C. Cambridge, SCAR. 526 pp.
- ACCE2013. http://www.scar.org/scar_media/documents/publications/acce/ATCM36_wp038_e.pdf
- Bromwich, D. H., Nicolas, J. P., Monaghan, A. J., Lazzara, M. A., Keller, L. M., Weidner, G. A., Wilson, A. B. 2013. Central West Antarctica among the most rapidly warming regions on Earth. – *Nat. Geosci.*, 6, 139–145, doi:10.1038/ngeo1671.
- Jonassen, M. O., Tisler, P., Altstadter, B., Scholtz, A., Vihma, T., Lampert, A., Koenig-Langlo, G., Luepkes, C. 2015. Application of remotely piloted aircraft systems in observing the atmospheric boundary layer over Antarctic sea ice in winter. – *Polar Research*, 34. DOI: 10.3402/polar.v34.25651
- Kaup, E. 1976. Results of meteorological observations at Camp Abendberg and during the oversnow traverses. – *Geodätische und Geophysikalische Veröffentlichungen*, III, 37, 97–103.

- Kouznetsov, R., Tisler, P., Palo, T., Vihma, T. 2013. Evidence of Very Shallow Summertime Katabatic Flows in Dronning Maud Land, Antarctica. – *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 52, 164–168. DOI: 10.1175/JAMC-D-12-0218.1
- Kreem, E. 2005. 40 aastat Eesti vaatlusi Antarktikas. – *Eesti laevanduse aastaraamat*. Kirjastus Sekstant, 132–139.
- Monaghan, A. J., Bromwich, D. H., Chapman, W., Comiso, J. C. 2008. Recent variability and trends of Antarctic near-surface temperature. – *J. Geophys. Res.*, 113, D04105, DOI:10.1029/2007JD009094.
- Nicolas, J. P., Bromwich, D. H. 2014. New Reconstruction of Antarctic Near-Surface Temperatures: Multidecadal Trends and Reliability of Global Reanalyses. – *J. Climate*, 27, 8070–8093. DOI: 10.1175/JCLI-D-13-00733.1
- O'Donnell, R., Lewis, N., McIntyre, S., Condon, J. 2011. Improved methods for PCA-based reconstructions: Case study using the Steig et al. (2009) Antarctic temperature reconstruction. – *J. Climate*, 24, 2099–2115, DOI:10.1175/2010JCLI3656.1.
- Richard, Y., and Coauthors. 2013. Temperature changes in the mid and high latitudes of the Southern Hemisphere. – *Int. J. Climatol.*, 33, 1948–1963, DOI:10.1002/joc.3563.
- Steig, E. J., Schneider, D. P., Rutherford, S. D., Mann, M. E., Comiso, J. C., Shindell, D. T. 2009. Warming of the Antarctic ice-sheet surface since the 1957 International Geophysical Year. – *Nature*, 457, 459–462, DOI:10.1038/nature07669.
- Thomas, E.R., Bracegirdle, T. J., Turner, J., Wolff, E. W. 2013. A 308 year record of climate variability in West Antarctica. – *Geophys. Res. Lett.*, 40, 5492–5496, DOI:10.1002/2013GL057782.
- Thompson, D.W. J., Solomon, S. 200. Interpretation of recent Southern Hemisphere climate change. – *Science*, 296, 895–899, DOI:10.1126/science.1069270.
- Turner, J., and Coauthors, 2004: The SCAR READER project: Toward a high-quality database of mean Antarctic meteorological observations. – *J. Climate*, 17, 2890–2898, DOI:10.1175/1520-0442(2004)017<2890:TSRPTA.2.0.CO;2.
- van Lipzig, N. P. M., Marshall, G. J., Orr, A. King, J. C. 2008. The relationship between the Southern Hemisphere annular mode and Antarctic Peninsula summer temperatures: Analysis of a high-resolution model climatology. – *J. Climate*, 21, 1649–1668, DOI:10.1175/2007JCLI1695.1.
- Белов, В. Ф., Крээм Э. И. 1967. Условия появления перламутровых облаков на станции Молодежной. – *Инф. Бюлл. Сов. Антаркт. Эксп.*, 63, 34–35.
- Белов, В. Ф., Крээм Э. И. 1968. Характеристика метеорологического и радиационного режима в районе станции Молодежной. – *Тр. Сов. Антаркт. Эксп.*, 38, 141–150.
- Виллманн, Ч. И. 1966. О значении наблюдений за серебристыми облаками. – *Инф. Бюлл. Сов. Антаркт. Эксп.*, 57, 71–76.
- Долгин, И. М., Маршунова, М. С., Петров, Л. С. (ред-ы). 1976. Справочник по климату Антарктиды. Том I. Солнечная радиация, радиационный баланс, солнечное сияние. Гидрометеоздат, Ленинград. 213 стр.
- Долгин, И. М., Петров, Л. С. (ред-ы). 1977. Справочник по климату Антарктиды. Том II. Температура воздуха, атмосферное давление, ветер, влажность воздуха, облачность, осадки, атмосферные явления, видимость. Гидрометеоздат, Ленинград. 494 стр.
- Колосова, Н. В., Петров, Л. С. (ред-ы). 1981. Справочник по климату Антарктиды. Том III. Статистические характеристики временной структуры температуры воздуха, атмосферного давления и скорости ветра. Гидрометеоздат, Ленинград. 270 стр.
- Крээм Э. И. 1968. Опыт наблюдения серебристых облаков в Антарктиде. – *Астрон. Вестник* 2, 3, 172–182.

On participation of Estonians in Antarctic meteorological research and on climate change in Antarctica

Enn Kaup and Jüri Ivask

Institute of Geology at Tallinn University of Technology

Summary

During 1965–1992, 10 observers from Estonia made all together 18 wintering at the Antarctic stations of the former Soviet Union with the primary task to carry out noctilucent clouds observations. They also made extensive regular meteorological, actinometrical and ozone observations. In the 1980s, three Estonians participated in Soviet Antarctic aerological observations and during 2010–2015, two Estonian meteorologists investigated atmospheric boundary layer at the Finnish Antarctic station Aboa and in the Weddell Sea. Their work is reflected in extensive public databases and in a number of publications. Climate change in Antarctica is reviewed using mostly a recent reconstruction of Antarctic near-surface temperatures on the basis of global reanalyses (Nicolas and Bromwich, 2014). Their annual mean temperature time series spatially averaged over three main Antarctic regions show a statistically significant warming trend throughout the year on the Antarctic Peninsula, in June–November in West Antarctica and in September–November in East Antarctica during the 1958–2012 period. The role of Antarctic ozone hole in restraining warming in East Antarctica and respective predictions until 2100 according to ACCE are brought forward.

Eesti kliima trendid ja režiimihked

Jaak Jaagus ja Mait Sepp
Tartu Ülikooli geograafia osakond

1. Sissejuhatus

Kliima on väga muutlik looduse komponent. Nii nagu ilm muutub päevast päeva, niimoodi muutuvad ilmastikutingimused aastast aastasse ja ka palju pikemas ajaskaalas. Kliimanäitajad, näiteks paljuaastane keskmine õhutemperatuur ja sademete hulk, pole mitte püsivad suurused, vaid nad sõltuvad keskmistamisperioodi valikust. Erinevate perioodide vältel arvatud keskmised näitajad ei lange üldjuhul kokku, vaid erinevad kas siis väiksemal või suuremal määral. Kliimatrendist on võimalik rääkida, kui pikema perioodi ehk aastakümnete vältel on kliimanäitaja aegreas kindel suundumus ehk regressioonisirge tõusukordaja on statistiliselt oluline vähemalt $p < 0,05$ tasemel.

Eesti asub mereliselt mandrilisele kliimale üleminekualal, mida iseloomustab kliimatingimuste suur ajalis-ruumiline varieeruvus. Seega peaksid nii pikaajalised trendid kui ka äkilised tingimuste muutused olema siin täiesti tõenäolised, sõltuvalt erinevat päritolu õhumasside esinemissageduse varieerumisest. Läänemere piirkonna kliimat mõjutavad õhumassid, mille päritolu ulatub Arktikast lähistroopikani (Rutgersson et al., 2014).

Kliimamuutusi Läänemere piirkonnas on kokkuvõtlikult käsitletud vastavates koguteostes (BACC 2008; 2015). Üldiselt võib järeldada, et siin on soojenemine olnud viimastel aastakümnetel kiirem, kui seda on maakera keskmise temperatuuri tõus. Kui Läänemere valgla jagada mööda 60° pl pooleks, siis perioodil 1871–2004 tõusis põhjapoolsemal alal aasta keskmine temperatuur **0,10** kraadi ja lõunapoolsemal alal **0,07** kraadi kümnenäendi kohta (BACC 2008). Need muutused olid talvel vastavalt 0,09 ja **0,10**, kevadel **0,15** ja **0,11**, suvel **0,06** ja 0,03 ning sügisel **0,08** ja **0,06** kraadi kümnenäendi kohta. Pikendatud perioodi 1871–2011 jaoks olid trendid natuke tugevamad – Läänemere põhjapoolmikul **0,11** ja lõunapoolmikul **0,08** (BACC, 2015). Jämedas kirjas toodud muutused olid statistiliselt olulised $p < 0,05$ tasemel.

Muutusi Eesti kliimas on uuritud juba mitme aastakümne jooksul. Õhutemperatuur on Eestis 20. sajandi jooksul tõusnud, nii nagu mujalgi Põhja-Euroopas. Erinevate perioodide kohta leitud trendi näitajad on muidugi erinevad. Alates 19. sajandi keskelt kuni 20. sajandi lõpukümnenäenditeni on aasta keskmise temperatuuri tõusuks hinnatud kuni üks kraad, kusjuures sellest suurem soojenemine leidis aset kevadel ja talvel (Jaagus, 1996; 1998). Suvel ja sügisel märkimisväärset soojenemist siis polnud. Samas aga 20. sajandi teise poole temperatuuri muutused on palju suuremad. Aasta keskmine tõusis selle perioodi jooksul erinevates jaamades 1,0–1,5 kraadi ja kevadkuude (märts, aprill, mai) keskmine enam kui kaks kraadi (Jaagus, 2003; 2006a). Kõige suurem soojenemine leidis aset märtsis, mis valdavalt talvisest lumisest kuust oli muutunud lumevabaks kevadkuuks (Keevallik, 2003a; 2003b). Perioodil 1950–2009 on Eesti rannikujaamades õhutemperatuuri tõusu märgata kõikidel kuudel (Kont et al., 2011).

Ööpäevaste õhutemperatuuri pikkade aegridade põhjaliku statistilise käsitluse on teinud O. Kärner (1996; 2009; 2012; 2015). Kasutades autoregressiooni ja integreeritud

libiseva keskmistamise (ARIMA) mudelit ja kohaliku temperatuuri tolerantsi mõistet on ta näidanud, et perioodi 1866–2005 jooksul on ööpäeva keskmine temperatuur kõikunud tolerantsi piirides ja nendest väljapoole jäävate heidikute sagedus on püsitud ühtlane. Vaid viimase 20 aasta jooksul on umbes ühe protsendi jagu vähenenud külmade päevade sagedus ja üle kahe protsendi suurenenud soojade päevade oma (Kärner, 2012).

Temperatuuritõus peegeldub paljudes temperatuuriga otseselt või kaudselt seotud kliimanäitajates. Nii on näiteks vähenenud Eesti keskmine lumikatte kestus 25,9 päeva võrra perioodil 1961/62–2002/2003 (Tooming ja Kadaja, 2006) ja rannikumere jääkatte kestus erinevatel rannikutel keskmiselt 30–50 päeva (Jaagus, 2006b). Varakevade varasem saabumine Ida-Euroopa lausmaal aastatel 1946–1995 on kõige tugevam just Eestiga seotud piirkonnas (Jaagus et al., 2003).

Teiste kliimanäitajate muutused on Läänemere regioonis olnud lokaalsed ja vähem usaldusväärsed (BACC, 2008; 2015). Eestis on olnud näha teatavat sademete hulga suurenemist 20. sajandi teisel poolel (Jaagus, 2006a), eriti külmal poolaastal, kuid osaliselt on see tingitud märgumisparandi lisamisest alates 1966. aastast. Madalate pilvede hulga suurenemist ja ühtlasi päikesekiirguse näitajate teatavat kahanemist täheldati kuni 1990ndate alguseni, millele on järgnenud vastupidine muutus (Keevallik ja Russak, 2001; Russak ja Kallis, 2003; Russak, 2009).

Lisaks trendianalüüsile on kliima muutuste uurimisel hakatud kasutama ka meetodeid, mille abil tehakse kindlaks nn. režiiminihked. Need kujutavad endast järske muutusi uuritavas aegreas, kas hüppeid ülespoole või kukkumisi allapoole. Režiiminihete esinemise korral jaguneb aegrida kaheks osaks, mille puhul on kummalgi osal erinevad statistilised omadused ehk uuritava väärtuse keskmised tasemed.

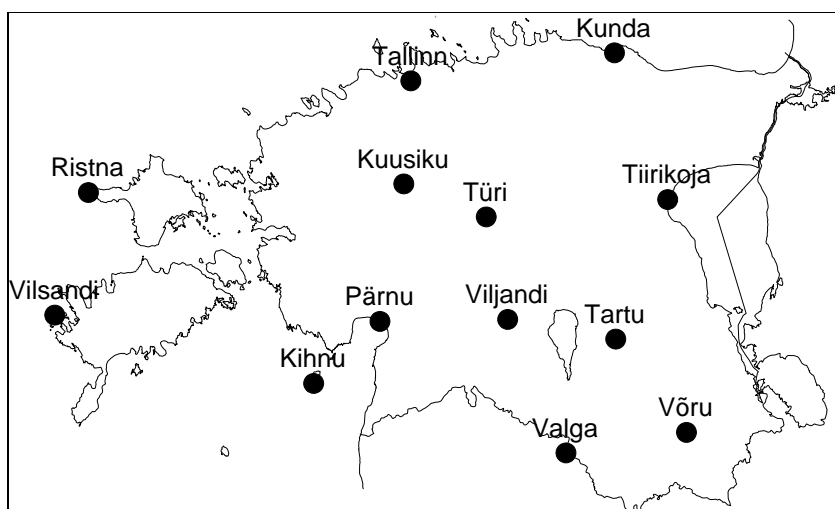
Algselt oli režiiminihke mõiste kasutusel ökoloogias. See tähendab suurt, järsku ja püsivat muutust süsteemi funktsioneerimises (Biggs et al., 2009). Klimatoloogias isoleerimustatakse režiiminihket kui järsku üleminekut ühest kvaasi-statsionaarsest kliimaolekust teise, kusjuures üleminekuperiood on palju lühem kui üksikute kliimaperioodide kestvus. Maakera keskmise õhutemperatuuri aegreas on kindlaks tehtud režiiminihked aastatel 1910–1920, 1938–1945, 1976–1981 ja 2001–2002 (Swanson ja Tsonis, 2009). Režiiminihete semantika ja sisu on detailselt kirjeldanud Overland kaasautoritega (2008).

Mitmes töös on leidnud kajastamist Soome lahe ja Eesti kliima režiiminihked. Tsonaalse tsirkulatsiooni tugevnemine veebruaris on toimunud alates 1987. aastast (Keevallik ja Soomere, 2008). Samasugune režiiminihe alates 1980ndate lõpust leiti Utö jaama andmetel detsembri ja jaanuari kumulatiivse tuule toime jaoks (Elken et al., 2014). Soome lahe kohal esineva keskmise õhuvoolu kiiruse aegreas perioodil 1981–2010 leiti jaanuaris ülesnihke esinemine 1988. aastal ja allanihe 1994. aastal (Keevallik ja Soomere, 2014). Kasutades kahe jaama, Vilsandi ja Tiirikoja andmeid, tehti kindlaks keskmise õhuvoolu tsonaalse komponendi jaanuarist märtsini statistiliselt oluline ülesnihe, 1980ndate lõpus, õhutemperatuuril jaanuaris ja veebruaris ning sademete kuusummal veebruaris (Keevallik, 2011).

Käesoleva töö eesmärgiks on analüüsida Eesti kliimanäitajate 65-aastase perioodi (1951–2015) aegridu, kasutades trendi- ja režiiminihke analüüsi. Sealjuures analüüsitakse erineva ajalahutusega aegridu – nii aastaseid, aastaegade kui ka üksikute kuude viisi. Nii on võimalik kindlaks teha kliimamuutuste sesooneid erinevusi.

2. Andmed ja meetodika

Kliimaatiliste aegridade analüüsiks perioodil 1951–2015 on käesolevas töös valitud Eesti 13 ilmajaama andmed (joonis 1). Nende valikul on lähtunud mitmest olulisest põhimõttest. Jaamade vaatlusread peaksid olema võimalikult pidevad ehk lünkadeta. Aegread peaksid olema homogeenised ehk vaatlustingimused ühesugused. Jaama vaatlusväljaku asukoht peaks olema võimalikult muutumatu. Jaama ümberpaiknemise tõttu on temperatuuri aegridade homogeenisus näiteks tõsiselt häiritud Pärnu ja Narva jaama puhul, kus mõõtmisi tehti erinevatel aegadel erineval kaugusel merest. Need kaks jaama on jäetud õhutemperatuuri analüüsist välja. Jaama asukoht on veel muutunud Tallinnas, kui see viidi 1980. aastal Ülemiste lennuväljalt Harkusse, ja Tartus, kus see viidi 1997. aastal Ülenurme lennuväljalt Tõraverre. Kasutatud jaamad on valitud selliselt, et nad paikneksid enamvähem ühtlaselt üle Eesti.



Joonis 1. Töös kasutatud ilmajaamade paiknemine.

Figure 1. Location of stations in Estonia used in this study.

Andmetena kasutatakse soojusolude iseloomustamiseks kuude keskmist temperatuuri, niiskusrežiimi kirjeldamiseks kuu sademete hulka ning talviste ilmaolude näitajana lumikatte kestust. Lumikatte kestust on kogu aegrea jooksul olnud võimalik analüüsida vaid viies kliimajaamas (Tallinn, Tartu, Pärnu, Võru, Vilsandi). Täiendavalt analüüsiti Tartus mõõdetud päikesepaiste kestust ja keskmist merepinnaile taandatud õhurõhku perioodil 1961–2015.

Trendianalüüsiks kasutati kaht peamist meetodit: lineaarset regressioonianalüüsi ja Mann-Kendalli testi. Kuna esimene meetod eeldab aegrea normaaljaotust, siis paljudel juhtudel polnud selle abil õige trendi määrata. Mann-Kendalli testi võib aga vabalt kasutada mittenormaalse jaotuse korral. Sel juhul määratakse trendijoone tõusukordaja väärtus Sen'i meetodi abil. Trend loetakse statistiliselt oluliseks $p < 0,05$ tasemel. Trendi väärtusena on kasutatud muutust kogu perioodi kohta, mis on saadud tõusukordaja korrutamisel aastate arvuga ehk 65-ga. See näitab siis vahet trendijoone väärtuse vahel perioodi lõpus ja alguses.

Režiimihke analüüsimiseks kasutati STARS (Sequential T-test Analysis of Regime Shifts) meetodit ehk Rodionovi testi (Rodionov, 2004; Rodionov ja Overland, 2005). Sealjuures valiti järgmised testi parameetrid: lõikelõigu pikkus $l=10$ aastat, t-testi olulisuse nivoo $p = 0,05$, Huberi kaaluparameeter $HWP=1$. Juhul, kui aegreas esines statistiliselt oluline režiimihke, siis uuritava näitaja aegrea joonisele kantakse see niimoodi, et seal on kahe erineva perioodi keskmised horisontaalse joonena ning nende vahel järsk hüpe.

3. Kliima trendid

Nii kogu maakera kui ka Eesti kliimale on olnud iseloomulik keskmise õhutemperatuuri tõus alates 19. sajandi teisest poolest. Kiiremaks läks soojenemine just viimastel aastakümnetel, mida on uuritud ka käesolevas töös. Kasutades kaht erinevat trendianalüüsi meetodit olid tulemused üsna sarnased. Kui esines statistiliselt oluline trend lineaarse regressioonianalüüsi järgi, siis reeglina oli see nii ka Mann-Kendalli testi tulemustes. Kuna aga andmeridade vastavus normaaljaotusele pole alati tagatud, siis järgnevas käsitleme just viimaseid, kus tõusukordaja on leitud Sen'i meetodil.

Tabelis 1 on toodud muutused trendi järgi uuritavates jaamades, mis näitavad vägagi suurt temperatuuri tõusu. Aasta keskmine õhutemperatuur on olulisel määral tõusnud kõikides jaamades, keskmiselt 2,1–2,3 kraadi võrra. Tartu jaama puhul on muutus tõenäoliselt seotud jaama asukoha ümberpaigutamisega külmemast Ülenurmest vähem külmemasse Tõravervesse. Tartuga võrreldes vastupidine, kuid väiksem muutus Tallinnas on samuti seletatav jaama asukoha muutusega – mõneti soojemast Ülemistest pisut jahedamasse Harkusse.

Ka aastaegade keskmine temperatuur on olulisel määral tõusnud, kusjuures suurim soojenemine on aset leidnud kevadel ja ka talvel. Üksikutel kuudel saame rääkida statistiliselt olulisest trendist märtsi, aprilli, mai, juuli, augusti, septembri ja novembri puhul. Peaaegu mingit soojenemist pole olnud juunis ja oktoobris. Talvekuude keskmine temperatuur on samuti tõusnud suurel määral ehk enamasti 2–3 kraadi võrra (joonis 2), kuid see muutus pole statistiliselt oluline. Seda asjaolu põhjustab talvise temperatuuri väga suur ajaline muutlikkus. Üldistatult võib välja tuua ka selle, et rannikul paiknevates jaamades on soojenemine olnud mõnevõrra väiksem kui sisemaa jaamades. Suvel on aga märgata vastupidist seaduspärasust.

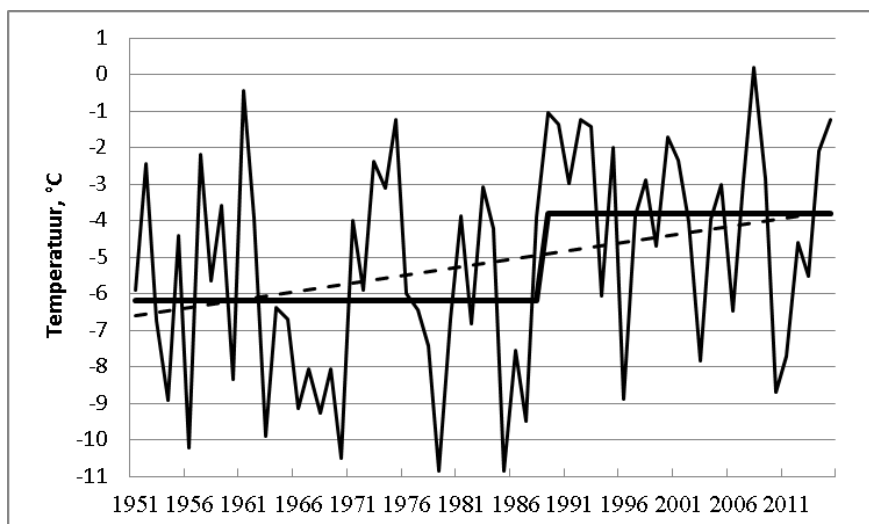
Talvise temperatuuri tõus on toonud endaga kaasa lumikatte kestuse vähenemise 22–25 päeva võrra. See muutus on kõigis jaamades statistiliselt oluline $p<0,05$ tasemel.

Tabel 1. Kuude, aasta ja sesoonide keskmise temperatuuri muutus trendi järgi perioodil 1951–2015. Statistiliselt olulised muutused $p < 0,05$ tasemel on trükitud jämedalt.

Table 1. Changes by the trend of monthly, annual and seasonal mean temperature during 1951–2015. Statistically significant trends on $p < 0.05$ level are typed in bold.

Jaam	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Tartu	3,0	3,9	5,0	3,3	2,3	0,4	2,3	2,0	2,1
Võru	3,0	3,6	4,5	3,1	2,2	0,5	2,5	2,1	1,9
Vilsandi	2,1	3,0	3,7	2,5	2,5	1,0	2,6	2,4	1,8
Tiirikoja	3,0	3,5	4,5	3,0	2,6	0,3	2,0	1,4	2,2
Viljandi	3,1	3,7	4,6	2,8	2,1	0,2	2,2	1,7	2,0
Valga	2,9	3,4	4,3	2,7	1,9	0,0	2,1	1,6	1,5
Kuusiku	2,3	3,3	3,9	2,6	1,8	0,1	2,2	1,6	1,7
Kunda	2,4	3,4	3,9	2,4	2,5	0,3	2,1	1,8	1,7
Kihnu	2,0	3,1	4,2	3,0	2,5	0,7	2,0	2,1	1,7
Tallinn	1,9	3,4	3,7	2,8	2,4	0,2	2,2	1,5	1,5
Ristna	1,7	2,8	3,3	2,2	2,2	0,6	2,2	2,2	1,6
Türi	2,6	3,5	4,3	2,8	2,1	0,4	2,5	1,8	1,8

Jaam	X	XI	XII	Aasta	III–V	VI–VIII	IX–XI	XII–II
Tartu	0,6	2,1	2,8	2,5	3,7	1,5	1,6	2,9
Võru	0,7	2,2	2,2	2,4	3,4	1,6	1,4	2,4
Vilsandi	0,4	1,8	2,1	2,2	3,0	1,9	1,4	2,4
Tiirikoja	0,5	2,0	2,5	2,3	3,7	1,2	1,6	3,1
Viljandi	0,3	2,1	2,8	2,3	3,3	1,4	1,4	3,0
Valga	0,2	1,9	2,2	2,1	3,0	1,2	1,1	2,8
Kuusiku	0,0	1,8	2,6	2,0	3,1	1,2	1,2	2,5
Kunda	0,6	2,0	2,0	2,2	3,2	1,4	1,4	2,6
Kihnu	0,3	1,5	2,0	2,1	3,4	1,6	1,2	2,3
Tallinn	0,0	1,7	1,9	1,9	3,2	1,2	0,9	2,4
Ristna	0,3	1,7	2,1	2,0	2,5	1,6	1,2	2,1
Türi	0,2	2,0	2,2	2,2	3,2	1,5	1,2	2,7



Joonis 2. Talve (XII–II) keskmine õhutemperatuur Tartus perioodil 1951–2015, selle režiiminihi alates 1988/1989. aasta talvest (jämeda joonega) ja lineaarne trend (katkendjoonega).

Figure 2. Time series of winter (DJF) mean air temperature in Tartu during 1951–2015, its regime shift since the winter 1988/89 (wide line) and the linear trend (dashed line).

Sademete muutus on olnud varieeruvam kui õhutemperatuuril (tabel 2). Sademete ajaline ja territoriaalne muutlikkus on võrreldamatult suurem kui temperatuuril ning seetõttu on ka sademete trendi erinevus jaamade vahel ja üksikute kuude vahel suur. Arvestada tuleb sedagi, et keskmine sademete hulk sesooniti erineb mitmekordselt. Sademete muutus 10 mm talvel on suhteliselt palju suurem muutus kui 10 mm suvel. Sademete suure muutlikkuse tõttu võivad üksikud juhuslikku laadi väga tugevad sajud mõjutada kogu perioodi trendi.

Sademete hulk on Eestis suurenenud eelkõige külmal poolaastal, kuid mitte kõigis jaamades statistiliselt olulisel määral. Selline tulemus on oodatav, sest koos temperatuuri tõusuga peaks tõusma ka sademete hulk. Külmal aastaajal esineb kõrgem temperatuur tsükloonaalse ilma korral, millega kaasnevad ka sademed ja tugevad tuuled. Vastupidine olukord on aga madalama temperatuuri korral, sest selle esinemine on seotud anti-tsükloonaalse ilmaga ja selge taevaga, mis soodustab maapinna jahtumist.

Üksikute kuudest oli kõige selgem sademete kasv iseloomulik märtsile – kuu sademete summa suurenes vaadeldud jaamades 13–23 mm võrra. Vaid Kundas oli see muutus väiksem ja mitteoluline. Kõige vähem on talvekuude sademed suurenenud Eesti äärmisel läänerannikul Vilsandis ja Ristnas. Paljudes jaamades esines statistiliselt oluline trend ka juunikuus. See on heas seoses asjaoluga, et juunis, erinevalt teistest sooja poolaasta kuudest, pole temperatuur tõusnud. Sajuse ja pilves ilma sagenemine on hoidnud juuni keskmise temperatuuri vähe muutuvana. Septembris ning vähemal määral aprillis ja juulis on aga sademeid uuritaval perioodil jäänud isegi mõnevõrra vähemaks. Aastane sademete summa on olulisel määral suurenenud enamikus jaamades, samuti ka talve sademed.

Tabel 2. Kuude, aasta ja sesoonide sademete hulga (mm) ja päikesepaiste kestuse muutused trendi järgi perioodil 1951–2015. Statistiliselt olulised muutused $p < 0,05$ tasemel on trükitud rasvaselt.

Table 2. Changes by the trend of monthly, annual and seasonal precipitation and sunshine duration during 1951–2015. Statistically significant trends on $p < 0.05$ level are typed in bold.

Jaam	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Tartu	22,2	10,4	13,9	-4,6	14,4	31,8	-8,6	17,0	-7,8
Võru	28,9	11,0	15,3	-1,7	10,4	22,0	-1,6	-5,3	-7,3
Vilsandi	10,6	5,4	18,6	2,3	7,8	32,5	0,5	16,3	-19,0
Tiirikoja	23,2	16,3	15,2	-6,7	14,4	36,1	2,7	16,3	-9,7
Viljandi	29,6	13,3	17,8	4,4	7,0	21,4	-6,4	21,6	-13,6
Valga	16,1	8,4	12,6	-5,6	1,3	13,0	-17,6	-1,1	-29,3
Kuusiku	21,4	6,8	15,8	0,0	8,7	17,4	-9,3	19,5	-22,4
Kunda	19,3	8,5	9,1	-9,7	6,8	20,1	-1,8	10,1	-4,7
Kihnu	24,1	20,4	19,3	4,3	2,2	30,1	13,5	7,8	-12,4
Tallinn	31,0	16,3	23,1	0,7	0,0	27,0	9,7	4,2	-20,0
Ristna	8,9	3,1	13,0	-2,3	7,7	27,1	6,6	15,7	-12,5
Türi	33,2	16,3	23,0	-3,1	2,2	16,4	-13,9	13,7	-16,0
Päikesepaiste kestus (tundides)									
Tartu	2,8	11,9	-5,3	23,1	14,9	-46,5	29,2	29,6	3,4

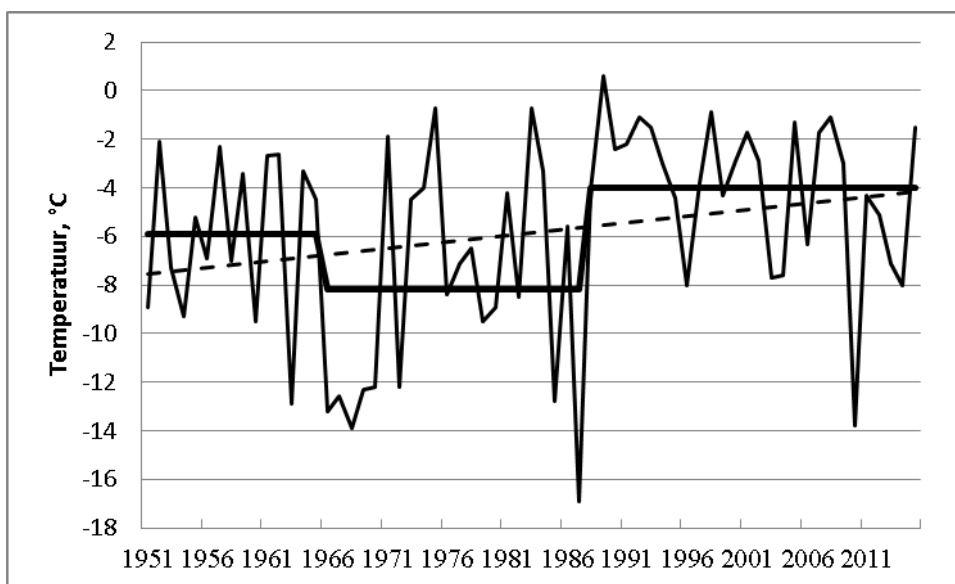
Jaam	X	XI	XII	I–XII	III–V	VI–VIII	IX–XI	XII–II
Tartu	17,6	18,6	16,6	153,1	22,8	38,6	36,2	48,8
Võru	9,0	19,1	14,4	111,4	30,7	21,1	16,2	60,3
Vilsandi	13,0	13,0	3,4	92,4	34,6	63,4	33,5	36,5
Tiirikoja	17,8	23,6	18,6	219,3	29,6	68,1	32,5	65,0
Viljandi	24,7	21,2	24,0	171,4	29,9	36,3	19,3	78,0
Valga	13,1	6,0	2,2	10,9	12,1	-2,2	-18,6	35,6
Kuusiku	21,9	13,7	9,3	126,3	18,8	32,5	15,0	45,5
Kunda	4,3	20,6	10,8	119,9	18,7	32,5	20,2	47,9
Kihnu	22,0	19,6	22,4	193,4	31,0	60,0	24,3	72,4
Tallinn	24,4	21,7	21,7	174,5	21,7	44,8	11,7	70,2
Ristna	9,6	18,2	-4,8	70,1	13,7	45,7	9,1	12,8
Türi	21,9	26,3	27,1	165,0	17,7	23,0	35,9	81,4
Päikesepaiste kestus (tundides)								
Tartu	14,4	-1,4	6,8	106,3	37,7	12,3	16,3	28,9

Päikesepaiste kestus on Tartu andmetel uurimisperioodi jooksul mõnevõrra tõusnud, kuid see pole statistiliselt oluline (tabel 2). Samas on aga juunikuus päikesepaiste kestus vähenenud oluliselt ehk 46,5 tunni võrra. See on loogilises seoses sademete kasvuga. Merepinnale taandatud õhurõhu Tartu aegreas ei leitud ühtegi olulist trendi.

4. Režiimihked

Õhutemperatuuri režiimihked Eesti mandriosas tulid kõikide jaamade puhul selgelt esile. Erinevused üksikute jaamade vahel olid tühised. Peamise režiimihkena joonistub välja talvise õhutemperatuuri hüppeline tõus alates 1980ndate aastate lõpust. Kui jaanuari ja aasta keskmise temperatuuri tõus leidis aset alates 1987/88. aasta talvest, siis veebruari ja talve keskmise õhutemperatuuri hüpe toimus aasta hiljem (joonis 2). Vastavad muutuse väärtused kõiguvad jaamade viisi aasta keskmisel temperatuuril 1,2–1,5 kraadi ja talve keskmisel 2,0–2,7 kraadi. Üldreeglina on temperatuuri hüpe ranniku-jaamades mõnevõrra väiksem kui sisemaa jaamades.

Kõikides Mandri-Eesti jaamades esines alates 1966. aastast jaanuari keskmise temperatuuri allanihe (joonis 3). Allanihe oli siis 2,2–2,7 kraadi, samas kui ülesnihe 1988. aastal oli 4,0–4,7 kraadi. Mõnes Ida-Eesti jaamas täheldati veebruari keskmise õhutemperatuuri olulist nihet tagasi madalamale tasemele alates 2005. aastast. See tagasihüpe võib olla seotud STARS meetodi omapäraga, mille puhul aegrea lõpuossa tekitab sageli tehislik nihe (Sepp, 2012). Siiski võib arvata, et antud juhul väljendub siin 2007., 2011. ja 2012. aasta väga külma veebruari mõju. Tugev positiivne märtsi temperatuurinihe idapoolsemas Eestis tuli ilmsiks juba 1966. aastast (enam kui kolme kraadi võrra). Kevade keskmise temperatuuri puhul esineb samuti hüpe ülespoole kas alates 1966. aastast (1,8–2,1 kraadi) või 1980ndate aastate algusest (1,6 kraadi), kuid Vilsandil, Kuusikul ja Tartus esines sarnane nihe ka mai temperatuuri puhul.



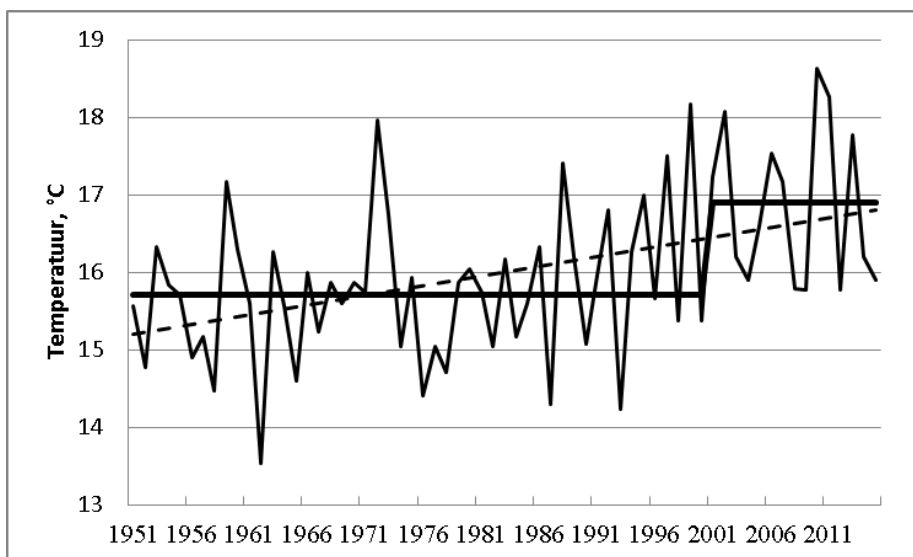
Joonis 3. Jaanuari keskmine õhutemperatuur Tartus perioodil 1951–2015, selle režiiminihe 1966. ja 1988. aastast (jämeda joonega) ja lineaarne trend (katkendjoonega).

Figure 3. Time series of January mean air temperature in Tartu during 1951–2015, its regime shifts since 1966 and 1988 (wide line) and the linear trend (dashed line).

Saartel asuvate ilmajaamade (Ristna, Vilsandi, Kihnu) õhutemperatuuri aegridade iseärasuseks võrreldes Mandri-Eesti sisemaa jaamadega on see, et neil pole negatiivseid nihkeid (jaanuaris 1966 ja veebruaris 2005) ning et statistiliselt oluline ülesnihe on esinenud alates 1989. aasta jaanuarist kõigil neljal kuul järjest ning lisaks ka talve ja kevade keskmise temperatuuri puhul. Seda saab seletada mere suure termilise inertsiga, mis kandub talvest kevadesse. Soojale talvele järgnes varane ja soe kevad, mis pikas aegreas kajastub temperatuuri nihkena ka märtsis ja aprillis.

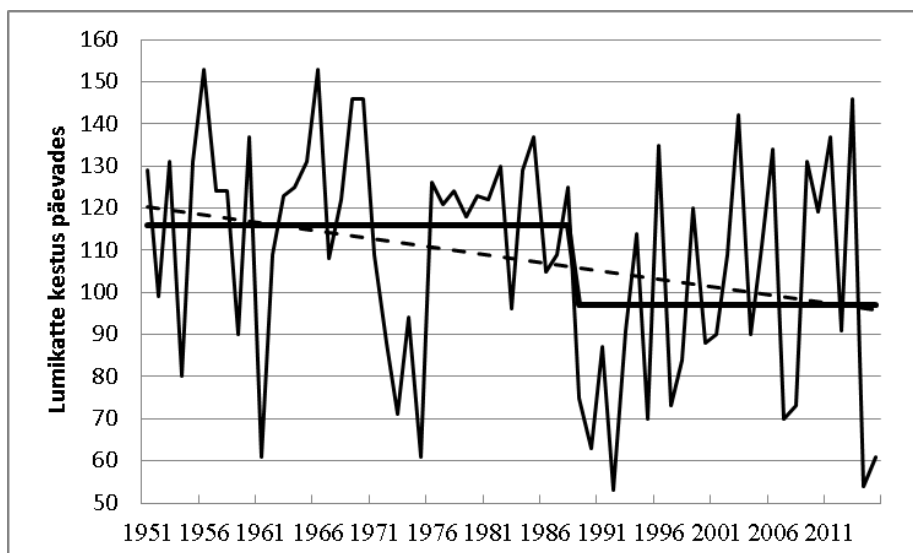
Ka soojal poolaastal selgitati välja olulisi temperatuuri režiimihikke, mis on esinenud aga enam kui kümme aastat hiljem talvisest nihkest. Juuli keskmine temperatuur on hüppeliselt tõusnud alates 2001. aastast (2,0–2,4 kraadi võrra) ja augusti keskmine enamikes jaamades alates 2002. aastast (1,3–1,7 kraadi), suve keskmine aga kas 1999. või 2001. aastast (1,1–1,5 kraadi, joonis 4). Seega viimasest sajandivahetusest alates on suved olnud Eestis keskmisest soojemad. Septembri temperatuuri positiivne nihe peaaegu kõikides jaamades on esinenud 2004. aastast (1,5–1,7 kraadi) ja sügise keskmise temperatuuri nihe alates 2005. aastast (1,1–1,6 kraadi).

Lumikatte kestuse aegridades esineb kõikides jaamades statistiliselt oluline negatiivne režiiminihe alates 1988/89. aasta talvest (joonis 5), mis on sünkroonis talve temperatuuri positiivse nihkega. Muutuse suurus ehk lumikatte kestuse lühenemine on 16–20 päeva.



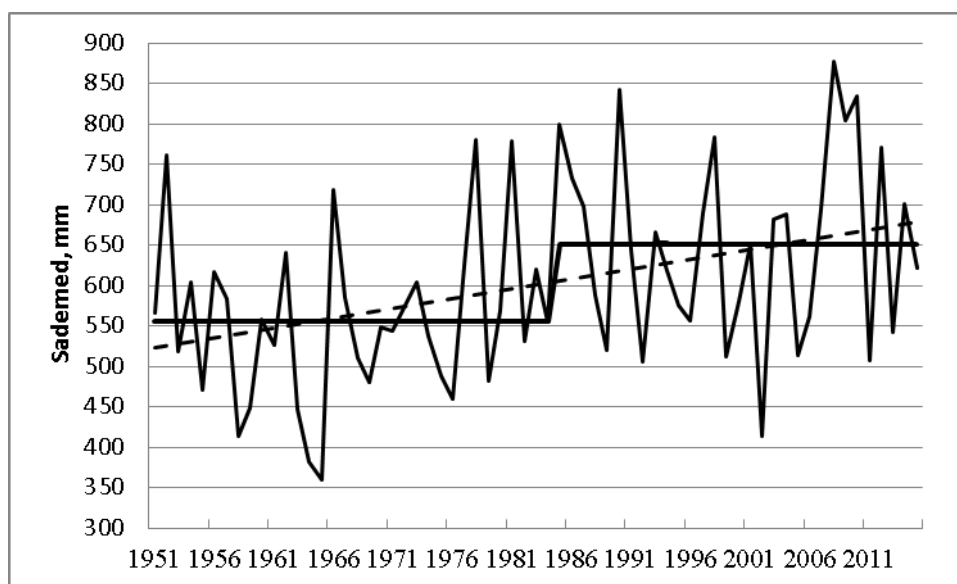
Joonis 4. Suve (VI–VIII) keskmine õhutemperatuur Tartus perioodil 1951–2015, selle režiiminihe alates 2001. aastast (jämeda joonega) ja lineaarne trend (katkendjoonega).

Figure 4. Time series of summer (JJA) mean air temperature in Tartu during 1951–2015, its regime shift since the summer 2001 (wide line) and the linear trend (dashed line).



Joonis 5. Lumikatte kestus (päevades) Tartus perioodil 1951–2015, selle režiiminihe alates 1988/1989. aasta talvest (jämeda joonega) ja lineaarne trend (katkendjoonega).

Figure 5. Time series of snow cover duration in Tartu during 1951–2015, its regime shift since the winter 1988/1989 (wide line) and the linear trend (dashed line).



Joonis 6. Aastane sademete hulk Tartus perioodil 1951–2015, selle režiiminihe alates 1985. aastast (jäme joon) ja lineaarne trend (katkendjoon).

Figure 6. Time series of annual precipitation in Tartu during 1951–2015, its regime shift since 1985 (wide line) and the linear trend (dashed line).

Mitme jaama puhul avaldub kevade sademete puhul nihe ülespoole alates 1966. aastast. See seostub vähemalt osaliselt märgumisparandi kasutuselevõtvõttega. Selle nihke suurus kõigub vahemikus 15–32 mm. Sademete aastasumma positiivne nihe enam kui 100 mm võrra seostub veerohkema perioodi algusega 1970ndate teisel poolel ja jätkumisega 1980ndatel (joonis 6). Mõnes jaamas esineb oluline tõusunihe sügise sademetel samuti 1970ndate lõpus. Talviste sademete aegreas esineb jõnks 1980ndate lõpus, mis on sünkroonne muutus talve õhutemperatuuri tõusuga alates 1988/89. aastast. Suvekuude sademed on kõige suurema muutlikkusega, mille puhul selget režiiminihet ei õnnestunud kindlaks teha. Tartus mõõdetud päikesepaiste kestuse ja õhurõhu andmetes statistiliselt oluline nihe puudus.

5. Kokkuvõtte

Uuritaval perioodil (1951–2015) on Eesti kliima olulisel määral muutunud, mida kajastavad nii kliimanäitajate trendid kui ka režiiminihked. Peamiseks muutuseks on õhutemperatuuri tõus külmal poolaastal. Talve keskmine temperatuur on tõusnud 2–3 kraadi võrra lineaarse trendi järgi, millele vastab enamvähem samas suuruses režiiminihe alates 1988/89. aasta talvest. Kevade keskmise temperatuuri tõus on olnud veelgi suurem – enam kui kolme kraadi võrra. Suve ja sügise keskmise temperatuuri tõus on olnud väiksem, vahemikus 1–2 kraadi, kuid ka need muutused on statistiliselt olulised $p < 0,05$ tasemel. Aasta keskmine õhutemperatuur on tõusnud vaatlusjaamade viisi arvestades 2,0–2,4 kraadi võrra. Üksikutest kuudest on selget soojenemist täheldatud kevadkuudel (märts, aprill, mai) ning juulis, augustis ja septembris. Jaanuar ja veebruar on samuti märksa soojemaks läinud, kuid suure ajalise muutlikkuse tõttu pole nende kuude temperatuuri trend statistiliselt usaldusväärne. Talve soojenemise otseseks tagajärjeks on lumikatte kestuse oluline lühenemine enam kui kolme nädala võrra. Õhutemperatuuri režiiminihe 1988/89. aastal kattub nihetega nii tuule- (Elken et al., 2014, Keevalik ja Soomere 2008, 2014) kui ka atmosfääri üldise tsirkulatsiooni parameetrites (Sepp, 2012). See viitab võimalusele, et vähemalt osaliselt on talvise õhutemperatuuri tõusu muutused põhjustatud õhu üldise ringluse muutustega ning peamiselt tsonaalse tsirkulatsiooni tugevnemisega

Sademetes trendid pole olnud nii kindlasuunalised ja selged kui õhutemperatuuril. Üldiselt on aastane sademete hulk siiski suurenenud, kuid seda peamiselt külma poolaasta (novembrist märtsini) arvel. Osa sellest kasvust on tingitud märgumisparandi lisamisest mõõtmistulemustele alates 1966. aastast. Soojal perioodil on sademete olulist suurenemist täheldatud juunis, samas kui septembrile, aprillile ja juulile on olnud iseloomulik mõningane sademete vähenemine.

Kõige selgem režiiminihe esineski õhutemperatuuril ja lumikatte kestusel 1980ndate lõpus, kui hüppeliselt tõusis jaanuari, veebruari, talve ja aasta keskmine temperatuur ja vähenes lumikatte kestus. Mõnes jaamas langes veebruari temperatuur tagasi enamvähem endisele tasemele alates 2005. aastast. Juuli ja suve keskmise temperatuuri hüpe toimus alates 2001. aastast, augusti oma alates 2002., septembri oma 2004. ja sügise keskmisel temperatuuril alates 2005. aastast.

Tartus mõõdetud päikesepaiste kestuse ja õhurõhu aegridades ei tuvastatud statistiliselt oluliste trendide ja režiiminihete olemasolu.

Kirjandus

- BACC, 2008. Assessment of climate change for the Baltic Sea basin. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 473 pp.
- BACC, 2015. Second assessment of climate change for the Baltic Sea basin. Springer, Cham Heidelberg New York Dordrecht London, 501 pp.
- Biggs, R., Carpenter, S. R., Brock, W.A., 2009. Turning back from the brink: Detecting an impending regime shift in time to avert it. – Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 106, 826–831.
- Elken, J., Raudsepp, U., Laanemets, J., Passenko, J., Maljutenko, I., Pärn, O., Keevallik, S., 2014. Increased frequency of wintertime stratification collapse events in the Gulf of Finland since the 1990s. – Journal of Marine Systems, 129, 47–55.
- Jaagus, J., 1992. Periodicity of precipitation in Estonia. Estonia. – T. Kaare et al (Eds.). Man and Nature. Estonian Geographical Society, Tallinn, 43–53.
- Jaagus, J., 1996. Climatic trends in Estonia during the period of instrumental observations and climate change scenarios. – Estonia in the system of the global climate change. Institute of Ecology. Publication, 4, 35–48.
- Jaagus, J., 1998. Climatic fluctuations and trends in Estonia in the 20th century and possible climate change scenarios. – T. Kallaste, P. Kuldna (Eds.). Climate change studies in Estonia. Tallinn, Stockholm Environment Institute Tallinn Centre, 7–12.
- Jaagus, J., 2003. Kliimamuutuse tendentsid Eestis 20. sajandi teisel poolel seostatuna muutustega atmosfääri tsirkulatsioonis. – Publicationes Instituti Geographici Universitatis Tartuensis, 93, 62–78.
- Jaagus, J., 2006a. Climatic changes in Estonia during the second half of the 20th century in relationship with changes in large-scale atmospheric circulation. – Theoretical and Applied Climatology, 83, 77–88.
- Jaagus, J., 2006. Trends in sea ice conditions on the Baltic Sea near the Estonian coast during the period 1949/50–2003/04 and their relationships to large-scale atmospheric circulation. – Boreal Environment Research, 11, 169–183.
- Keevallik, S., 2003a. Changes in spring weather conditions and atmospheric circulation in Estonia (1955–95). – International Journal of Climatology, 23, 263–270.
- Keevallik, S., 2003b. Trendid meteoroloogilistes parameetrites ja nende seos õhuvooludega vabas atmosfääris. – Publicationes Instituti Geographici Universitatis Tartuensis, 93, 53–61.
- Keevallik, S., 2011. Shifts in meteorological regime of the late winter and early spring in Estonia during recent decades. – Theoretical and Applied Climatology, 105, 209–215.
- Keevallik, S., Russak, V., 2001. Changes in the amount of low clouds in Estonia (1955–1998). – International Journal of Climatology, 21, 389–397.
- Keevallik, S., Soomere, T., 2008. Shifts in early spring wind regime in North-East Europe (1955–2007). – Climate of the Past, 4, 147–152.
- Keevallik, S., Soomere, T., 2014. Regime shifts in the surface-level average air flow over the Gulf of Finland during 1981–2010. – Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, 63, 428–437.
- Kont, A., Jaagus, J., Orviku, K., Palginõmm, V., Ratas, U., Rivis, R., Suursaar, Ü., Tõnisson, H., 2011. Natural development and human activities on Saaremaa Island (Estonia) in the context of climate change and integrated coastal zone management. Schernewski, G., Hofstede, J., Neumann, T. (Eds.). Global change and Baltic coastal zones. Springer, 117–134.
- Kärner, O., 1996. Global temperature deviations as a random walk. – Journal of Climate, 9, 656–658.
- Kärner, O., 2009. ARIMA representation for daily solar irradiance and surface air temperature time series. – Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 71, 841–847.

- Kärner, O., 2012. Tartu õhutemperatuuri tolerantants ja kliima muutlikkus. – *Publicationes Instituti Geographici Universitatis Tartuensis*, 109, 58–75.
- Kärner, O., 2015. *Towards a new climate representation*. University of Tartu Press, Tartu 205 pp.
- Overland, J. E., Rodionov, S., Minobe, S., Bond, N., 2008. North Pacific regime shifts: Definitions, issue and recent transitions. – *Progress in Oceanography*, 77, 92–102.
- Russak, V., 2009. Changes in solar radiation and their influence on temperature trend in Estonia (1955–2007). – *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 114, DOI:2008JD010613
- Russak, V., Kallis, A., 2003. *Eesti kiirguskliima teatmik*. Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituut, Tallinn, 384 lk.
- Rutgersson, A., Jaagus, J., Schenk, F., Stendel, M., 2014. Observed changes and variability of atmospheric parameters in the Baltic Sea region during the last 200 years. – *Climate Research*, 61, 177–190.
- Sepp, M., 2012. Režiimihkeest Läänemere regiooni atmosfääri tsirkulatsioonis. – *Publicationes Instituti Geographici Universitatis Tartuensis*, 109, 72–89.
- Swanson, K. L., Tsonis, A. A., 2009. Has the climate recently shifted? – *Geophys. Res. Lett.*, 36, L06711. <http://dx.doi.org/10.1029/2008GL037022>.
- Tooming, H., Kadaja, J., 2006. *Eesti lumikatte teatmik*. Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituut, Eesti Maaviljeluse Instituut. Tallinn–Saku, 503 lk.

Trends and regime shifts in the Estonian climate

Jaak Jaagus and Mait Sepp

Department of Geography, University of Tartu

Summary

Climatic conditions in Estonia have significantly changed during the period 1951–2015. It is reflected by trend and regime shifts in climate variables. The main change has been a warming during the cold half-year. Winter mean air temperature has increased by 2–3 K according to the linear trend that corresponds to the regime shift of the same magnitude since the winter 1988/89. Warming in spring has been even higher – by more than three degrees. Mean temperature in summer and autumn has increased less, by 1–2 degrees but these changes are statistically significant on $p < 0.05$ level. Annual mean temperature has increased by 2.0–2.4 K. From single months, a clear warming can be observed during the spring months (March, April and May), and in July, August and September. January and February have been become warmer but due to the very high temporal variability these trends are not significant. As a direct consequence of the warming in winter, snow cover duration has decreased by more than three weeks.

Trends in precipitation are not so clearly expressed as in the case of temperature. Generally, annual precipitation has increased in Estonia but mostly during the cold half-year from November to March. It is partly caused by adding the wetting correction to every measured amount of precipitation since 1966. During the warm period, an increase in precipitation has been observed only in June while a decrease has been measured in September, April and July.

The most clear regime shift was detected for air temperature and snow cover duration since the end of the 1980s when January, February, winter and annual mean temperature sharply increased and snow cover duration decreased. At some stations, the February temperature has dropped back to the previous level since 2005. The regime shift in summer and in July temperature was observed since 2001, in August since 2002, in September since 2004 and in autumn since 2005. No statistically significant trends and regime shifts were found for sunshine duration and sea-level pressure in Tartu.

Atmosfääri aerosooli otsene kiirguslik mõju meteoroloogilistele tingimustele Euroopas

Velle Toll

Tartu Ülikooli füüsika instituut, Keskkonnaagentuur

1. Sissejuhatus

Atmosfääri aerosooli otsene kiirguslik mõju tuleneb aerosooli võimest neelata ja hajutada päikese- ja soojuskiirgust. Aerosooli otsest kiirguslikku mõju on laialdaselt uuritud nii mõõtmistele tuginedes kui ka mudelite abil (nt. Myhre jt., 2012; Jacobson, 2001; Yoon jt., 2005; García jt., 2011). Aerosoolil on ka kaudne kiirguslik mõju, kuna aerosoolid mõjutavad pilvede albeedot (Twomey, 1977) ja püsivust (Albrecht, 1989), sest aerosooliosakesed on kondensatsioonituumadeks pilvepiiskade tekkel. Aerosoolide kaudset mõju antud töös arvesse võetud ei ole. Aerosooli sisaldus atmosfääris on geograafiliselt väga varieeruv tingituna allikate ebahühtlasest ruumilisest paiknemisest ja aerosooliosakeste suhteliselt lühikesest elueast atmosfääris (Haywood ja Boucher, 2000). Antud töös on aerosooli mõju uuritud Euroopa kohal, kus keskmine aerosooli kontsentratsioon on madalam kui näiteks Aasia ida ja lõuna osas ning Sahara kõrbe kohal, ja kus ka keskmine aerosooli kiirguslik mõju on seetõttu nõrgem (Myhre et al., 2012).

Üldlevinud tava on numbrilisel ilmaennustusel arvestada otsest kiirguslikku mõju keskmise klimatoloogilise aerosooli sisalduse jaoks, aga teatud situatsioonides võib täpse aerosooli mõju mitteametamine kahandada ilmaprognoosi täpsust (Milton jt., 2008). Grell ja Baklanov (2011) soovivad õhukvaliteeti ja meteoroloogilisi tingimusi prognoosida samaaegselt meteoroloogia-aerosoolide ühendatud mudeliga, et parandada nii õhukvaliteedi kui ka meteoroloogilist prognoosi. Samas tuleb operatiivsel numbrilisel ilmaprognoosil hinnata, kas mudelprognoosi täpsuse paranemine kaalub üles prognostiliste aerosoolide kaasamisest tingitud arvutusmahu suurenemise. Mulcahy jt. (2014) ja Morcrette jt. (2011) kirjeldavad prognostiliste aerosoolide meteoroloogilise mõju arvestamisega saavutatud täpsemat kiirgusbilansi ja aluspinnalähedaste ilmingimuste prognoosi.

Käesolevas artiklis käsitletakse aerosooli otsest kiirguslikku mõju atmosfääritingimustele lühikeses, mõne päeva pikkuses perioodis, mis on iseloomulik piiratud ala numbrilisele ilmaennustusele. Eesmärk on uurida, kas ja kuidas on võimalik parandada numbrilise ilmaprognoosi täpsust Euroopas, kui arvestada võimalikult täpselt atmosfääri aerosooli kiirguslikku mõju. Töö sisaldab üldistusi ja kokkuvõtlikke tulemusi autori varasematest töödest, kus on uuritud HARMONIE (inglise k. *Hirnam Aladin Research for Mesoscale Operational NWP in Euromed*) ilmaennustusmudeliga (Seity jt., 2011) arvutatud prognooside täpsuse sõltuvust aerosooli mõju arvestamise metoodikast Euroopa regiooni jaoks. Toll jt. (2016) käsitlesid aerosooli mõju meteoroloogilistele tingimustele keskmisele lähedase aerosooli kontsentratsiooniga olukorras Euroopa kohal. Toll jt. (2015a) uurisid aerosooli kiirguslikku mõju kõrge aerosooli sisaldusega perioodil 2010. aasta Venemaa metsapõlengute ajal. Lisaks uurisid Toll ja Männik (2015) aerosooli kiirguslikku mõju konvektiivsele tormile.

2. Metoodika

2.1 Atmosfäärimudel HARMONIE

HARMONIE atmosfäärimudelit (Seity jt., 2011) kasutatakse paljudes Euroopa riikides nii operatiivseks ilmaennustuseks kui ka atmosfääri uuringuteks. HARMONIE mudel kombineerib mittehüdrostaatilist dünaamilist tuuma (Bénard jt., 2010) AROME (Seity jt., 2011) või ALARO (Gerard jt., 2009) füüsikaliste parametriseringutega. Aluspinna protsessid on parametriseeritud SURFEX aluspinna mudeli (Masson jt., 2013) abil. Vaikimisi on horisontaalne võrgusamm sügavat konvektsiooni ilmutatud kujul lahendavas mudelikonfiguratsioonis 2,5 km.

Kiirguslevi arvutatakse eraldi lühilainelise kiirgusskeemi (Fouquart ja Bonnel, 1980) ja pikalainelise kiirgusskeemi abil (Mlawer jt., 1997). HARMONIE kiirguslevi parametriseringud pärinevad Euroopa Keskulatusega Ilmaprognooside Keskuse globaal-mudelist ja detailsem kiirgusarvutuste kirjeldus on leitav mudeli dokumentatsioonist (White, 2004). Päikesekiirguse jaoks arvestatakse neeldumist ja hajumist, pikalainelise kiirguse jaoks neeldumist ja emissiooni. Lühilainelisele kiirgusele on aerosooli mõju tunduvalt suurem, aga arvestatud on ka mõju pikalainelisele kiirgusele. Erinevat tüüpi aerosoolide optilised omadused on parametriseeritud Hess jt. (1998) järgi.

2.2 Aerosooliandmed

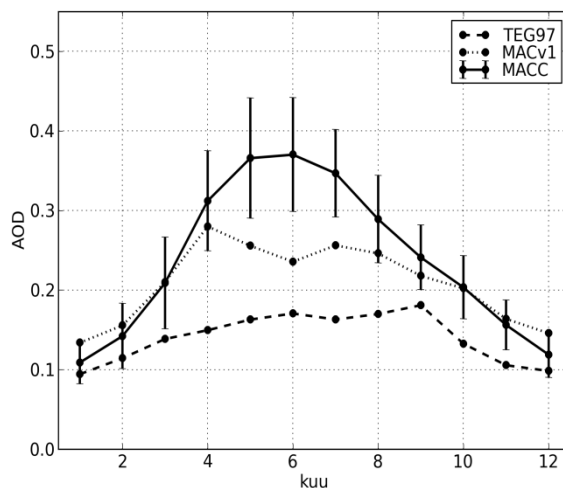
Antud töös on HARMONIE mudelis kasutatud erinevaid klimatoloogilisi keskmisi ja ajas varieeruvaid andmeid aerosooli kiirgusliku mõju arvutamiseks. Vaikimisi kasutatakse HARMONIE mudelis suhteliselt jämeda horisontaalse lahutusega ($4^\circ \times 5^\circ$) aerosooli klimatoloogiat (TEG97) (Tegen jt., 1997), mis põhineb erinevatel aerosoolimudelitel. Seda metoodikat on võrreldud Max Planck Instituudi uuema aerosooli mudeliga (MACv1) (Kinne jt., 2013), mis on horisontaalse lahutusega $1^\circ \times 1^\circ$. See metoodika põhineb globaalsetel aerosoolileviku mudelitel koos AERONET'i (inglise k. Aerosol Robotic Network) andmetega.

Kolmandaks on kasutatud ajas varieeruvat realistlikku aerosoolijaotust MACC (inglise k. Monitoring Atmospheric Composition and Climate) järelanalüüsist (Inness jt., 2013). Järelanalüüs põhineb Euroopa Keskulatusega Ilmaprognooside Keskuse atmosfäärimudelil, kombineerituna aerosooli leviku mudeliga. Lisaks on selles süsteemis assimileeritud MODIS'e (inglise k. Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) aerosooli optiline paksus (AOD). Andmete horisontaalne lahusus on ligikaudu 80 km. MACC projekti raames koostatakse ka vaadeldavale perioodile iseloomulikke aerosooli jaotuse prognoose (Eskes jt., 2015), mida on operatiivses ilmaprognoosis võimalik aerosooli kiirgusliku mõju arvestamisel aluseks võtta.

3. Tulemused

Aerosooli otsene kiirguslik mõju meteoroloogilistele tingimustele on suuresti määratud AOD jaotusega. Joonisel 1 on toodud Euroopa kuukeskmised AOD väärtused 550 nm juures erinevate aerosooliandmete põhjal. Kõik andmed näitavad AOD aastast käiku madalaimate väärtustega talvekuudel ja kõrgeimatega suvekuudel, sh on MACC järelanalüüsi AOD väärtused suurimad ning TEG97 klimatoloogias väikseimad. MACC järelanalüüsis ületab Euroopa keskmine AOD 550 nm juures suvekuudel väärtust 0,35.

Üldjoontes on AOD ruumiline jaotus Euroopas erinevate andmete põhjal sarnane: AOD kasvab lõuna või kagu suunas. Vaikimisi kasutatavas TEG97 klimatoloogias on AOD Atlandi ookeani kohal oluliselt madalam, kui teiste andmete põhjal. Kuna vaikimisi kasutatav TEG97 klimatoloogia alahindab AOD väärtusi Euroopa kohal, on selle kasutamisel ka aerosooli kiirguslik mõju Euroopa kohal alahinnatud. MACC järelanalüüsi andmete põhjal on näha, et AOD jaotuses Euroopa kohal on oluline varieeruvus, mida klimatoloogilise keskmise aerosooli mõju arvestamisel ilmaprognosis eiratakse.



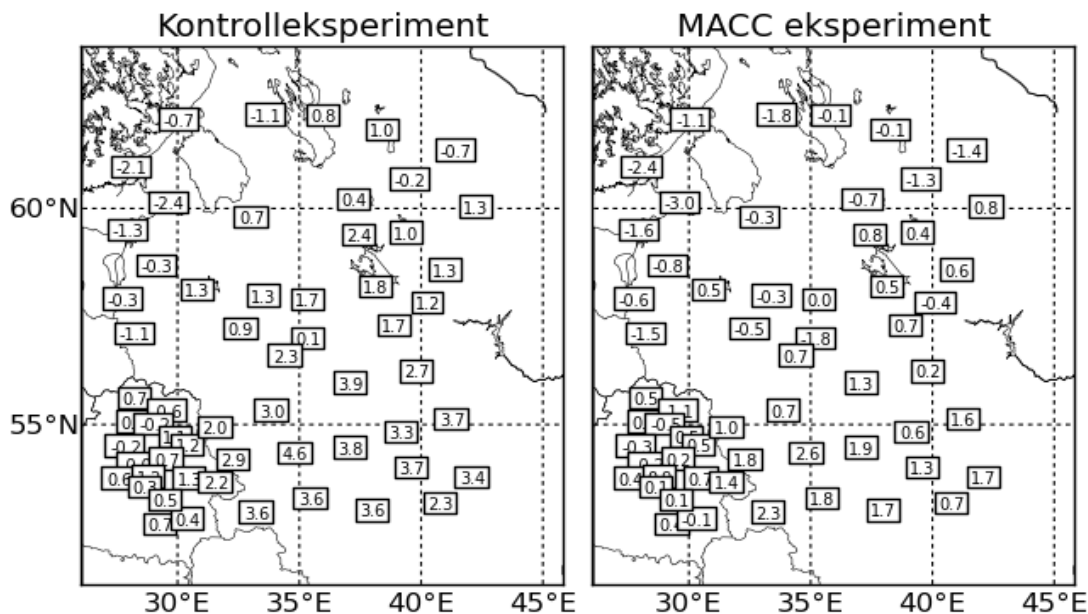
Joonis 1. Euroopa kuukeskmine AOD 550 nm juures. MACC järelanalüüsi puhul on toodud ka AOD standardhälve (Toll jt., 2016).

Figure 1. Monthly averages of AOD at 550 nm in Europe. Standard deviation of AOD is given for MACC reanalysis (Toll jt., 2016).

Toll jt. (2016) leidsid, et keskmiselähedase aerosoolijaotusega tingimustes leiavad aerosooli mõjust tingituna Euroopa kohal aset olulised muutused nii aluspinna energia-bilansis kui ka päikesekiirguse neelamises aerosooli poolt. Euroopas on keskmine temperatuuritõus aerosooli sisaldavas aluspinnalähedases atmosfäärikihis 0,15 °C kuni 0,25 °C. Samal ajal leiab aluspinnal aset jahtumine, sest aluspinnale jõudva päikesekiirguse hulk on aerosooli kiirgusliku mõju tõttu kuni 10 % väiksem. Need aerosooli mõju iseloomustavad arväärtused on iseloomulikud Euroopa jaoks, aga mõnes teises piirkonnas, kus on teistsugune aerosoolide jaotus, oleks see mõju ka teistsugune. Aerosooli kiirgusliku mõju arvestamine keskmiselähedastes tingimustes võimaldab täpsemini prognoosida aluspinnale jõudva päikesekiirguse hulka ja õhutemperatuuri ning niiskuse jaotust alumises troposfääris.

Toll jt. (2015a) modelleerisid HARMONIE mudeliga aerosooli mõju 2010. aasta Venemaa metsatulekahjude perioodil, mil aerosooli sisaldus atmosfääris oli ekstreemselt kõrge (maksimaalne AOD 550 nm juures oli rohkem kui 4). Intensiivsete tulekahjude perioodil kahanes ööpäeva keskmine aluspinnal neeldunud päikesekiirguse hulk rohkem kui 100 W/m² ja 2 m temperatuur rohkem kui 3 °C. Antud olukorra jaoks paranes märgatavalt aluspinnale jõudva päikesekiirguse hulga, aluspinnalähedase temperatuuri ja

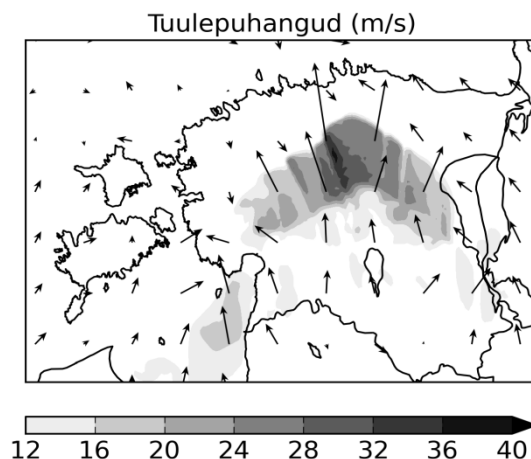
vertikaalse temperatuuriprofiili prognoosi täpsus, kui prognoosis arvestati aerosooli mõju. Joonisel 2 on näha, et suhteliselt laialdasel tulekahjude poolt mõjutatud alal on temperatuuriprognosis aerosooli mõju arvestades oluliselt täpsem kui ilma selleta. See tähendab, et MACC eksperimendis, kus metsapõlengute suitsu kiirguslik mõju on arvesse võetud, on prognoositud temperatuuri kooskõla mõõtmistega parem.



Joonis 2. Prognoositud temperatuuri keskmine hälve (°C) 2 m temperatuuri mõõtmistest intensiivsel tulekahjude perioodil 6.–11. augustil 2010. a. (Toll jt., 2015a) Euroopa idaosas, mis oli põlengute suitsu tugeva mõju all. Meteoroloogiline prognoos on sellel alal aerosooli mõju arvestades oluliselt täpsem.

Figure 2. Mean bias in the simulated 2 m temperature (°C) compared to measurements during the intense wildfire period on August 6 to 11, 2010 (Toll et al., 2015a) in the eastern Europe strongly influenced by the smoke. The accuracy of the meteorological forecast is significantly improved in this area when accounting for the direct radiative effect of aerosols.

2010. aasta Venemaa metsatulekahjude perioodil, täpsemalt 8. augustil, liikus üle Baltimaade ja Soome tugevaid purustusi põhjustanud konvektiivne torm. Toll jt. (2015b) näitasid, et HARMONIE mudel oleks olnud võimeline seda tormi prognoosima ja tulevikus on HARMONIE mudeli kasutamisel taolised äikesetormid Eestis paremini ennustatavad. Joonisel 3 on toodud HARMONIE poolt prognoositud tugevad tuulepuhangud kiirusega kuni 35 m/s ja rohkem. Toll ja Männik (2015) uurisid tulekahjude suitsu kiirguslikku mõju antud tormile. Suitsu mõjul oli konvektiivne torm nõrgem, kuna muutus temperatuuri vertikaalses profiilis põhjustas konvektiivse potentsiaalse energia hulga vähenemise.



Joonis 3. Modelleeritud tuulepuhangud (m/s) Eesti kohal 08.08.2010 kell 18 UTC, mis olid põhjustatud tugeva konvektiivse tormi poolt.

Figure 3. Simulated wind gusts (m/s) over Estonia at 18 UTC 08.08.2010 associated with a severe convective storm.

4. Kokkuvõte ja järeldused

Numbrilise ilmaprognoosi täpsust on võimalik parandada, kui aerosooli kiiruslikku mõju meteoroloogilises prognoosis võimalikult täpselt arvesse võtta. Keskmine aerosooli mõju atmosfääritingimustele on määratud keskmise aerosooli jaotusega atmosfääris, mis on regiooniti erinev. Euroopa kohal on aerosooli optilisel paksusel selge aastane käik, kusjuures aerosooli optiline paksus on kõrgeim suvekuudel ja madalaim talvekuudel. MACC järelanalüüsi aerosooliandmete põhjal ületab Euroopa keskmine AOD 550 nm juures suvel väärtust 0,35. Atmosfääri aerosool mõjutab Euroopa kohal tugevasti aluspinnale jõudva päikesekiirguse hulka, aluspinnalähedasi turbulentsid energiavooge ning temperatuuri ja niiskuse jaotust alumises troposfääris. Atmosfääri aerosoolil võib olla teatud situatsioonides ka oluline mõju konveksioonile Euroopa kohal.

Eriti oluline meteoroloogiline mõju on aerosoolidel ekstreemselt kõrgete kontsentratsioonide puhul, nagu seda oli 2010. aasta augustis Venemaa metsapõlengute ajal. Taolistes olukordades on aerosooli mõju arvestamine ilmaprognoosi täpsuse tagamiseks eriti oluline. Keskmiselähedase aerosoolijaotuse puhul on piisav keskmise klimatoloogilise aerosooli mõju arvestamine ilmaprognoosis. Mõnes teises geograafilises piirkonnas, kus aerosooli keskmine kontsentratsioon ja selle varieeruvus on suurem kui Euroopas, on tõenäoliselt ka keskmiselähedase aerosooli sisalduse korral selle mõju arvestamine numbrilises ilmaprognoosis olulisem kui Euroopas.

Numbrilistes ilmaennustusmudelites tuleks aerosooli mõju arvesse võtmise meetodikat prognoosi kvaliteedi tõstmiseks edasi arendada. Antud töös käsitleti atmosfääri aerosooli otsest kiiruslikku mõju, aga tulevikus tuleks prognoosmudelites arvestada ka kaudset mõju.

Kirjandus

- Albrecht, B.A., 1989. Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness. *Science*, 245(4923), 1227–1230.
- Bénard, P., Vivoda, J., Mašek, J., Smolíková, P., Yessad, K., Smith, C., Brožková, R. and Geleyn, J.F., 2010. Dynamical kernel of the Aladin–NH spectral limited-area model: Revised formulation and sensitivity experiments. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 136(646), 155–169.
- Eskes, H., Huijnen, V., Arola, A., Benedictow, A., Blechschmidt, A.M., Botek, E., Boucher, O., Bouarar, I., Chabrillat, S., Cuevas, E. and Engelen, R., 2015. Validation of reactive gases and aerosols in the MACC global analysis and forecast system. *Geoscientific model development*, 8(11), 3523–3543.
- Fouquart, Y. and Bonnel, B., 1980. Computations of solar heating of the earth's atmosphere- A new parameterization. *Beitraege zur Physik der Atmosphaere*, 53, 35–62.
- García, O.E., Díaz, J.P., Expósito, F.J., Díaz, A.M., Dubovik, O., Derimian, Y., Dubuisson, P. and Roger, J.C., 2011. Shortwave radiative forcing and efficiency of key aerosol types using AERONET data. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 11(12), 32647–32684.
- Gerard, L., Piriou, J.M., Brožková, R., Geleyn, J.F. and Banciu, D., 2009. Cloud and precipitation parameterization in a meso-gamma-scale operational weather prediction model. *Monthly Weather Review*, 137(11), 3960–3977.
- Grell, G. and Baklanov, A., 2011. Integrated modeling for forecasting weather and air quality: A call for fully coupled approaches. *Atmospheric Environment*, 45(38), 6845–6851.
- Haywood, J. and Boucher, O., 2000. Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: A review. *Reviews of geophysics*, 38(4), 513–543.
- Hess, M., Koepke, P. and Schult, I., 1998. Optical properties of aerosols and clouds: The software package OPAC. *Bulletin of the American meteorological society*, 79(5), 831–844.
- Inness, A., Baier, F., Benedetti, A., Bouarar, I., Chabrillat, S., Clark, H., Clerbaux, C., Coheur, P., Engelen, R.J., Errera, Q. and Flemming, J., 2013. The MACC reanalysis: an 8 yr data set of atmospheric composition. *Atmospheric chemistry and physics*, 13(8), 4073–4109.
- Jacobson, M.Z., 2001. Global direct radiative forcing due to multicomponent anthropogenic and natural aerosols. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D2), 1551–1568.
- Kinne, S., O'Donnel, D., Stier, P., Kloster, S., Zhang, K., Schmidt, H., Rast, S., Giorgetta, M., Eck, T.F. and Stevens, B., 2013. MAC-v1: A new global aerosol climatology for climate studies. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 5(4), 704–740.
- Masson, V., Le Moigne, P., Martin, E., Faroux, S., Alias, A., Alkama, R., Belamari, S., Barbu, A., Boone, A., Bouyssel, F. and Brousseau, P., 2013. The SURFEXv7. 2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of Earth surface variables and fluxes. *Geoscientific Model Development*, 6, 929–960.
- Milton, S.F., Greed, G., Brooks, M.E., Haywood, J., Johnson, B., Allan, R.P., Slingo, A. and Grey, W.M.F., 2008. Modeled and observed atmospheric radiation balance during the West African dry season: Role of mineral dust, biomass burning aerosol, and surface albedo. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D23).
- Mlawer, E.J., Taubman, S.J., Brown, P.D., Iacono, M.J. and Clough, S.A., 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D14), 16663–16682.
- Morcrette, J.J., Benedetti, A., Ghelli, A., Kaiser, J.W. and Tompkins, A.M., 2011. Aerosol-cloud-radiation interactions and their impact on ECMWF/MACC forecasts. *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*.
- Mulcahy, J.P., Walters, D.N., Bellouin, N. and Milton, S.F., 2014. Impacts of increasing the aerosol complexity in the Met Office global numerical weather prediction model. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 4749–4778.

- Myhre, G., Samset, B.H., Schulz, M., Balkanski, Y., Bauer, S., Bernsten, T.K., Bian, H., Bellouin, N., Chin, M., Diehl, T. and Easter, R.C., 2012. Radiative forcing of the direct aerosol effect from AeroCom Phase II simulations. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 12(8), 22355–22413.
- Seity, Y., Brousseau, P., Malardel, S., Hello, G., Bénard, P., Bouttier, F., Lac, C. and Masson, V., 2011. The AROME-France convective-scale operational model. *Monthly Weather Review*, 139(3), 976–991.
- Tegen, I., Hollrig, P., Chin, M., Fung, I., Jacob, D. and Penner, J., 1997. Contribution of different aerosol species to the global aerosol extinction optical thickness: Estimates from model results. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D20), 23895–23915.
- Toll, V., Reis, K., Ots, R., Kaasik, M., Männik, A., Prank, M. and Sofiev, M., 2015a. SILAM and MACC reanalysis aerosol data used for simulating the aerosol direct radiative effect with the NWP model HARMONIE for summer 2010 wildfire case in Russia. *Atmospheric Environment*, 121, 75–85.
- Toll, V., Männik, A., Luhamaa, A. and Rõõm, R., 2015b. Hindcast experiments of the derecho in Estonia on 08 August, 2010: Modelling derecho with NWP model HARMONIE. *Atmospheric Research*, 158, 179–191.
- Toll, V. and Männik, A., 2015. The direct radiative effect of wildfire smoke on a severe thunderstorm event in the Baltic Sea region. *Atmospheric Research*, 155, 87–101.
- Toll, V., Gleeson, E., Nielsen, K.P., Männik, A., Masek, J., Rontu, L. and Post, P., 2016. Impacts of the direct radiative effect of aerosols in numerical weather prediction over Europe using the ALADIN-HIRLAM NWP system. *Atmospheric Research*.
- Twomey, S., 1977. The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds. *Journal of the atmospheric sciences*, 34(7), 1149–1152.
- White, P.W., 2004. IFS documentation (CY23R4), part IV: Physical processes.
- Yoon, S.C., Won, J.G., Omar, A.H., Kim, S.W. and Sohn, B.J., 2005. Estimation of the radiative forcing by key aerosol types in worldwide locations using a column model and AERONET data. *Atmospheric Environment*, 39(35), 6620–6630.

Direct radiative impacts of atmospheric aerosols on meteorological conditions over Europe

Velle Toll

Institute of Physics, University of Tartu; Estonian Environment Agency

Summary

Impacts of the direct radiative effect of aerosols over Europe were studied using the HARMONIE numerical weather prediction model. The HARMONIE model is used for operational numerical weather prediction and atmospheric research in many European countries. Direct radiative effect of aerosols was studied during a situation with near average distribution of aerosols over Europe and during a situation with very high aerosol concentrations present in the atmosphere during wildfires in Russia in summer 2010. In addition, the influence of the direct radiative effect of aerosols on a severe convective storm over Europe was simulated.

The average influence of aerosols on the meteorological conditions is determined by the average distribution of aerosols, which is different in different geographical regions. There is a clear annual cycle in aerosol optical depth over Europe with a higher AOD in summer months and a lower AOD in winter months. During the situation with a near average distribution of aerosols over Europe there is a considerable change in the surface energy budget and in the vertical

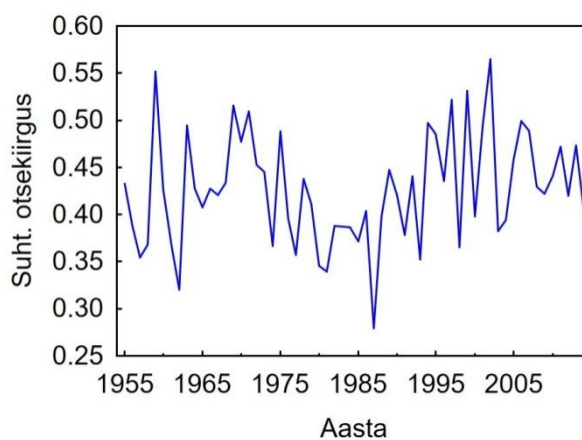
temperature profile due to the influence of aerosols. Near surface meteorological conditions were significantly affected by aerosols during wildfires in Russia in summer 2010, and the weather forecast for this period was much improved by incorporating the effects of aerosols in the atmospheric model. The severe convective storm that occurred during the intense wildfire period was weakened through the direct radiative effect of aerosols. The capability of atmospheric models to account for the direct radiative effect of aerosols should be further developed in order to improve the meteorological simulations.

Kuue keskpäevase tunni panus integraalse ja ultraviolettkiirguse päevaenergiasse Tõraveres aprillist augustini

Kalju Eerme, Margit Aun ja Uno Veismann
Tartu Observatoorium

1. Sissejuhatus

Päikesekiirgus varustab taimestikku fotosünteesiks vajaliku energiaga ja selle toel valmivad ka kultuurtaimede saagid. Kiiritustihedus ja selle spektraalne koostis maapinnal sõltuvad sellest, kui kõrgele horisondi kohale kerkib Päike ja kui hästi kiirgus pääseb maapinnani. Päikese näiva liikumise taevasfääril kujundavad nn. geo-orbitaalsed regulaarsed protsessid: Maa tiirlemine ümber Päikese ja pöörlemine ümber telje. Kiirguse läbipääsu atmosfäärist reguleerivad meteoroloogilised ehk keskkonnategurid: pilved, osoonikihi paksus ja aerosool. Ajavahemikku mai algusest augusti lõpuni peetakse Eestis ja lähieümbruses elusorganismide, sealhulgas inimeste, päikesekiirguse suhtes aktiivseks perioodiks. Keskpäevase kuue tunni jooksul (Eestis suveajas orienteeruvalt kell 10–16) on kiirguse energiaga varustus oluliselt suurem kui hommiku- ja õhtutundidel ning mõjutab elusloodust rohkem (Moan jt., 2013) ning nende tundide panust on otstarbekas eraldi uurida. Meteoroloogiliste tegurite aastast aastasse muutused põhjustavad suvises päikesekiirgusega varustatuses ka joonisel 1 illustreeritud 30–40 aastane perioodilisuse (Eerme jt., 2010; Eerme, 2012). Päikesekiirgusega varustatuse heaks iseloomustajaks on suhteline otsekiirguse energia. See on saanud tegelik energia jagatud normaaltingimustel selge ilma omaga.



Joonis 1. Tõraveres aastatel 1955–2014 maist augustini mõõdetud integraalse otsekiirguse energia jagatuna normaaltingimustel selge ilma väärtusega.

Figure 1. Integral direct irradiance for May to August as a ratio to that in clear sky conditions at Tõraveres for years 1955–2014.

Päikese UV-kiirguse arvukad mõjud elusloodusele ja tehismaterjalidele (Jansen jt., 1998; Kakani jt., 2003; Caldwell jt., 2007; Häder jt., 2007; Andradý jt., 2011; Byrne, 2014; Marionnet jt., 2015) sõltuvad energiatihedusest ja spektraalsest koostisest. Spektraalse koostise kõige lihtsamaks iseloomustajaks on UVA ja UVB spektri- piirkondade kiirguse võimsuse või energia (dooside) suhe UVA/UVB, mis iseloomustab saabuva kiirguse bioloogilist ohtlikkust. Teised autorid (Christiaens jt., 2005; Kollias jt., 2011; Moan jt. 2013) ja meie ise varem (Ansko jt., 2008) on kasutanud suhet UVA/UVB ja mitte UVB/UVA. Rahvusvahelise Valguskomisjoni (Commission CIE) poolt on juba 1930ndatel aastatel defineeritud mõlema piirkonna lainepikkuste vahemikud: UVB 280–315 nm ja UVA 315–400 nm (Parisi jt., 2004; Kollias jt., 2011). Hiljem on kasutusele võetud ka UV kiirguse spektraalse koostise standard (Christiaens jt., 2005; Marionnet jt., 2015). Teaduslikes tekstides kasutatakse paraku sageli ka kaheks piirkonnaks jaotamise varianti: UVB 280–320 nm ja UVA 320–400 nm. Seetõttu on otstarbekas suhet UVA/UVB potentsiaalsetele kasutajatele esitada kahes variandis. Käesoleva töö eesmärk on selgitada esiteks seda, mis piirides ja kuidas muutub keskpäevase kuue tunni panus päevases integraalses kiirguses ja kummaski UV kiirguse spektrivahemikus. Teiseks eesmärgiks on selgitada, kui suur on UVA/UVB suhe keskmiselt meie tavaliste ilmade korral ja kuidas ta muutub suvisel perioodil.

2. Aparatuur, andmed ja meetodid

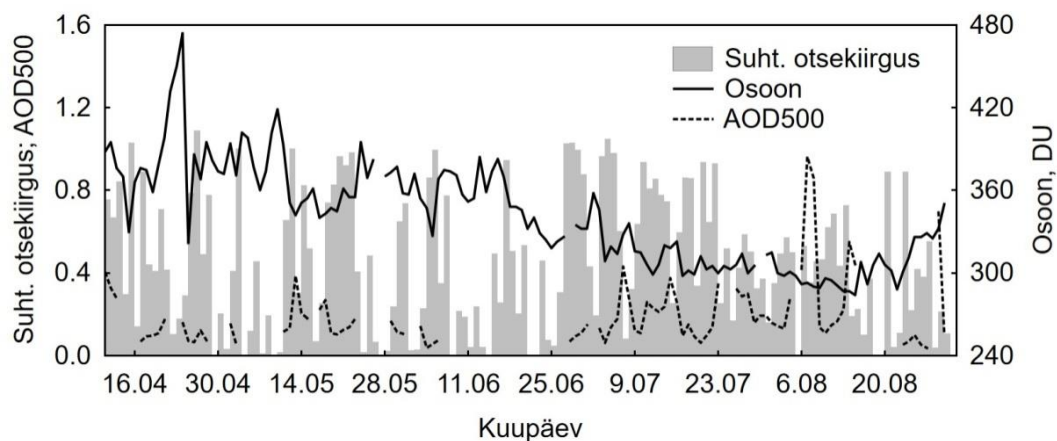
Käesolevas töös on vaadatud maapinnale jõudva integraalse ja UV kiirguse käitumist Tõraveres mitte täpselt nelja kalendrikuu (mai–august) vaid suvise pööripäeva (21. juuni) suhtes sümmeetrilise ajavahemiku 11. aprill – 31. august ulatuses. Selle jooksul muutub keskpäevane Päikese seniitnurk (SZA) Tõraveres (58°16'N, 26°28'E, 70 m ü.m.p) 50 kraadist perioodi alguses ja lõpus kuni 35 kraadini selle keskel ja ajaliselt moodustavad kuus keskpäevast tundi 33 % kuni 43 % klassikaliselt defineeritud päeva pikkusest. Kolm tundi enne ja pärast keskpäeva on Päike umbes 10 kraadi võrra madalamal kui keskpäeval.

Integraalse päikesekiirguse andmetena on kasutatud Tartu-Tõravere meteoroloogiajaamas registreeritud summaarse ja otsekiirguse nn. päevasummasid ja tunnisummasid, mis tähendavad terve päeva jooksul kogunenud kiirgusenergiat ja päeva kestel iga tunni jooksul kogunenud kiirgusenergiat. Tunnisummad on esitatud tõelises päikeseajas, milles keskpäev vastab Päikese ülemise kulminatsiooni momendile ja on selles ajas alati kell 12. Tartu-Tõravere meteoroloogiajaam on spetsialiseerunud päikesekiirguse mõõtmistele ja sealt on saadud ka enamuse UV spektrite analüüsiks vajalikust lisainformatsioonist. Peale SZA päevase käigu reguleerivad kiirgusvoogu pilvisus ja päikesepaiste korral ka atmosfääris leiduv aerosool. Bioloogiliselt mõjusas UVB kiirguses osutub päev lühemaks kui UVA ja integraalses kiirguses ning saabuv kiirgus sõltub lisaks nii stratosfääri kui troposfääri osoonist. Osooni koguhulga andmed on saadud satelliidimõõtmistest ja aerosooli optilise paksuse AOD500 kohta on kasutatud AERONET võrgu Tõraveres paikneva päikesefotomeetri abil saadud väärtusi. Eraldi tabelitena on ette valmistatud ka hõlpsasti kasutatav materjal palju suurema arvu näitajate kohta, mis aitavad spektritest saadud informatsiooni tõlgendada (Eerme jt., 2015).

Alates 2004. aastast toimub Tõraveres päikesetõusust loojanguni UV-kiirguse spektrite automaatne registreerimine lainepikkuste vahemikus 280–400 nm 15-minutilise ajalise intervalliga (Ansko jt., 2008). Definitsiooni kohaselt algab UVB spektripiirkond 280 nm-

st, kuid tegelikult kiirgust lainepikkustel alla 295 nm Tõraveres maapinnani ei jõua. Aastatel 2004 kuni 2009 kasutati Tõraveres UV kiirguse spektrite registreerimiseks firma Avantes kompaktsed spektromeetrit AvaSpec-256 ja 2009. aasta juunist Euroopa Liidu REGPOT projekti EstSpace vahenditest muretsesud Bentham Instruments Ltd. Topeltmonokromaatoril DMc150F-U põhinevat mõõtesüsteemi (Eerme jt., 2015). Mõõtmised toimusid spektraalse kiiritustiheduse võimsuse ühikutes $W/(m^2nm)$, millest on lihtne integreerida kiirgusenergia spektraaltihedust $J/(m^2nm)$ üle soovitud ajavahemike ja energiat ühikutes J/m^2 üle lainepikkuste intervallide. Ultraviolettkiirguse spektrite automaatne registreerimine toimub tootja firma tarkvara abil, mis kasutab kehtivat kellaega. Kogu uurimisaluse ajavahemiku vältel on selleks Ida-Euroopa suveaeg. Kui ajavõrrand oleks null, siis oleks keskpäev Tõraveres kell 13h 14m. Ajavõrrandi väärtuse muutumise tõttu muutub see vahemikus 13h 7m 30s kuni 13h 17m 40s, kuid kõigil juhtudel on kell 13h 15m registreeritud spekter tegelikule keskpäevale lähim. Spektritest energia integreerimisel loetakse väärtused 7,5 minuti jooksul kummalegi poole spektri registreerimise hetke võrdseks spektris registreeritud väärtusega. Bentham spektromeetri tundlikkust kontrollitakse regulaarselt spetsiaalse kalibraatoriga. Selle sisemiseks kiirgusallikaks on 150 W võimsusega kvarts-halogeenlamp, mille konstantne 6,3000 A toitevool saadakse spetsiaalselt toiteallikast Bentham 605. Kalibreeritud absoluutse kiiritustiheduse mõõtemääramatus lainepikkusel 300 nm ei ületa 2 %, lainepikkustel 307–370 nm 1,7 % ja lainepikkustel 375–390 nm 1,8 %. Kalibraatorit võrreldakse kalibreeritud FEL lambiga (Veismann jt., 1994), mis kokkuvõttes tagab mõõtemääramatuse 5 % lähedal. Töös on kasutatud aastatel 2010–2013 registreeritud spektreid.

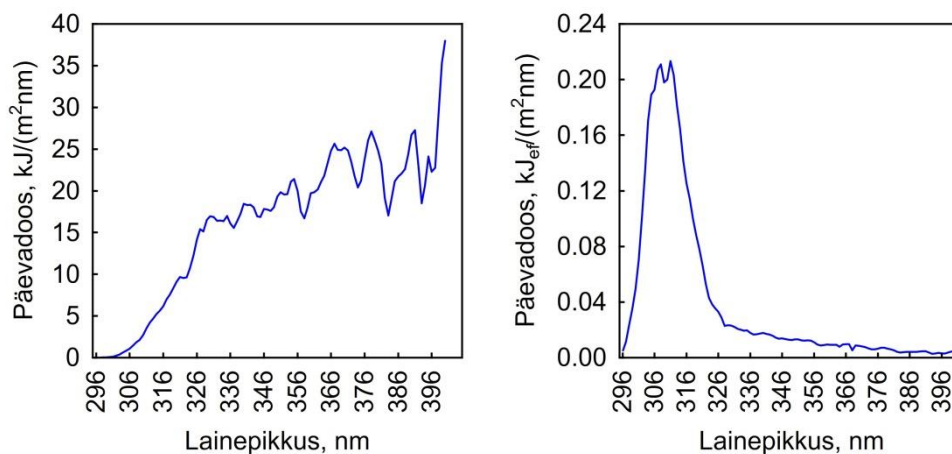
Joonisel 2 on ilmastikutingimuste muutlikkuse illustatsiooniks esitatud päevase suhtelise integraalse otsekiirguse (normaaltingimustel selge ilma väärtuse suhtes) kui pilvisuse mõju iseloomustaja, atmosfääri osooni koguhulga ja aerosooli optilise paksuse AOD500 (lainepikkusel 500 nm) ajalise muutumise käigud 11. aprillist 31. augustini 2010.



Joonis 2. Päevase suhtelise integraalse otsekiirguse, atmosfääri osooni koguhulga ja aerosooli optilise paksuse AOD500 muutumine 11. aprillist 31. augustini 2010.

Figure 2. Variations of daily relative direct irradiance, atmospheric column ozone and AOD500 for April 11 to August 31 in 2010.

Mida lühem on saabuva kiirguse lainepikkus, seda enam on temas hajuskiirgust. Kiirguse bioloogilise mõjususe olenevust lainepikkusest iseloomustatakse mõjufunktsioonidega (action spectra). Jooniselt 3 on näha, kui palju erinevad ühe päeva kiiritusdoosi spekter füüsikalistes energiatiheduse ühikutes $\text{kJ}/(\text{m}^2\text{nm})$ ja erütemmõjusa efektiivse energiatiheduse ühikutes $\text{kJ}_{\text{eff}}/(\text{m}^2\text{nm})$. Ka teistes mõjufunktsioonides avaldub suurim mõju UVB kiirguse lühematel lainepikkustel ja lainepikkuse kasvades kahaneb see erineval moel.



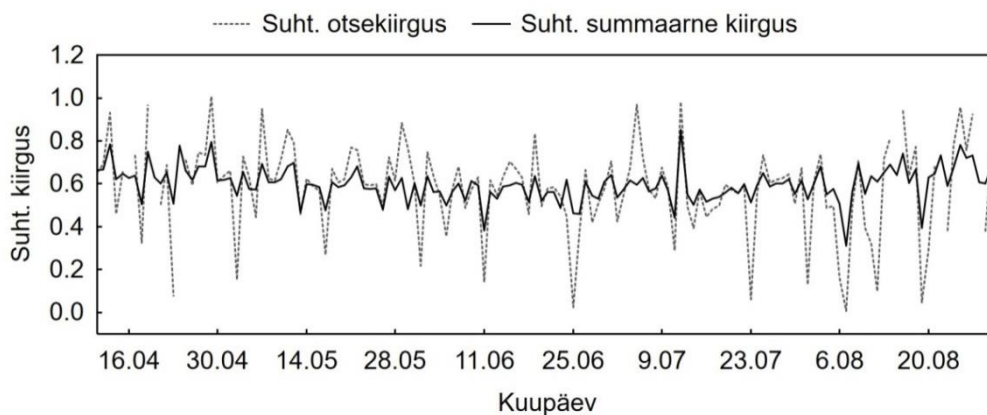
Joonis 3. Suvise päeva UV-kiirguse spektraalne päevadoos tavalistes (vasakul) ja erütemmselt efektiivsetes (paremal) ühikutes.

Figure 3. Daily spectral UV dose density in conventional (left) and erythemally effective (right) energy density units.

3. Tulemused

3.1. Keskpäevase kuue tunni panus päevasesse integraalsesse summaarsesse ja otsekiirgusesse

Joonisel 4 on illustratsioonina esitatud ajavahemikus 11. aprillist 31. maini 2012 keskpäevase kuue tunni jooksul püranomeetriga mõõdetud integraalse summaarse kiirguse panus kogu päeva omasse ning pürheliomeetri mõõtmistest saadud horisontaalsele pinnale langeva otsekiirguse vastav panus. Otsekiirguse andmeid ei ole kasutatud päevadel, mil see osutus väiksemaks kui 5 % selge ilma omast. Päeva pikenedes kahanevad mõlemad panused kuni suvise pööripäevani ning seejärel kasvavad perioodi lõpuks samale tasemele kui alguses. Kogu vaadeldava ajavahemiku formaalne keskmine osutus aastast aastasse väga stabiilseks, jäädes summaarse kiirguse puhul vahemikku 0,595 kuni 0,605.



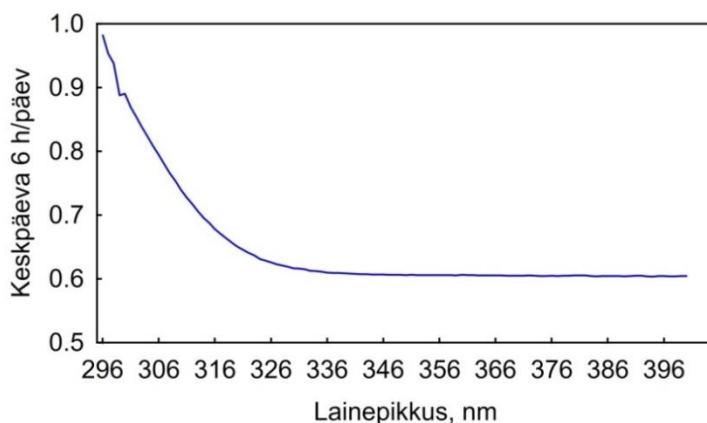
Joonis 4. Kuue keskpäevase tunni panus integraalse summaarse ja otsekiirguse päevasesse väärtusesse 11. aprillist 31. augustini 2012.

Figure 4. Contribution of six noon hours to daily integral global and direct irradiance in April 11 to August 31 of 2012.

Keskpäevase kuue tunni panus ei olene kuigi palju summaarse ja otsekiirguse päevastest suhtelistest väärtustest normaaltingimustel selge ilma suhtes. Otsekiirguse panus on muutlikum kui summaarse kiirguse oma (ruutkeskmine hälve kaks korda suurem) ja tema väärtus keskmiselt kuni 3 % võrra suurem. See asjaolu lubab eeldada, et keskpäevase kuue tunni panus jääb samaks ka väiksema ja suurema koguenergia korral. Nendest on mai kuni augusti integreeritud otsekiirguse väärtuste muutumine kujuteldava selge ilma vastava väärtuse suhtes alates 1955. aastast esitatud joonisel 1 mai kuni augusti integraalse otsekiirguse energiaga. Selle aastased väärtused muutuvad piirides 0,28 kuni 0,56, ehk siis ajavahemiku maksimaalne otsekiirguse energia on kaks korda suurem kui minimaalne. Summaarses integraalses kiirguses mahuvad mai kuni augusti aasta energia suhtelised väärtused vahemikku 0,57 kuni 0,78, ehk suurim väärtus ületab väiksemat veidi vähem kui 1,4 korda.

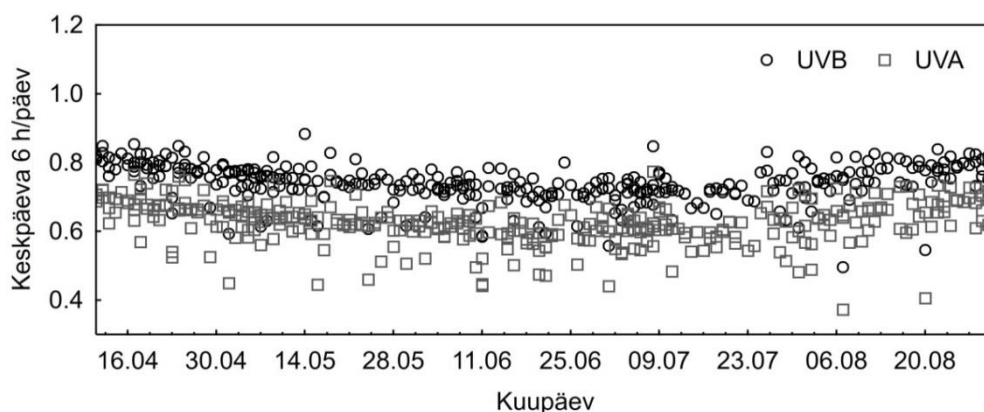
3.2. Keskpäevase kuue tunni panus päeva UVB ja UVA kiirgusesse

UV piirkonnas on registreeritud ainult horisontaalsele pinnale langeva summaarse kiirguse spektreid, millest on integreeritud UVB ja UVA kiirguse päeva ning keskpäevase kuue tunni energia. UVA kiirgus on nagu integraalne kiirgus registreeritav kogu päeva vältel. UVB kiirgus jõuab madala Päikese korral maapinnani väga vähesel määral, sest hajuskiirgus neeldub troposfääris leiduval osoonil. Joonisel 5 on esitatud ühe peaaegu selge suvise päeva (5. juuni 2013) kuue keskpäevase tunni maapinnani jõudva kiiritustiheduse suhe kogu päeva omasse sõltuvalt kiirguse lainepikkusest. UVB lühimatel lainepikkustel moodustab see üle 90 %. Osooni neelav mõju avaldub lainepikkustel alla 340 nm ja ulatub ka UVA piirkonda, kuid lainepikkuse kasvades järjest kahaneval määral. Seetõttu keskpäevase kuue tunni suhteline panus alates lainepikkusest 330 nm peaaegu ei muutu. Joonisel 6 on esitatud kuue keskpäevase tunni panused UVB ja UVA kiirgusesse spektripiirkondade eralduspiiri 315 nm korral. UVB kiirguse suhteline panus on UVA kiirguse omast märgatavalt suurem. Spektripiirkondade eralduspiiri 320 nm korral osutus keskpäevase kuue tunni panus (ei ole joonisena esitatud) kõigest 2–3 % võrra väiksemaks.



Joonis 5. Kuue keskpäevase tunni panus kogu päeva UV spektrisse vahemikus 296–400 nm sõltuvalt lainepikkusest.

Figure 5. Dependence of six noon hours contribution on wavelength in the UV spectral range 296–400 nm.



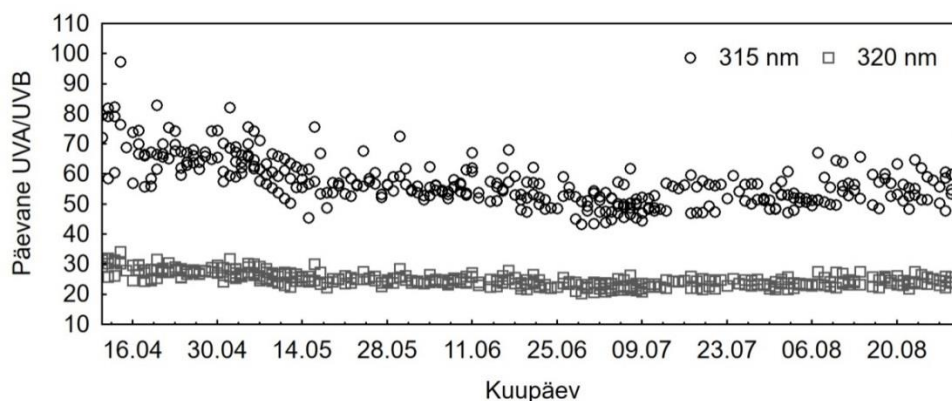
Joonis 6. Kuue keskpäevase tunni UVB ja UVA kiirguse panused päevasesse väärtusesse 11. aprillist 31. augustini aastatel 2010–2013.

Figure 6. Contribution of six noon hours to daily UVB and UVA doses during April 11 to August 31 in years 2010–2013.

3.3. Keskpäevase kuue tunni ja kogu päeva UVA/UVB suhe

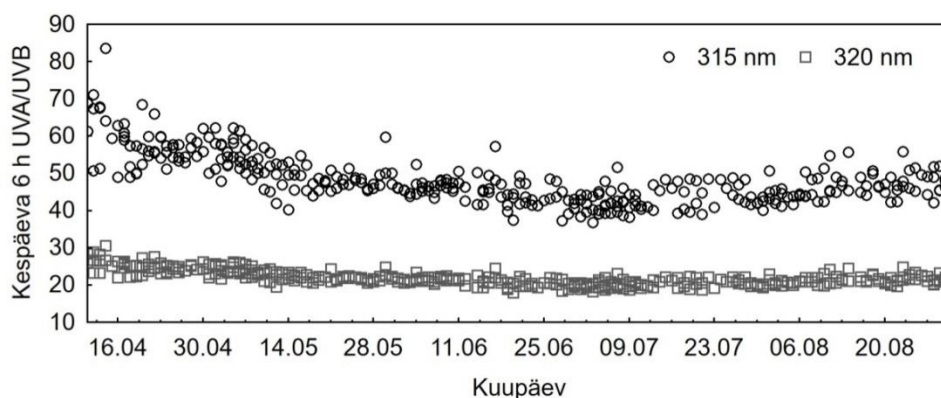
Uurimiseluse ajavahemiku päevane UVA/UVB suhe aastatel 2010–2013 spektri- piirkondade vahelise piiri mõlema variandi (315 nm ja 320 nm) puhul on esitatud joonisel 7 ning keskpäevase kuue tunni oma joonisel 8. Kuna UVB kiirguse osatähtsus on madala Päikese korral väike ja kasvab SZA kahanedes, siis saavutab UVA/UVB suhe miinimumi keskpäeva paiku. Nii kogu päeva kui keskpäevase kuue tunni UVA/UVB suhe on ootuspäraselt mõnevõrra suuremad vaatlusaluse perioodi alguses ja lõpus ning väiksemad su- vise pööripäeva paiku. Samuti ootuspäraselt on väärtused suuremad spektripiirkondade

eraldusjoone 315 nm korral. Kuna vaadeldava perioodi alguses esinevad sageli märksa suuremad osooni koguhulga väärtused (isegi üle 400 DU) kui lõpus (vahemikus 283–315 DU), mis nõrgendavad UVB kiirgust, siis on ka suhte UVA/UVB väärtused perioodi alguses suuremad ja lõpus ei ületa kuigi palju suvise pööripäeva aegseid. UVB ja UVA vahelise piiri 315 nm korral osutus kogu päeva UVA/UVB energiatega suhte keskmiselt 2,25 korda ja kuue keskpäevase tunni oma 2,13 korda suuremaks kui piiri 320 nm korral. UVA/UVB suhte sõltub oluliselt Päikese seniitnurgast ja selle väärtused madala päikese korral osutuvad isegi üle 10 korra suuremateks kui suvisel keskpäeval. Joonisel 9 on esitatud nelja aasta 20 maist 20 juulini andmete põhjal UVA/UVB suhte sõltuvus päikese seniitnurgast spektripiirkondade eralduspiiri 315 nm korral.



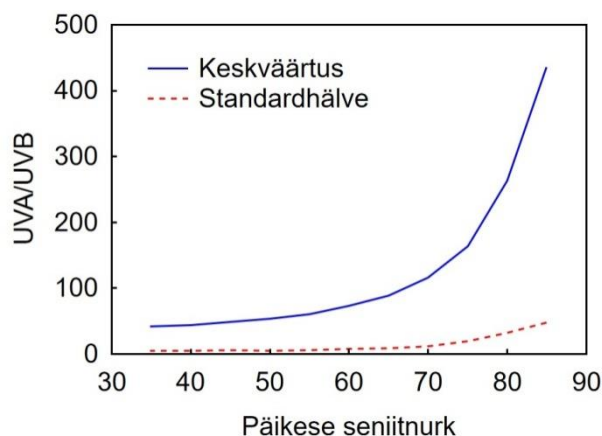
Joonis 7. Kogu päeva UVA/UVB energiatega suhte spektripiirkondade vahelise piiri 315 nm ja 320 nm korral ajavahemikus 11. aprillist 31. augustini aastatel 2010–2013.

Figure 7. Daily UVA/UVB ratio for the wavelength split at 315 nm and 320 nm in April 11 to August 31 of 2010–2013.



Joonis 8. Keskpäevase kuue tunni UVA/UVB energiatega suhte spektripiirkondade vahelise piiri 315 nm ja 320 nm korral ajavahemikus 11. aprillist 31. augustini aastatel 2010–2013.

Figure 8. Six noon hours UVA/UVB ratio for the wavelength split at 315 nm and 320 nm in April 11 to August 31 of 2010–2013.

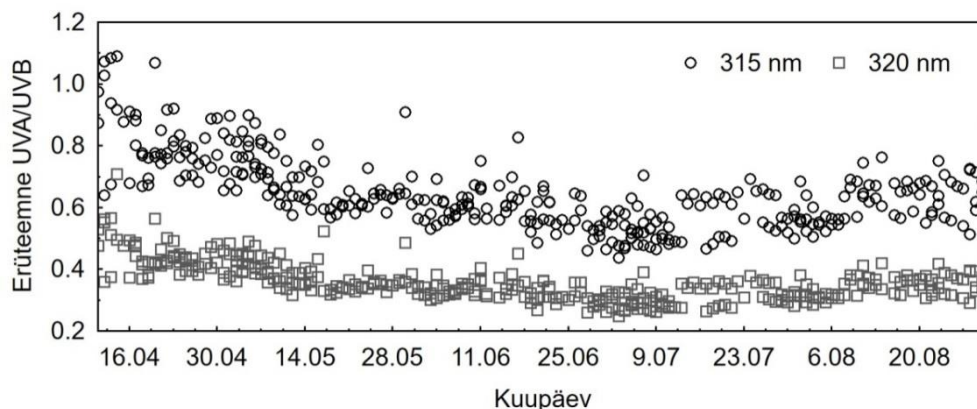


Joonis 9. Suhte UVA/UVB keskväärtuse sõltuvus Päikese seniitnurgast.

Figure 9. Dependence of the mean ratio UVA/UVB on solar zenith angle.

3.4. Kogu päeva ja keskpäevase kuue tunni panused ning UVA/UVB suhe eriteemses UV kiirguses.

UV kiirguse toime uurimisel kasutatakse mitmeid mõjufunktsioone (ingl. action spectra), mis iseloomustavad kiirguse spektraalset mõjusust (Vt. alapunkt 2, joonis 3). Järgnevalt on vaadatud UVA/UVB efektiivsete energiatega suhet keskpäevase 6 tunni eriteemses kiirgusdoosis mõlema kasutatava UVB ja UVA vahelise piiri korral. Need on esitatud joonisel 10.



Joonis 10. Keskpäevase 6 tunni UVA/UVB suhe eriteemmõjususe UV kiirguse spektripiirkondade vahelise piiri 315 nm ja 320 nm korral ajavahemikus 11. aprillist 31. augustini aastatel 2010–2013.

Figure 10. Noon six hours UVA/UVB ratio in erythemally weighted spectra for wavelength split at 315 nm and 320 nm in April 11 to August 31 of 2010–2013.

Kokkuvõtteks

- 1) Aastatel 2010–2013 Tõraveres kogutud andmete põhjal on kuue keskpäevase tunni panus integraalse kiirguse päevaenergias perioodi 11. aprill kuni 31. august alguses ja lõpus keskmiselt 63 % ja suvise pööripäeva paiku 57 %.
- 2) UVA kiirguses on vastavad väärtused spektripiirkondade eralduspiiri 315 nm korral 65 % ja 61 % ning eralduspiiri 320 nm korral 2–3 % võrra väiksemad. UVB kiirguses on samal perioodil kuue keskpäevase tunni panus 300 nm lähedastel lainepikkustel 90–95 % kogu päeva omast ja kogu UVB piirkonna panus perioodi alguses ja lõpus 77 % ning suvise pööripäeva paiku 72 %.
- 3) Kogu päeva ja kuue keskpäevase tunni UVA/UVB suhte väärtused on väikseimad suvise pööripäeva paiku (40 lainepikkuste eraldusjoone 315 nm ja 20 lainepikkuste eraldusjoone 320 nm korral). Paksema osoonikihi tõttu on kevadel UVA/UVB suhe suurem kui sügisel. Pilves ja pilvitutel ilmadel osutub see suhe aga keskmiselt üsnagi sarnaseks. UVB ja UVA vahelise piiri 315 nm korral on kogu päeva UVA/UVB energia suhe keskmiselt 2,25 korda ja kuue keskpäevase tunni oma 2,13 korda suurem kui piiri 320 nm korral.
- 4) Suhteliselt mõõdukalt muutuv UVA/UVB suhe võimaldab hinnata kummaski spektripiirkonnas suveperioodil kogunevat energiat erineva päikeseenergiaga varustatusega suvedel.
- 5) Erütemmõjus UV kiirguses domineerib UVB piirkonna kiirgus. UVA kiirguse panus on orienteeruvalt 60 % UVB omast, kuid võib aprillis ja mai alguses, juhtudel mil esineb väga paks (380 DU või enam) osoonikiht, UVB panust isegi veidi ületada. Erütemmõjusa UVA/UVB suhte standardhälve on suvisel ajal keskmiselt 1,4 korda suurem, kui see on saabuva energia spektrist saadud samas suhtes.

Tänuavaldused

Töö on tehtud Euroopa Regionaalarengu Fondi finantseeritud KESTA projekti 3.2.0801.11-0041 „Eesti kiirguskliima,, raames. Autorid tänavad Keskkonnaagentuuri Tartu-Tõravere meteoroloogiajaama ja NASA AERONETi töötajaid nende kogutud andmete kasutusvõimaluse eest.

Kirjandus

- Andrady A. L., Hamid H., Toricai A., 2011. Effects of solar UV and climate change on materials, *Photochemical and Photobiological Sciences*, 10, 292–300.
- Ansko I, Eerme K, Lätt S, Noorma M., Veismann U., 2008. Study of suitability of AvaSpec array spectrometer for solar UV field measurements, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8, 3247–3253.
- Byrne S. N., 2014. How much sunlight is enough? *Photochem. Photobiol. Sci.* 13, 840–852.
- Caldwell M. M., Bormann J. F., Ballare C. L., Flint S. D., Kulandaveilu G., 2007. Terrestrial ecosystems, increased ultraviolet radiation, and interactions with other climate change factors, *Photochemical and Photobiological Sciences*, 6, 252–266.
- Christiaens F., Moyal D., Seite S., Frederick J., 2011. Comments to the article by Kollias, Ruvolo and Sayre Entitled “The value of the ratio of UVA to UVB in sunlight”, *Photochemistry and Photobiology*, 87, 1476–1477.
- Christiaens F. J., Chardon A. M., Fourtanier A., Frederick J. E., 2005. Standard ultraviolet daylight for non-extreme exposure conditions, *Photochemistry and Photobiology*, 81, 874–878

- Häder D.-P., Kumar H. D., Smith R. C., Worrest R. C., 2007. Effects of solar UV radiation on aquatic ecosystems and interactions with climate change, *Photochemical and Photobiological Sciences*, 6, 267–285.
- Eerme K., Kallis A., Veismann U., Ansko I., 2010. Long-term variations of available solar radiation on seasonal timescales in 1955–2006 at Tartu-Tõravere meteorological station, Estonia, *Theoretical and Applied Climatology*, 101, 371–379.
- Eerme K., 2012. Interannual and intraseasonal variations of the available solar radiation. In: *Solar radiation*. Ed. By E. B. Babatunde, InTech, Croatia, 33–52.
- Eerme K., Aun M., Veismann U., 2015. Instrumentation and measurement of ground-level ultraviolet irradiance and spectral composition in Estonia. In: *Solar radiation applications*, Ed. by S. R. Bello, InTech, Croatia, 119–139.
- Jansen M. A. K., Gaba V., Greenberg B. M., 1998. Higher plants and UV-B radiation: balancing damage repair and acclimation, *Trends in Plant Science*, 3, 4, 131–135.
- Kakani V. G., Reddy K. R., Zhao D., Sailaja K., 2003. Field crop responses to ultraviolet-B radiation: A review, *Agricultural and Forest Meteorology*, 120, 191–218.
- Kollias N., Ruvolo Jr. E., Sayre R. M., 2011. The value of the ratio of UVA to UVB in sunlight, *Photochemistry and Photobiology*, 87, 1474–1475.
- Marionnet C., Tricaud C. and Bernerd F., 2015. Solar UV daylight: Spectral characterization, effects on skin and photoprotection. Review. *International Journal of Molecular Sciences*, 16, 68–90.
- Moan J., Dahlbäck A., Baturaite Z., Juzeniene A., 2013. UV-radiation and health: Optimal time for sun exposure. In: *Sunlight, vitamin D and skin cancer*. Second edition, Ed. by J. Reichrath, Landes bioscience and Springer science + business media, 1–6.
- Parisi A., Sabburg J., Kimlin M. G., 2004. *Scattered and filtered solar measurements*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 195 p.
- Veismann U, Pehk M, Kübarsepp T., 1994. Standards for radiometric calibrations of electro-optical devices in Estonia, In: *Baltic Electronic Conference, Proceedings of the 4th Biennial Conference*, Tallinn, October 9-14, Tallinn, 187–194.

Contribution of noon hours to daily broadband and ultraviolet radiation energy at Tõravere, Estonia during April to August

Kalju Eerme, Margit Aun and Uno Veismann
Tartu Observatory

Summary

At the Tartu Observatory site (58°16'N, 26°28'E, 70 m a.s.l.), located in Southern Estonia, the relative contribution of six noon hours in the received daily solar energy in broadband irradiance and in the ultraviolet (UV) UVB and UVA spectral ranges was studied. For the UV range, the dataset of spectra regularly recorded by the Bentham Instruments Ltd. double monochromator DMc150F-U was used. Two versions of wavelength split between UVB and UVA spectral ranges, 315 nm and 320 nm, are considered. The relative contribution of 6 noon hours was also found for the UVB and UVA spectral ranges in the case of erythema weighted irradiance. In the pyranometer measured broadband solar radiation the mean contribution of 6 noon hours in the period Apr 11 to Aug 31 is around 60 %. In the UVA and UVB spectral ranges it is larger, 60–65 % and 75 %, respectively. The UVA/UVB ratio tends to be larger during the spring part of the study period due to larger atmospheric column ozone. In the erythema weighted irradiance the contribution of the UVA part exceeds that of the UVB one only in the case of large column ozone in April and the beginning of May. Later, the contribution from the UVB range dominates.

Tulevikutormide simuleerimine, kasutades atmosfääri- (WRF) ja ookeanimudelit (FVCOM) 2005. aasta jaanuaritormi (Gudrun) näitel

Martin Mäll¹, Ryota Nakamura², Tomoya Shibayama², Ülo Suursaar³
ja Ain Kull⁴

¹ Tartu Ülikooli Ökoloogia- ja Maateaduste Instituut, ² Waseda Ülikooli Tsiviil- ja keskkonnatehnika osakond (Jaapan), ³ Tartu Ülikooli Eesti Mereinstituut, ⁴ Tartu Ülikooli geograafia osakond

1. Sissejuhatus

Kaasaegse kliimamuutuse (nn globaalse soojenemise) üheks ohtlikuks kaasnähuks peetakse tormisuse kasvu, mis koos globaalse meretaseme tõusuga ohustab laialdasi rannikualasid, näiteks Madalamaades, Kagu-Aasias, Mehhiko lahe piirkonnas ja mujal (Emanuel, 2005). Rääkides „tormisuse kasvust”, tuleb siiski vahet teha, kas tormid muutuvad sagedasemaks, intensiivsemaks või mõlemat. Kuigi on avaldatud arvamust, et ookeanipinna soojenemine peaks esile kutsuma eelkõige troopiliste tormide (Knutson & Tuleya, 2004) ja võimalik, et ka parasvöötme tsüklonite intensiivistumist või sageduse kasvu (Leckebusch & Ulbrich, 2004; Hansen jt., 2016), ei ole seda paljude teiste uurijate arvates praegu siiski võimalik kindlalt väita (Schmidt & von Storch, 1993; Trenberth, 2005). Ühelt poolt on tsükloonaalsuse loomulik muutlikkus väga suur (Rutgersson jt., 2015) ning teiselt poolt on suur ka atmosfääri tulevikutsenaariumide hajuvus ja seda just tuulte ja tormide osas (Christensen jt., 2015). Ka inimkonnale põhjustatud kannatuste ja majandusliku (või kindlustus-) kahju vaieldamatu tõus (Berz & Conrad, 1994; Webersik jt., 2010) ei pruugi peegeldada mitte ainult tormisuse kui geofüüsikalise nähtuse trendi, vaid ka rannikualade üha intensiivsemat majanduslikku kasutuselevõttu ning sealse rahvaarvu pidevat kasvu. Samuti ei ole tormisuse kasv kindlasti kõikehõlmav ja kõikjal ühetaoliselt kulgev protsess (Feser jt., 2014).

Tsüklonite kujunemine ja areng kulgeb troopilistel ja suurematel laiuskraadidel erinevalt ning erinevad on ka tormide iseloom, parameetrid ja mõjud. Suurimat globaalset vastukaja on saanud võimsad troopilised tsüklonid (orkaanid, taifuunid), nagu Katrina (2005, Mehhiko laht), Nargis (2008, Bengali laht), Sandy (2012, USA idarannik) ja Haiyan/Yolanda (2013, Filipiinid). Neid torme on uuritud erinevate uurimisrühmade poolt (Hill, 2012; Shibayama, 2015; Nakamura jt., 2016), kasutades erinevaid mudeleid ning algtingimusi, sealhulgas ka selliseid, mis lubaksid heita valgust küsimusele, milline võiks olla „tuleviku Haiyan” või „tuleviku Nargis”.

Ka Läänemere piirkonnas võib kliimamuutusega seotud ohuks pidada tormisuse kasvu ja tormidega kaasnevate üleujutuste suurenemist (Avotniece jt., 2010; Suursaar jt., 2015). Üleujutuste oht suureneb osalt seetõttu, et globaalse meretaseme tasapisi kiirenev tõus on seni veel olnud suuresti kompenseeritud jääajajärgse maakerkega Läänemere vesikonna põhja- ja kirdeosas, mis aga omakorda pidevalt aeglustub. Niisiis kujutavad kliimaatilistest teguritest Läänemere regioonis suurimat ohtu parasvöötme (ekstratropilised, mittetropilised, troopikavälised) tsüklonid. Sellised tormid arenevad tavaliselt sügis-

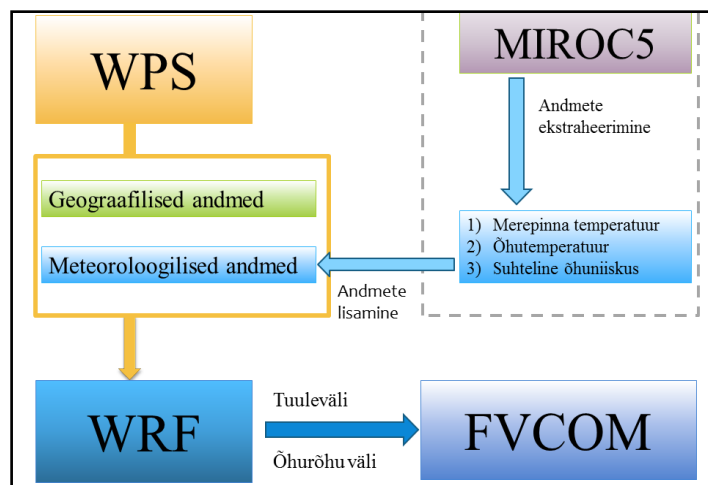
talvisel ajal Atlandi ookeani põhjaosas Islandi, Gröönimaa ning Newfoundlandi poolsaare vahelisel alal polaarfronti läheduses. Seega sellised tsüklonid, erinevalt troopikas sündivatest tsüklonitest, saavad oma energia kahel pool polaarfronti asuvate suurte õhumasside erinevusest, peamiselt temperatuurierinevusest. Läänetuulte vööndis Läänemere suunas liikudes võivad need tormid siin, aga ka Briti saartel, Skandinaavias ja mujalgi Põhja-Euroopas suurt kahju teha (Post & Kõuts, 2014). Viimase paari aastakümne tugevamad tormid Lääne Euroopas XWS-i tormisuse kataloogi andmetel (Roberts jt., 2012) on olnud 87J (oktoober 1987), Daria (jaanuar 1990), Vivian (veebruar 1990), Anatol (detsember 1999), Gudrun/Erwin (jaanuar 2005) ja Kyril (jaanuar 2007). Võib tõdeda, et erinevad meteoroloogilised indeksid annavad pisut erinevaid tulemusi. Kuna Läänemere põhjalõunasuunaline ulatus on suur (ligi 1400 km) ning tormide lokaalne mõju rannikualadele sõltub tugevalt tsükloni trajektooriga, siis on ka Eesti rannikumerd kõige enam mõjutanud tormide nimekiri osaliselt erinev (Jaagus & Suursaar, 2013; Suursaar jt., 2015): Gudrun/Erwin (9. jaanuar 2005), tormid 2. novembril 1969, 18. oktoobril 1967, 17. detsembril 1990, 1. novembril 2001, 22. veebruaril 1990, ning St. Jude (29. oktoobril 2013). Suurima mõjuga ja ekstreemseim oli 2005. aasta jaanuaritorm Gudrun/Erwin, mis põhjustas rannikulinnades rekordtasemel üleujutusi. Pärnu linnas oli veetase +275 cm üle mõõtetaseme nulli, kus nulltase vastab umbkaudu pikaajalisele keskmisele veetasemele. Torm ja kaasnenud üleujutus tekitasid olulist majanduslikku kahju ning rannapurustusi (Suursaar jt., 2006; Tõnisson jt., 2008).

Seoses viimastel aastakümnetel intensiivistunud rannikuerosiooni (Orviku jt., 2003) ja teiste tormikahjustustega, on oluline paremini mõista tulevikus esineda võivaid torme ja nende mõjusid Eesti kontekstis. Kas Läänemere tormid muutuvad tulevikus tõusva temperatuuri foonil tugevamaks? Kas üleujutused sagenevad, arvestades globaalset meretõusu (Eelsalu jt., 2014)? Selle uurimistöö eesmärk on järeelprognosina modelleerida tormi Gudrun, kasutades selleks atmosfäärimudelit Weather Research & Forecasting (ARW-WRF) ja ookeanimudelit Finite Volume Community Ocean Model (FVCOM). Need mudelid, mida kirjeldatakse lähemalt allpool, on leidnud kasutust mitmetes maades, sealhulgas Jaapanis Waseda ülikooli nn Shibayama laboris (Nakamura jt., 2015; 2016; Shibayama, 2015; Tasnim jt., 2015). „Tuleviku Gudrunid” arvutatakse, arvestades Vaalitsustevahelise Kliimamuutuste Paneeli viiendas hindamisraportis (IPCC AR5) toodud kliimamuutuste stsenaariume RCP4.5 ja RCP8.5 (RCP – Representative Concentration Pathways), keskendudes aastatele 2050 ja 2100.

2. Metoodika

Mudelite süsteem on kujutatud joonisel 1 (Nakamura jt., 2016). Simuleerimiseks kasutati nn ülalt alla ehk jada-lähenemist, kus atmosfäärimudel töötab esimesena ja selle väljundit kasutatakse sisendina ookeanimudelile. Atmosfäärimudel WRF on numbriline, operatiivset ilmaprognoosi võimaldav keskmise mõõtkava (mesoskaala) mudel, mida on alates 1990ndatest arendanud mitmeid USA uurimisasutusi (NCAR, NOAA, AFWA, NRL jt.) ning ülikoole hõlmav konsortsium. Idealiseeritud tingimustel või reaalselt assimileeritud vaatlusandmete alusel on WRF võimeline piisavalt täpselt simuleerima atmosfääritingimusi nii teadustöö kui ka reaalajaliste prognooside jaoks (Skamarock jt., 2008). Mudeli registreeritud kasutajaid leidub juba enam kui 150 riigis. Käesolevas töös tehti WRF mudeliga arvutusi kolmel Lääne-Eesti rannikumerega seotud uurimisalal (joonis 2) 2005.a

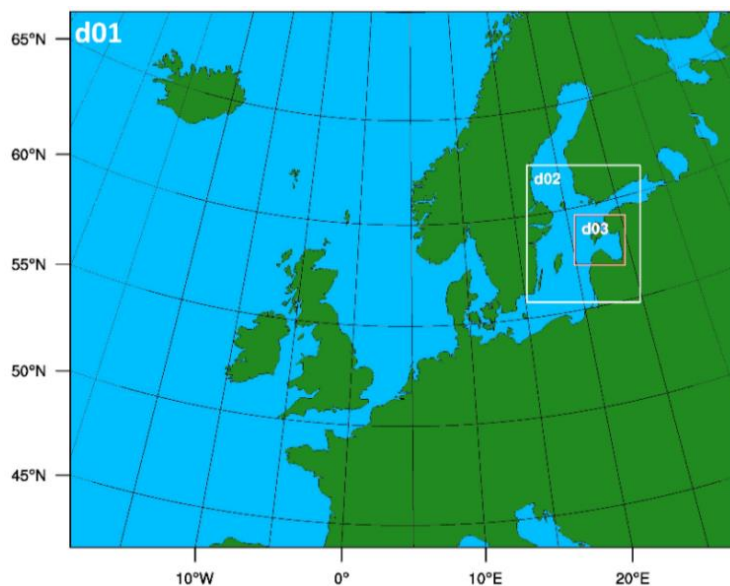
tormi Gudrun toimumise eel ja järel. Arvutuse kestus esimesel modelleerimisalal oli 96 h, teisel 84 h ja kolmandal 60 h. Kontrollsimulatsiooni meteoroloogiliste väljade sisendandmed saadi USA NCEP (National Centre for Environmental Protection) operatiivanalüüsist (<http://rda.ucar.edu/>).



Joonis 1. Kasutatud mudelite plokk-skeem tormi ja veetaseme muutuse modelleerimiseks.

Figure 1. Flowchart of models used for storm surge modelling.

Tulevikustsenaariumide saamiseks asendati algsed NCEP järelarvutuse merepinna veetemperatuuri, õhutemperatuuri ja suhtelise õhuniiskuse andmed MIROC5 mudeli abil saadud tuleviku jaoks valitud andmetega. Nagu töös Tasnim jt. (2015), erinesid ka meie tuleviku sisendväljad nimetatud kolme parameetri osas, kuid põhimõtteliselt võib neid erinevust tekitavaid parameetreid MIROC5 baasist leida teisigi. Tuleviku simulatsioonide jaoks kasutatud kliimamudel MIROC5 (Model for Interdisciplinary Research on Climate) on CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project, Phase 5) raames Jaapani teadlaste (Watanabe jt., 2010) loodud globaalne mudel, mille arvutusi on muu hulgas laialdaselt kasutatud ka IPCC tulevikustsenaariumide juures. Selles töös arvestati IPCC AR5 raportis toodud RCP4.5 ja RCP8.5 stsenaariumidel põhinevaid kliimaprojektsioone. Valitud stsenaariume (RCP4.5 ja RCP8.5) käsitletakse aastatel 2050 ja 2100, kus vajalikud parameetrite väärtused saadi aastate 2045–2055 ja 2091–2100 keskmistatud väärtustest. Saadud tuleviku ja oleviku erinevus interpoleeriti (uuritava kuu, jaanuari kohta) kõikidele WRF-i simuleeritud meteoroloogilistele võrgupunktile ja vertikaalsetele tasemetele. Need võrgupunktid on algselt koostatud WRF-i eeltöötlusprogrammiga WPS, kasutades NCEP FNL-i andmestikku. Näiteks erines merepinna keskmine temperatuur stsenaariumidel 2050RCP4.5, 2100RCP4.5, 2050RCP8.5 ja 2100RCP8.5 vastavalt 0,25; 1,16; 1,22 ja 2,8 K võrra kontrollperioodi 2006–2011 suhtes.



Joonis 2. WRF-i atmosfäärimudelil kasutatud kolm järjestikust modelleerimisala.

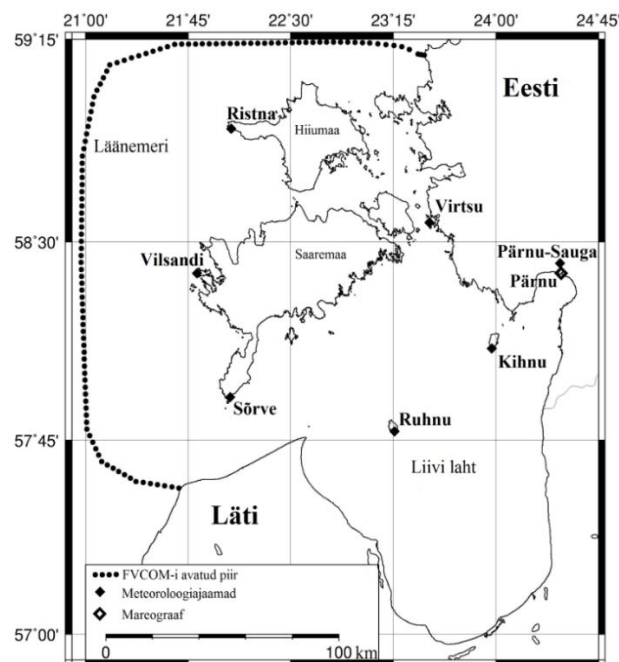
Figure 2. Nested domains (do1, do2, do3) used in the WRF atmosphere model.

Tsüklonit sisaldavat atmosfääritingimuste kontrollsimulatsiooni ja stsenaariumi-arvutusi kasutati ookeanimudeli arvutustes, kus põhitähelepanu keskendus veetaseme väljade muutumisele. Kolmemõõtmeline ookeani prognoosmudel FVCOM on struktureerimata võrguga nn avatud kogukonnamudel, mille lõi algelt USA Woods Hole'i Okeanoloogia Instituudi ja Massachusettsi Ülikooli Dartmouthi teadlased (<http://fvcom.smast.umassd.edu/fvcom/>). Mudeli pidevalt edasiarendatav merefüüsikaline sisu ning topoloogiline paindlikkus teevad FVCOM-ist ranniku uuringutes ja interdistsiplinaarsetes rakendustes laialt levinud töövahendi (Chen jt., 2003). Siinses uuringus oli mudeli arvutuste kestus kõige väiksemal modelleerimisalal (d03; joonis 3) 54 h. Mudelites kasutatud andmed ja parameetrite valikud on esitatud tabelis 1. Nii atmosfääri kui ka mere hüdrodünaamiliste parameetrite lähteolukorra järelarvutuse (*hindcast*) tulemuste võrdluseks kasutati Eesti Keskkonnaagentuurist saadud tunnise intervalliga tuule kiiruse, suuna ja veetaseme vaatlusandmeid valitud rannalähedastest jaamadest (joonis 3).

Tabel 1. Mudelite alg- ja ääritingimused.

Table 1. Initial and boundary conditions for used models.

	Nimekiri	Valikud
WRF	Simulatsiooni aeg (domeen 1)	18:00 UTC 06/01/2005 – 18:00 UTC 10/01/2005
	Simulatsiooni aeg (domeen 2)	06:00 UTC 07/01/2005 – 18:00 UTC 10/01/2005
	Simulatsiooni aeg (domeen 3)	06:00 UTC 08/01/2005 – 18:00 UTC 10/01/2005
	Võrgusamm (domeen 1)	22.5 km
	Võrgusamm (domeen 2)	4.5 km
	Võrgusamm (domeen 3)	0.9 km
	Õhurõhu ülempiir	50 hPa
	Kihte vertikaalis	27
	Domeene	3
	Pesitsuskeem	kahesuunaline
	Mikrofüüsika	WSM6
	Pinnakiht	Revised MM5 Monin-Obukhov scheme
	Maapind	Unified Noah land-surface model
	Planetaarne	YSU
	Projektsioon	Lamberti Konformne kooniline
	Meresügavuse andmed	USGS
	Atmosfääri andmed	NCEP FNL Operational Global Analysis
	Atmosfääri andmete resolutsioon	1 x 1 kraadi
FVCOM	Simulatsiooni aeg	06:00 UTC 08/01/2005 – 12:00 UTC 10/01/2005
	Noode	63 189
	Elementide arv	123 533
	Võrgusilma suurus	50 m – 2000 m
	Kõrgusandmed	DEM - 5 m, SRTM90 - 90 m, ETOPO1 - 1 arc-minut
	Rannikumere sügavusandmed (Veeteede Amet)	Pärnu laht ja jõgi - 5 m; Liivi laht, Väinameri, Irbe Väin - 50m
	Rannikumere sügavusandmed (ETOPO1)	1 arc-minut

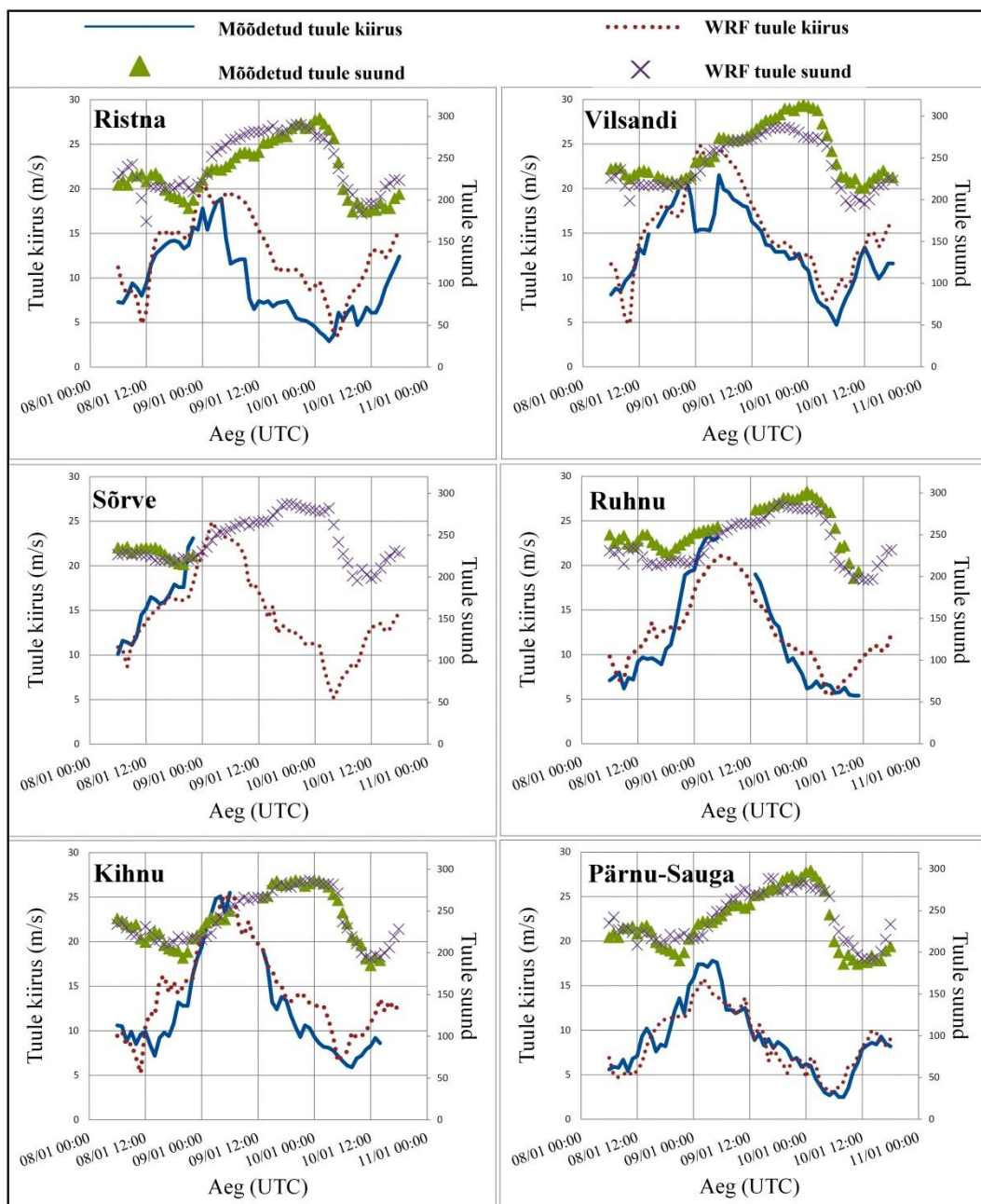


Joonis 3. FVCOM-i uurimisala, mis jääb WRF-i modelleerimisala do3 (joonis 2) alla.

Figure 3. Study area of the FVCOM which falls under the WRF domain 3 (Figure 2).

3. Gudruni järelarvutuse tulemused

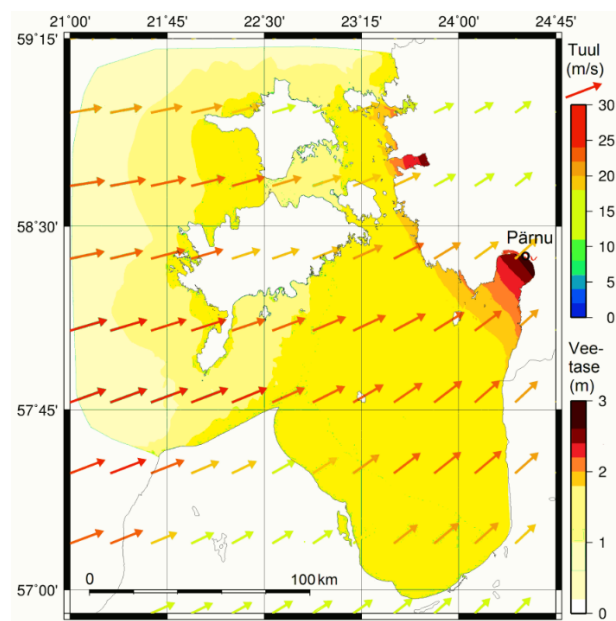
Mõõtmiste järgi ulatus ilmajaamades 10 minuti keskmine tuule kiirus 9. jaanuaril 2005 tormi Gudrun ajal kuni 28 meetrini sekundis (Sõrves) ning puhangud ulatusid 38 meetrini sekundis (Kihnus); paljudes rannikujaamades mõõdeti uued meretaseme rektorid. Samas on teada, et tormi tõttu esines häireid või katkestusi mitme ilmajaama töös (sh Vilsandil, Ruhnus) ja mitme jaama veetaseme andmed olid puudu või moonutatud (Ristna). Seetõttu tuli hiljem mõningaid tormiparameetreid hinnata mudelite abil (Suursaar jt., 2006). Selles töös võrreldi järelarvutuste tulemusi kuues ilmajaamas mõõdetud väärtustega, kusjuures eespool mainitud tormist tingitud tehniliste häiringute tõttu ei pruugi mõnel juhul mõõdetud andmed „õigemad” olla kui modelleeritud. Üldiselt olid järelarvutuse tuule kiiruse ja suuna tulemused heas kooskõlas vaatlusandmetega (joonis 4). Parim kokkulangevus oli Kihnus ning probleemseim oli see Vilsandil, kus sektoris 210–250° on teadaolevalt tuule kiirus oluliselt vähenenud mõõtemasti läheduses paiknevate hoonete ja tuletorni tõttu (Jaagus ja Kull, 2011). Samuti võisid erinevused mõõtmiste ja modelleerimistulemuste vahel pärineda WRF-i topograafia ja võrgu horisontaalse lahutuse iseärasustest, millest tulenevalt oli keeruline saada kõrglahutusega andmeid. Lisaks on rasteriseeritud atmosfäärimudeli arvatud tuule kiirus üldjuhul (ka teiste sarnaste mudelite puhul) pisut liiga sujuv (silutud), mis ei arvesta hästi maa-mere piirialal esinevate väikeste lokaalsete eripäradega.



Joonis 4. Simuleeritud ja mõõdetud tuule võrdlus Gudruni ajal kuues vaatlusjaamas.

Figure 4. Wind speed and direction comparison between observations and simulations at six meteorological stations.

Veetaseme järelarvutus (*hindcast*, „lähteolukord”, joonis 5) 2005.a tormi Gudrun tipp hetkel näitas meretõusu ehk ajuvee (*storm surge*) koondumist Pärnu lahe pärasse. Simuleeritud veetõus Pärnu jõe suudmes oli heas vastavuses vaatlusandmetega, kus tormitõusu esimese tipu kõrguse erinevus oli vaid 6 cm (joonis 6). Seega olid tuuleväljad piisavalt hästi simuleeritud (joonis 4). FVCOM reprodutseeris kaks veetaseme maksimumi, kus teise tipu esinemise põhjus ei sisaldu tuuleväljas, vaid pigem Liivi lahe okeanograafias. Ilmselt aitas sekundaarsele tipule kaasa Liivi lahe 5-tunnine omavõnke- ehk seišiperiood (Suursaar jt., 2003). See teine tipp oli aga mudeli poolt pisut ülehinnatud. Suurima erinevusena torkab siiski silma järelarvutuse („lähteolukord”; joonis 6) tormisündmuse pikem kestus: veetase ei langenud nii kiiresti kui tegelikud mõõtmistulemused näitasid. See omakorda oli arvatavasti põhjustatud modelleeritud tuulesündmuse pikemast kestusest ja suuremast „silutusest” (joonis 4).



Joonis 5. Modelleeritud tuuleväli ja meretase ajuvee tipp hetkel (269/275 cm modelleeritud/ mõõdetud Pärnus; aeg 03:20 UTC 9. jaanuar 2005).

Figure 5. Modelled wind field and sea level in the storm surge peak (269/275 cm modelled/ measured in Pärnu on 9 January 2005 at 02:00 UTC).

4. Tulevikutormi simulatsioonid

Tehes meremudeli arvutused uute, „tuleviku Gudrunit” sisaldavate atmosfääri- väljadega, selgus, et ükski tulevikusimulatsiooni stsenaarium (joonis 6: RCP4.5, RCP8.5; aastad 2050 ja 2100) ei muutnud vaadeldud tormi järelarvutatud lähteolukorrast tugevaks. Meie tulemustest nähtub, et näitena arvatud ekstreemse tulevikutormi intensiivsus ja vastav tormitõus jäi umbes samaks või hoopiski pisut vähenes. Tuleb aga silmas pidada, et tegemist on üksiksündmuse arvutusega ja tulevikku puudutavaks klimatoloogiliseks üldistuseks oleks vaja läbi arvutada rohkem tormisündmusi, sealhulgas erinevatel aasta-

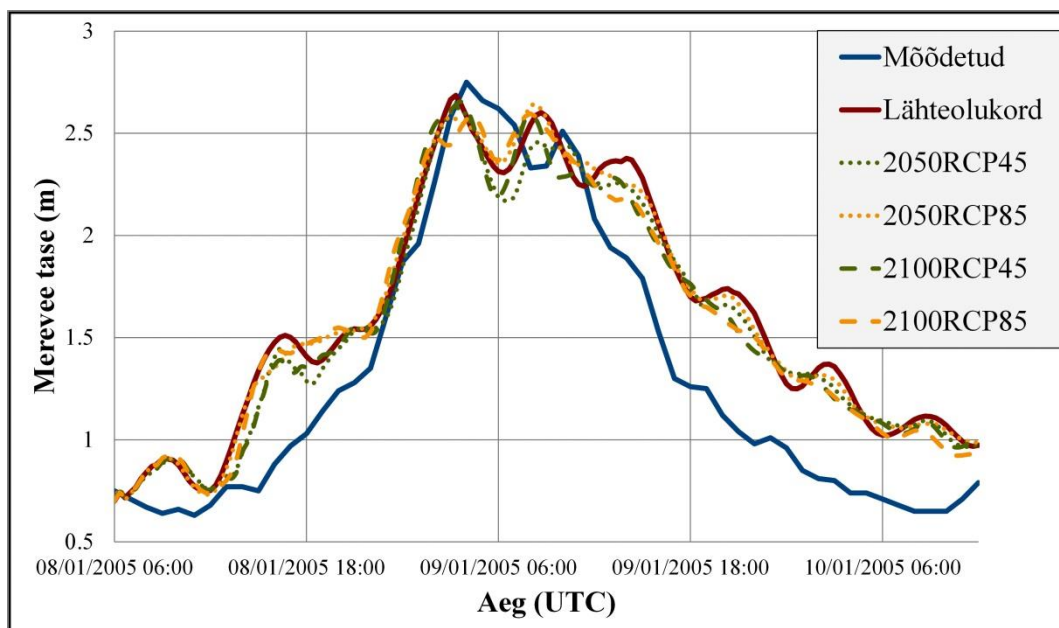
aegadel (kuudel) toimuvaid ning erinevaid trajektoore pidi kulgevaid torme. Leitud tulemus on näilises vastuolus levinud (ja intuiitiivselt eeldatava) seisukohaga, kus kliima globaalne soojenemine toob automaatselt kaasa tormisuse tõusu. Tormisust käsitlevad tulevikustsenaariumid erinevad siiski laiades piirides sõltuvalt piirkonnast, mudelistest, algandmetest (Ulbrich jt., 2009). Arvatavasti esineb ka meie mudelites (nagu teisteski) puudusi ning arvessevõtmata seoseid; ühtegi mudelit ei saa tuleviku suhtes pidada tõsikä kindlaks enne, kui tulemus pole valideeritud.

Kui püüda tõlgendada meie saadud ühe tulevikutormi arvutustulemusi, siis peamiseks tormi mittetugevnemise põhjuseks võib pidada parasvöötme tsüklonite arengu eripära. Nimelt, sellised tsüklonid ammutavad oma energia polaarfrondilt, kus puutuvad kokku külm ja suhteliselt soojem õhumass. Kui troopilised tsüklonid ammutavad energia ookeani pinnasoojusest ja niiskusest, muutudes merepinna temperatuuri tõustes tugevamaks (Tasnim jt., 2015), siis väljaspool troopikat kujunenud tsüklonite intensiivsuse põhilised mõjutajad (mudelis kasutatud parameetrite juures) on tõenäoliselt õhutemperatuuri erinevused fronti piirkonnas. Väiksem temperatuurierinevus polaarfrondil tulevikus viibki nõrgemate tormide kujunemiseni. Toodud tulevikustsenaarium ei pruugi aga realiseeruda. Peale praegu kõige tõenäolisemaks peetavate „ansamblikeskmiste“ eksisteerib ka äärmuslikumaid tulevikustsenaariume. Näiteks leiavad Hansen jt (2016), et Gröönimaa jääkilbi sulamisega võib kaasneda Põhja-Atlandi ookeani tsirkulatsiooniskeemi oluline muutumine, mis kutsub esile muu hulgas ka tugevamad mittetropilised tormid (supertormid).

Selleks, et saada täpsemaid tulemusi tuleviku simulatsioonide kohta lokaalsel (Pärnu) tasandil, oleks vaja uurimistöös kasutatud meetodikat edasi arendada, arvestades 1) glatsio-isostaatilise maakerke ja merepinna tõusu vahekorda tulevikus; 2) laiendada ookeanimudelis kõrgresolutsiooniga maapinna kõrgusandmete ja rannikumere sügavusandmetega kaetud ala; 3) Pärnu jõe äravoolu ning sademeid, sest parasvöötme tsüklonid võivad tulevikus rohkem niiskust pooluse suunas kanda; 4) kasutada kõrgema resolutsiooniga atmosfääri järelanalüüsi (ERA-Interim) andmeid; 5) kasutada ansambli-lähene-mist, kaasates mitmeid CMIP5 globaalseid kliimamudeleid; 6) arvutada läbi erinevate trajektooriga ja eri aastaaegadel asetleidvaid torme.

5. Kokkuvõte

Atmosfääri-mere mudelisüsteemi järelarvutuse tulemused 2005.a tormi Gudrun jaoks olid Lääne-Eestis heas kooskõlas tegelike vaatlusandmetega. Manipuleeritud atmosfääriandmetega arvutatud tulevikutormi („tuleviku Gudruni“) simulatsioon meie kasutatud meetodika juures ei näidanud tormi intensiivsuse kasvu, vaid tugevuse umbkaudu samasugust taset või isegi mõningast langust. Selle nähtuse põhjuseks võib pakkuda, et kui troopilised tsüklonid muutuvad merepinna temperatuuri tõustes tugevamaks, siis väiksem temperatuuri erinevus polaarfrondil võib tulevikus viia nõrgemate tormide kujunemiseni parasvöötmes. Sellise üldistuse kontrollimiseks on tulevikus vaja läbi arvutada suurem hulk erinevates tingimustes kulgevaid tormisündmusi.



Joonis 6. Pärnu mõõdetud ja simuleeritud mereveetasemete võrdlus.

Figure 6. Storm surge height comparison between all the cases in Pärnu.

Tänuavaldused

Seda uurimust on toetanud Eesti teadusagentuuri personaalse uurimistoetuse projekt PUT595 ja Jaapani haridusministeeriumi grant nr 22404011 (Waseda Ülikool).

Kirjandus

- Avotniece, Z., Rodinov, V., Lizuma, L., Briede, A., Kļaviņš, M., 2010. Trends in the frequency of extreme climate events in Latvia. *Baltica*, 23 (2), 135–148.
- Berz, G., Conrad, K., 1994. Stormy weather: the mounting windstorm risk and consequences for insurance industry. *Ecodecision*, 12, 65–69.
- Chen, C., Liu, H., Beardsley, R.C., 2003. An Unstructured Grid, Finite-Volume, Three-Dimensional, Primitive Equations Ocean Model: Application to Coastal Ocean and Estuaries. *J. Atmos. Ocean Technol.*, 20 (1), 159–186.
- Christensen, O.B., Kjellström, E., and Zorita, E., 2015. Projected change – atmosphere. In: The BACC II Author Team. *Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin*. Cham: Springer, pp. 217–233.
- Eelsalu, M., Soomere, T., Pindsoo, K., Lagemaa, P., 2014. Ensemble approach for projections of return periods of extreme water levels in Estonian waters. *Continental Shelf Research*, 91, 201–210.
- Emanuel, K., 2005. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature*, 436, 686–688.

- Feser, F., Barcikowska, M., Krueger, O., Schenk, F., Weisse, R., Xia, L., 2015. Storminess over the North Atlantic and northwestern Europe – A review. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 141 (687), 350–382.
- Hansen, J., Sato, M., Hearty, P., Ruedy, R., Kelley, M., Masson-Delmotte, V., Russell, G., Tselioudis, G., Cao, J., Rignot, E., Velicogna, I., Tormey, B., Donovan, B., Kandiano, E., von Schuckmann, K., Kharecha, P., Legrande, A.N., Bauer, M., Lo, K.-W., 2016. Ice melt, sea level rise and superstorms: evidence from paleoclimate data, climate modeling, and modern observations that 2°C global warming could be dangerous. *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 3761–3812.
- Hill, D., 2012. The lessons of Katrina, learned and unlearned. *Journal of Coastal Research*, 29, 324–331.
- Jaagus, J., Kull, A., 2011. Changes in surface wind directions in Estonia during 1966–2008 and their relationships with large-scale atmospheric circulation. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 60 (4), 220–231.
- Jaagus, J., Suursaar, Ü., 2013. Long-term storminess and sea level variations on the Estonian coast of the Baltic Sea in relation to large-scale atmospheric circulation. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 62, 73–92.
- Knutson, T.R., Tuleya, R.E., 2004. Impact of CO₂-induced warming on simulated hurricane intensity and precipitation: Sensitivity to the choice of climate model and convective parameterization. *Journal of Climate*, 17 (18), 3477–3495.
- Leckebusch, G.C., Ulbrich, U., 2004. On the relationship between cyclones and extreme windstorm events over Europe under climate change. *Global and Planetary Change*, 44 (1–4), 181–193.
- Nakamura, R., Iwamoto, T., Shibayama, T., Mikami, T., Matsuba, S., Mäll, M., Takekouji, A., Tanokura, Y., 2015. Field survey and mechanism of storm surge generation invoked by the low pressure with rapid development in Nemuro Hokkaido in December 2014. *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, 71, 31–36.
- Nakamura, R., Shibayama, T., Esteban, M., Iwamoto, T., 2016. Future typhoon and storm surges under different global warming scenarios: case study of typhoon Haiyan (2013). *Natural Hazards*, 1–37.
- 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 (2), 364–375.
- Post, P., Kõuts, T., 2014. Characteristics of cyclones causing extreme sea levels in the northern Baltic Sea. *Oceanologia*, 56(S), 241–258.
- Roberts, J.F., Champion, A.J., Dawkins, L.C., Hodges, K.I., Shaffrey, L.C., Stephenson, D.B., Stringer, M.A., Thornton, H.E., Youngman, B.D., 2014. The XWS open access catalogue of extreme European windstorms from 1979 to 2012. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14 (9), 2487–2501.
- Rutgersson, A., Jaagus, J., Schenk, F., Stendel, M., Barring, L., Briede, A., Claremar, B., Hanssen-Bauer, I., Holopainen, J., Moberg, A., Nordli, Ø., Rimkus, E., Wibig, J., 2015. Recent change – atmosphere. In: The BACC II Author Team (Ed.). *Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin*, pp. 69–97, Springer.
- Schmidt, H., von Storch, H., 1993. German Bight storms analysed. *Nature* 370 : 791
- Shibayama, T., 2015. Field surveys of recent storm surge disasters. *Procedia Engineering*, 116, 179–186.
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., Duda, M.G., Huang, X.Y., Wang, W., Powers, J.G., 2008. A Description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR Technical Note.
- Suursaar, Ü., Jaagus, J., Tõnisson, H., 2015. How to quantify long-term changes in coastal sea storminess? *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 156, 31–41.
- Suursaar, Ü., Kullas, T., Otsmann, M., Kõuts, T., 2003. Extreme sea level events in the coastal waters of western Estonia. *Journal of Sea Research*, 49, 295–303.

- Suursaar, Ü., Kullas, T., Otsmann, M., Saaremäe, I., Kuik, J., Merilain, M., 2006. Hurricane Gudrun and modelling its hydrodynamic consequences in the Estonian coastal waters. *Boreal Environment Research*, 11, 143–159.
- Tasnim, K.M., Shibayama, T., Esteban, M., Takagi, H., Ohira, K., Nakamura, R., 2015. Field observation and numerical simulation of past and future storm surges in the Bay of Bengal: case study of cyclone Nargis. *Natural Hazards*, 75 (2), 1619–1647.
- Trenberth, K., 2005. Uncertainty in hurricanes and global warming. *Science*, 308, 1753–1754.
- Tõnisson, H., Orviku, K., Jaagus, J., Suursaar, Ü., Kont, A., Rivis, R., 2008. Coastal damages on Saaremaa Island, Estonia, caused by the extreme storm and flooding on January 9, 2005. *Journal of Coastal Research*, 24 (3), 602–614.
- Ulbrich, U., Leckebusch, G.C., G. Pinto, J. G., 2009: Extra-tropical cyclones in the present and future climate: A review. *Theor. Appl. Climatol.*, 96, 117–131.
- Watanabe, M., Suzuki, T., O'ishi, R., Komuro, Y., Watanabe, S., Emori, S., Takemura, T., Chikira, M., Ogura, T., Sekiguchi, M., Takata, K., Yamazaki, D., Yokohata, T., Nozawa, T., Hasumi, H., Tatebe, H., Kimoto, M., 2010. Improved Climate Simulation by MIROC5: Mean States, Variability, and Climate Sensitivity. *J. Climate*, 23, 6312–6335.
- Webersik, C., Esteban, M., Shibayama, T., 2010. The economic impact of future increase in tropical cyclones in Japan. *Natural Hazards*, 55 (2), 233–250.

Modelling storm surge conditions under future climate scenarios: A case study of 2005 January storm Gudrun in Pärnu, Estonia

Martin Mäll¹, Ryota Nakamura², Tomoya Shibayama², Ülo Suursaar³ and Ain Kull⁴
¹*Institute of Ecology and Earth Sciences, University of Tartu*, ²*Department of Civil and Environmental Engineering, Waseda University, Japan*, ³*Estonian Marine Institute, University of Tartu*, ⁴*Department of Geography, University of Tartu*

Summary

A case study based on the January 2005 storm Gudrun parameters has shown a good agreement between observations and results obtained from atmospheric and ocean models. In the methodology we used for simulating “future storm Gudrun”, no increase in the intensity of this particular future storm was found but instead, a slight decrease was noticed. When tropical cyclones get stronger with higher sea surface temperatures, it does not apply for extratropical cyclones. Instead, smaller air temperature differences in the polar front may lead to weaker extratropical cyclone formation. However, for drawing broader conclusions, a number of different storm cases should be simulated.

Eesti ilmastik ja kartuli veega varustatus: nii puudu kui liiast

Jüri Kadaja ja Triin Saue
Eesti Taimkasvatuse Instituut

1. Sissejuhatus

Päike on saagi isa, vesi saagi ema – nii väidab india vanasõna. Nagu igapäevaelust teame, ei kasva emaarmastuseta head inimest, aga ega selle ülevoolavuski lapsele alati kasulikult mõju. Paljuski sõltub see konkreetsest mammast, kuid ka kohalikest kommetest. Ka saagi „ema“ käitumine on suuresti noist kohalikest kommetest seatud. Paljudes maakera piirkondades jääb emaarmastust tõsiselt vajaka ja tulevik paistab veelgi tumedam, nii et ühiskondliku abita last enam kuidagi ei kasvata. Tundub, et meil Eestis oleks nagu emaarmastusega rohkem vedanud – või ei olegi, hakkab see hoopis lämmatama ja tuleb lapsukest mamma käest päästa?

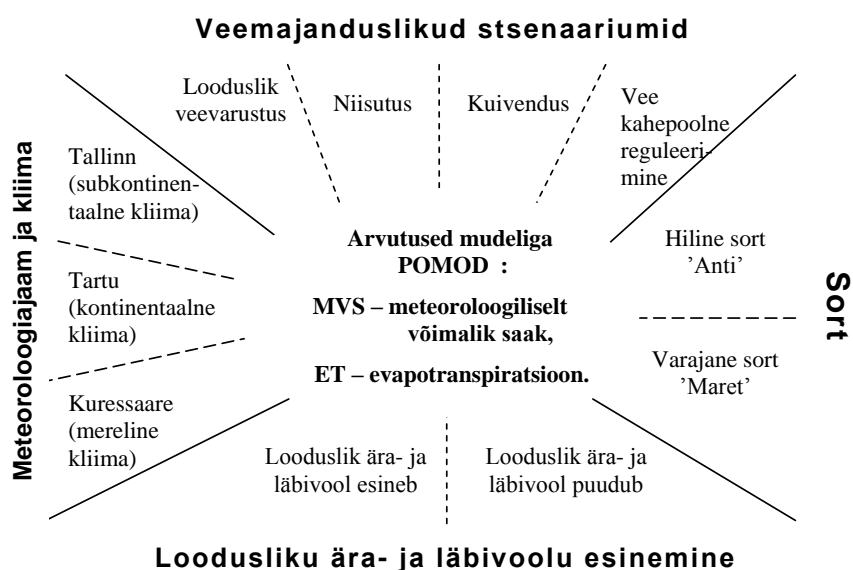
Kliimanormidesse valatud keskmine ilmastik, mis meil oleks paljude põllukultuuride kasvatamiseks ideaalilähedane, ei realiseeru tegelikes oludes kunagi. Järelikult on midagi (päikesekiirgus, soojus, vesi) vahel puudu ja vahel liiast. Eks paljuski sõltub see lapsukesest – kasvatatavast kultuurist. Kirjanduses on enam tähelepanu pööratud põuale ja veedefitsiidi negatiivsele mõjule (näit. MacKerron and Jefferies, 1986; Haverkort et al., 1990; Karafyllidis et al., 1996; Onder et al., 2005). See on ka arusaadav, kuna suurem osa maakera põllumajanduslikest ja tihedalt asustatud aladest asub kuiva kliimaga piirkondades. Samuti ennustavad kliimamudelid paljudel aladel põuaohu suurenemist (IPCC, 2013). Vastupidiselt on Eesti põllumajandusmaadel enam tähelepanu pööratud kuivendusele kui niisutusele. 1980-ndate esimeses pooles oli kuivendusega hõlvatud 85% (800 000 ha) haritavast maast (Tõnismäe et al., 1998), millest praeguseks on jäänud kasutusse 590 000 ha (Maaparandussüsteemide register, <http://msr.agri.ee/Aruanded.aspx> [16.05.2016]). Niisutusega ala on olnud palju väiksem (maksimaalselt 14 000 ha) ja praeguseks kahanenud 3700 hektarile, millest peamise osa hõlmab veerežiimi kahepoolse reguleerimise raames toimiv dreenniisutus (Maaparandussüsteemide register). Kartulikasvatuses on niisutuse kasutamise andmed 25 ha kohta (Eesti statistika, <http://pub.stat.ee/px-web.2001/Dialog/Saveshow.asp> [16.05.2016]). Siiski on Eesti kartulikasvatajad niisutuse vastu huvi üles näidanud. Käesolevas artiklis vaatame, kuidas mõjutavad meie ilmastikuolud kartuli veega varustatust, kui palju ja kui sageli jääb sademetega saadavast veest puudu ning kui tihti ja kuivõrd on seda üleliia, ja kuidas avaldub see saagikuses. Tulemused on saadud matemaatilise mudeli abil ja vastavad tingimustele, kus agrotehnika saagikust ei limiteeri.

2. Andmed ja meetodika

Uurimus põhineb arvutustel kartuli dünaamilise mudeliga POMOD (Kadaja, 2004a; Kadaja ja Tooming, 2004). Vaatluse all oli kaks sorti: varajane 'Maret' (Tsahkna jt., 2003) ja hiline 'Anti' (Sarv ja Koppel, 1995) ning kolm asukohta, mille ilmastikku kajastavad Tartu, Tallinna ja Kuressaare meteoroloogiajaamade andmed. Tartu kajastab kontinentaalset, Tallinn subkontinentaalset ja Kuressaare merelist kliimat (Jaagus ja Truu, 2004). Vaatlusriidade pikkus oli sõltuvalt ilmastikuandmete (õhutemperatuuri, sademete ning

summaarse päikesekiirguse või päikesepaiste kestuse igapäevased andmed) olemasolust 89 a Kuressaares, 92 a Tallinnas ja 111 a Tartus, seda kuni 2011. aastani. Käsitlesime nii loodusliku läbi- ja äravooluga mulla veerežiimi, kui ka varianti, kus äravool on takistatud reljeefi tõttu ja filtratsiooni sügavamale pinnasesse piiravad looduslikud (alus kivim, savi) või inimtekkelised (kännialune tihes) põhjused. Arvutasime meteoroloogiliselt võimaliku saagikuse (MVS) – s.o maksimaalne saagikus, mida on võimalik olemasolevates ilmastikutingimustes saada, kui kõik teised mõjutegurid (mullaviljakus, agrotehnika jne) ei ole piiravad. Vaatluse all oli neli veega seotud stsenaariumit (joonis 1):

- 1) Looduslik veega varustatus.
- 2) Niisutus, mis kõrvaldab veedefitsiidi. Juhul kui arvutatud mulla veevaru langeb alla 60% väliveemahutavusest, lisatakse veebilansi võrrandisse niisutusveena sellest puudu jääv osa.
- 3) Kuivendus, mis kõrvaldab liigvee. Selleks eemaldatakse arvutuse käigus veebilansi võrrandist veevaru see osa, mis ületab väliveemahutavuse.
- 4) Kahepoolne reguleerimine, mis ei lase veedefitsiidil ega liigveel moodustuda.



Joonis 1. Arvutuses kasutatud stsenaariumid ning andmete ja faktorite grupid.

Figure 1. Simulation scenarios (rain-fed, irrigation, drainage, two-way management), and groups of analysed data and factors: stations (left), varieties (right), and with and without natural outflow (below).

Igapäevaselt arvestatud niisutus- ja kuivendusvee kogused summeeritakse vastavateks aastasteks veekogusteks.

Mulla agrohüdroloogilisi parameetreid kasutasime kerge ja keskmise liivsavi jaoks ning nende määramisel lähtusime E. Kitse (1978) poolt toodud andmetest antud piirkondade kohta. Mulla veevaru arvutuse meetoodika on bilansivõrrandi alusel toodud artiklis Kadaja ja Tooming (2004), kuid seda on hiljem täiendatud ära- ja läbivoolu (Kadaja, 2004b) ning evapotranspiratsiooni arvutuse (Saue ja Kadaja, 2014) osas.

Saagikuse muutuse statistilise olulisuse määrasime eraldi iga asukoha ja sordi jaoks, kasutades ühefaktorilist dispersioonanalüüsi (ANOVA), millele järgnes Dunnett *post-hoc* test. Veedefitsiidi ja liigvee ning nende likvideerimisest saadava võimaliku saagimuutuse jaotuse iseloomustamiseks kasutasime tagatuskõveraid, mis näitavad, millise tõenäosusega on konkreetne vaadeldav väärtus ületatud.

3. Tulemused

Looduslike tingimuste korral jääb hilise kartulisordi keskmine MVS vahemikku 51–56 ja varajasel 42–48 t ha⁻¹ (tabel 1). Keskmiselt on hilise sordi saak 18% kõrgem kui varajasel sordil ning erinevused on suuremad Tartu ja väiksemad Tallinna korral. Loodusliku ära- ja läbivoolu tingimustes on asukohtade vahelised erinevused sordi 'Anti' korral Mandri-Eesti ja saarte vahel põhjustatud peamiselt veedefitsiidist, 'Mareti' korral on aga erinevused pigem põhja-lõuna suunalised, st Tallinna ja kahe lõuna poole jääva asukoha vahel.

Varajase sordi saagikuse erinevus Tartu ja Tallinna vahel on peamiselt tingitud põhjapoolse merelähedase koha madalamast õhutemperatuurist ja enamast päikesepaistest, mis võimaldab suurema lehepinna moodustumist. Hilise sordi lehepinna loomuosaselt suurem ja samuti on pikema kasvuaeg tõttu suurem ka algfaasis esinenud erinevuste kompenseerimise võimalus (Saue ja Kadaja, 2014). Läbi- ja äravoolu puudumine tasandab MVS erinevust uuritud asukohtade vahel (Kadaja ja Saue, 2016). Looduslike tingimuste korral ei esine MVS aegriidades üheski vaadeldud kohtadest usaldatavat trendi.

Veekulu, mida väljendab evapotranspiratsioon, on looduslikes tingimustes olnud 210–280 mm (tabel 1). Mandri-Eesti jaamade andmeil on evapotranspiratsioon 19–24% suurem kui Kuressaares. Erinevus sortide vahel on 7–8%. Kultuuri veetarvet iseloomustab potentsiaalne evapotranspiratsioon, mis vastab evapotranspiratsioonile veerežiimi kahepoolse reguleerimise korral ning on loomupäraselt suurem hilisel sordil, seda 10–12% võrra. Potentsiaalne evapotranspiratsioon on mingil määral sõltuvuses päikesekiirguse hulgast ja vegetatsiooniperioodi pikkusest ning on seetõttu kõige suurem Kuressaares. Tartu puhul on vegetatsiooniperioodi pikkus oluline peamiselt hilise sordi korral. Väiksem tegelik evapotranspiratsioon ja suurem veetarve Kuressaares avaldub enam kui kahekordse veedefitsiidi erinevusena Mandri-Eesti asukohtade ja Kuressaare vahel. Seetõttu on Saaremaal niisutusest oodata oluliselt suuremat saagilisa kui Mandri-Eestis – hilisel sordil paljuaastase keskmisena ligi veerandi, varajasel viiendiku võrra.

Vee ülejääk sõltub suuresti vee läbi- ja äravoolu olemasolust või selle puudumisest. Esimesel juhul esineb liigvett tugevate sadude korral suhteliselt lühikest aega ja selle mõju on saagile alla 3% ning pole vaadeldud kohtades statistiliselt oluline. Päiguti annaks kuivendus pigem negatiivse tulemuse, seda tänu kevadisele liigniiskusele järgneva põua süvenemise tõttu. Läbi- ja äravoolu tõkestamise korral on põua ja liigvee mõju Mandri-Eestis enam-vähem ühesugune, varajase sordi korral on liigvee mõju isegi suurem kui põua mõju, merelise kliima korral ei ole aga kuivendus pikemas perspektiivis vajalik.

Enamsaak veerežiimi kahepoolsest reguleerimisest osutub enamasti veidi suuremaks, kui ainult kuivendusest või niisutusest saadud enamsaakide summa (tabel 1) ning saagi suurenemine on kõigil juhtudel statistiliselt usaldatav. Kuressaares on enamsaak veerežiimi kahepoolsest reguleerimisest määratud siiski ainult veedefitsiidiga.

Tabel 1. Keskmised paljuaastased näitajad kartuli loodusliku meteoroloogiliselt võimaliku saagi (MVS), selle saamiseks kasutatud vee (evapotranspiratsioon), vee puudu- ja ülejäägi ning nende leevendamisest tuleneva saagimuutuse ja kartuli veetarbe kohta.

Table 1. Mean long time values of meteorologically possible yield (MVS) and evapotranspiration in rain-fed conditions, water deficit and excess together with the gains of yield (%) from eliminating these impacts, gain from two-way water management (%) and potato water demand.

Variant	Sort	Meteo-jaam	Looduslik MVS, t/ha	Looduslik veekasutus, mm	Vee defitsiit, mm	MVS muut niisutusest, %	Vee ülejääk, mm	MVS muut kuivendusest, %	MVS muut kahepoolsest, %	Veetarve, mm
Läbi- ja äravooluga	'Anti'	Tallinn	55,3	274	57,7	8,6	* 27,6	-0,3	9,7	* 316
		Tartu	55,9	280	54,1	7,8	* 36,6	1,6	11,2	* 323
		Kuressaare	51,1	226	117,2	26,4	* 8,6	-1,1	26,4	* 333
	'Maret'	Tallinn	48,3	253	44,7	5,1	31,2	0,7	6,7	* 286
		Tartu	45,0	258	38,8	3,8	39,2	2,5	7,3	* 288
		Kuressaare	44,2	210	99,4	19,7	* 9,8	-0,7	19,8	* 299
Läbi- ja äravooluta	'Anti'	Tallinn	52,1	280	50,0	7,1	50,0	7,0	16,6	* 316
		Tartu	52,3	284	47,4	6,9	59,3	9,2	* 18,9	* 323
		Kuressaare	52,0	234	109,9	23,6	* 18,2	-1,3	24,3	* 333
	'Maret'	Tallinn	45,4	258	39,7	4,2	55,3	7,7	13,7	* 286
		Tartu	42,5	261	35,3	3,2	61,3	8,9	* 13,6	* 288
		Kuressaare	44,5	216	94,5	18,3	* 19,9	-0,4	19,1	* 299

* näitab, et saagimuutus on statistiliselt oluline ($p < 0,05$).
 indicates that gain of yield is statistically significant ($p < 0.05$).

Kõige äärmuslikemate aastate vaatlemiseks tööme niisutusest oodatava enamsaagi välja loodusliku ära- ja läbivoolu olemasolul ning kuivendusest selle puudumisel (tabel 2). Tallinna ja Tartu andmetel ületab sellise võrdluse korral maksimaalne saagikadu liigveest (ehk tulu kuivendusest) peaaegu kahekordselt veedefitsiidist põhjustatud saagikao, ületades hilise sordi korral isegi keskmist MVS taset. Suurimad veedefitsiidist põhjustatud saagikad esinevad Kuressaares 1969. ja 1975. aasta andmeil, kuigi sademete summa on võrdlusaastal 1992 olnud Tartus isegi väiksem kui Kuressaares. Siin hakkab rolli mängima Saaremaa muldade väiksem väliveemahutavus ja mõningal määral ka suurem summaarne päikesekiirgus, mis suurendab aurumist.

Vastupidised „rekordid“, kus veerežiimi reguleerimine põhjustas saagikuse vähenemise, esinesid 'Antil' siis, kui läbi- ja äravool puudus: niisutuse korral vähenes saagikus Tartus 2009. aastal 8,6 t/ha, kuivenduse puhul Kuressaares 1996. aastal 24,1 t/ha. Esi- mesel juhul järgnes põuasele kevadele väga sademeterikas juuni ja juuli. Teisel juhul

mängisid rolli rohked sademed juuli algul ja sellele järgnenud põuane saagi valmimise aeg juuli teises pooles ja augustis.

Tabel 2. Kuivenduse ja niisutuse maksimaalne mõju saagile ning sademete summa perioodi 1923–2011 äärmuslikel aastatel. Sademed on varajase sordi ‘Maret’ korral summeeritud maist juulini ja hilise sordi ‘Anti’ korral maist augustini.

Table 2. Maximum yield gain from irrigation (left) and drainage (right), and precipitation for these most extreme years within the period 1923–2011. Precipitation is summed from May to July for the early variety ‘Maret’ and from May to August for the late variety ‘Anti’.

Sort	Meteo- jaam	Niisutus olemasolul		läbi- ja äravoolu Sademed, mm	Kuivendus puudumisel		läbi- ja äravoolu Sademed, mm
		Saagilisa, t ha ⁻¹	Aasta		Saagilisa, t ha ⁻¹	Aasta	
‘Anti’	Tallinn	31,4	1950	104	62,0	1981	440
	Tartu	36,2	1992	108	63,0	1998	330
	Kuressaare	41,6	1975	114	1,7	1943	249
‘Maret’	Tallinn	17,5	1950	95	37,0	1981	320
	Tartu	22,9	1992	72	43,2	1985	328
	Kuressaare	26,4	1969	92	2,6	1928	217

Tabel 3. Veedefitsiidi ja liigvee ning nende kõrvaldamisest enam kui 10 ja 25% saadava saagilisa esinemise sagedus protsentuaalselt kõigist vaatlusalustest aastatest. Eraldi on toodud välja ka veedefitsiidi ja liigvee esinemissagedus samal aastal.

Table 3. Frequencies (percentages of all years) of water deficit (left) and excess (right), the yield gains over 10 and 25% obtained from water management, and of water deficit and excess in the same year.

Sort	Koht	Läbi- ja äravooluga				Läbi- ja äravooluta			
		Veede- fitsiit	Saagilisa niisutusest		Veedefitsiit ja liigvesi samal aastal	Liig- vesi	Saagilisa kuivendusest		Veedefitsiit ja liigvesi samal aastal
			10%	25%			10%	25%	
‘Anti’	Tallinn	75,0	25,0	13,0	53,3	83,7	17,4	14,1	54,3
	Tartu	77,5	26,1	10,8	57,7	85,6	22,5	13,5	55,9
	Kuressaare	96,6	66,3	38,2	36,0	48,3	-	-	43,8
‘Maret’	Tallinn	70,7	16,3	7,6	48,9	82,6	21,7	16,3	48,9
	Tartu	73,9	16,2	2,7	55,0	85,6	22,5	13,5	54,1
	Kuressaare	95,5	64,0	34,8	33,7	49,4	-	-	42,7

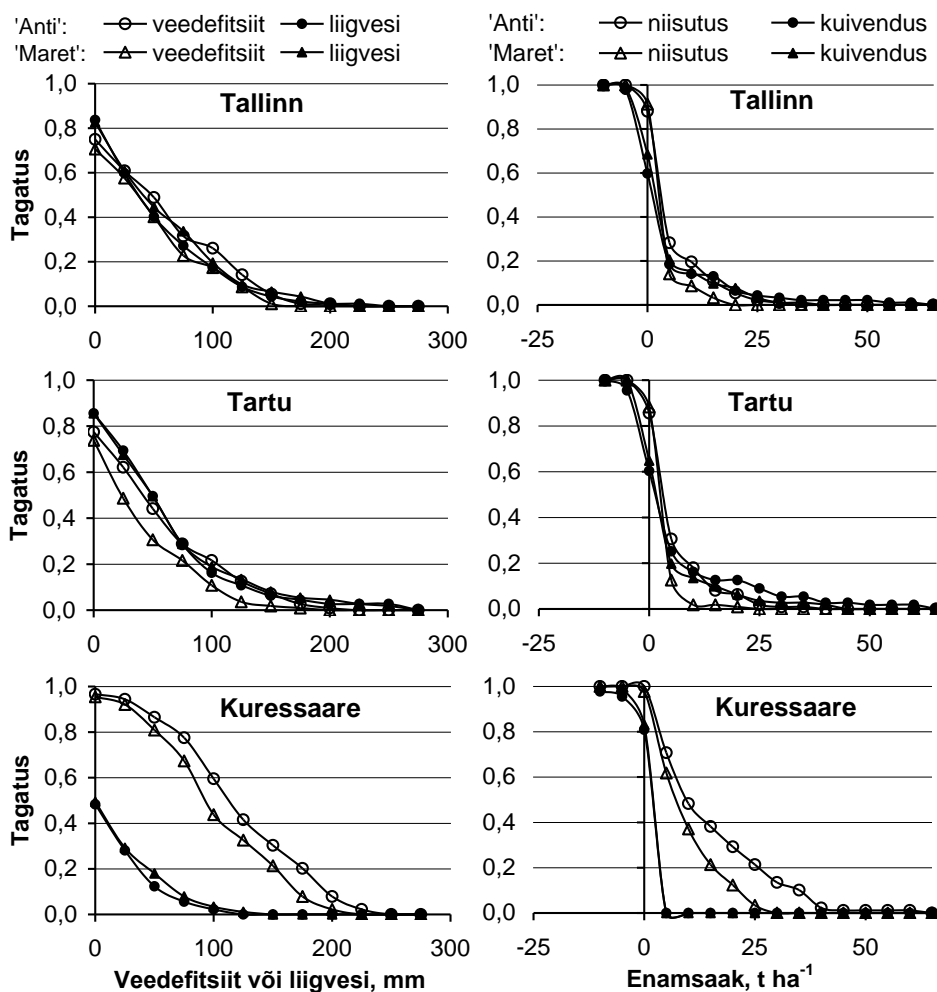
Mandri-Eestis on nii veedefitsiidi kui ka läbivoolu puudumisel liigvee esinemise sagedus suhteliselt sarnane (tabel 3) ja esineb enam kui 70% aastatest. Sealjuures on hilise sordi korral mõõdukas saagikadu (>10%) sagedamini põhjustatud veepuudusest, suurem saagikadu (>25%) aga liigveest. Varajase sordi korral on alati sagedasem liigveest tingitud

saagikadu. Sortidevahelist erinevust saab ühelt poolt põhjendada sageli kevadeti esineva liigveega, mis varem tärkavat varajast sorti enam mõjutab kui hilist. Varajase sordi väiksem lehepind võrreldes hilisema sordiga põhjustab omakorda väiksema evapotranspiratsiooni kui hilisel sordil. Veedefitsiidi ja liigvee esinemist samal kasvuperioodil kohtab Mandri-Eestis igal teisel aastal.

Merelise kliima tingimustes esineb põuda peaaegu igal aastal ning üle 25% saagilisa on niisutusest oodata vähemalt igal kolmandal aastal. Kuigi episoodilist vee ülejääki (väga sageli kevadeti) kohtab pea igal teisel aastal, on selle mõju saagikusele väike ega küüni ühelgi vaadeldud aastatest kümne protsendini. Paljudel aastatel annab ajutise liigvee esinemine merelises kliimas pigem positiivse tulemuse, suurendades mulla veevaru järgnevaks põuaperioodiks.

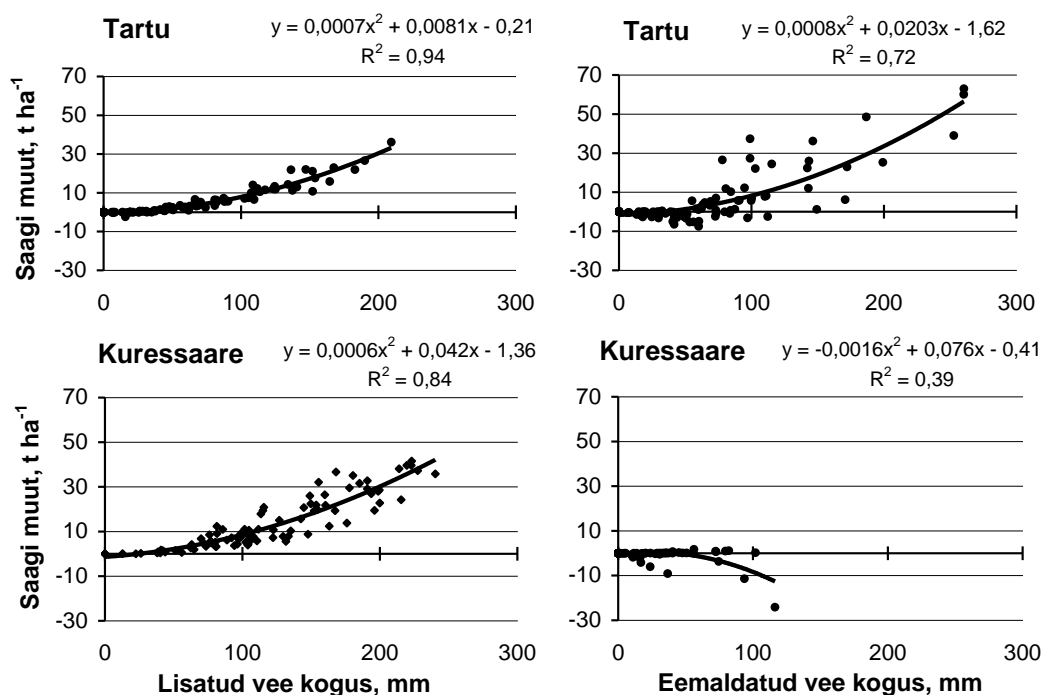
Kasvuperioodide veedefitsiidi ja liigvee koguste (ära- ja läbivooluta) jaotused on omavahel kõige sarnasemad Tallinnas (joonis 2). Tartu korral on enamuses diapsoonist märgata kerget liigvee ülekaalu, Kuressaares on aga veedefitsiit ainuvalitsev. Analoogne on olukord ka veedefitsiidi ja liigvee poolt põhjustatud saagikadudes ehk enamsaagis, mida niisutus ja kuivendus võimaldaks saada. Seega võib mitte ainult saagikuse keskmise väärtuse, vaid ka selle jaotuste põhjal öelda, et mida merelisem on kliima, seda suurem on vajadus niisutuse, mida mandrilisem, seda enam kuivenduse järele.

Saagi muutus on niisutuse korral lisatud ja kuivenduse korral ärajuhitud vee kogusega kõige paremini seostatav teise astme polünoomi järgi (joonis 3). Niisutusega lisatav ega ka kuivendusega eemaldatav vee kogus alla 50 mm ei avalda saagikusele märgatavat mõju. Niisutuse vajadus, mis ületab 50 mm kasvuperioodil, on hilise sordi korral 44–49% ja varase sordi korral 31–40% aastatest. Kuressaare korral on see piir ületatud enam kui 80% aastatest. Ka sademetega tulnud vee ülejääk ületab Tallinnas ja Tartus ära- ja läbivoolu puudumisel antud piiri 40–50% aastatest. Kui äravool pole takistatud, on selliste aastate arv märgatavalt väiksem. Kuressaare korral on selliseid aastaid üksikuid ja kuivendus on ka nende korral pigem negatiivse mõjuga.



Joonis 2. Veedefitsiidi ja liigvee (vasakpoolne tulp) ning nende likvideerimisest niisutuse või kuivenduse abil tekkinud saagimuutuse (parempoolne tulp) tagatuskõverad. Veedefitsiiti ja niisutust on vaadeldud ära- ja läbivoolu olemasolu, liigveti ja kuivendust selle puudumise tingimustes.

Figure 2. Exceedance probabilities of water deficit (O, Δ) and excess (left column) and change in yield due to irrigation (O, Δ) or drainage (right column). Water deficit and irrigation are observed in the case of water outflow (runoff + percolation to deeper ground) and water excess in the case of its absence.



Joonis 3. Saagimuutuse sõltuvus niisutusega lisatud või kuivendusega eemaldatud vee kogusest hilise sordi 'Anti' korral. Niisutust on vaadeldud ära- ja läbivoolu olemasolu, kuivendust selle puudumise korral.

Figure 3. Dependence of yield change on irrigation and drainage water amounts in case of the late variety. Irrigation (left) is observed in the case of water outflow, drainage (right) in the case of its absence.

Joonisel 3 toodud graafikutel niisutusvee koguse mõjust saagikusele hakkab silma, et niisutusest suurema enamsaagiga Kuressaarel on korrelatsioonikoefitsient madalam kui Tartul. Põhjuseks on punktiparve kahestumine Kuressaare seosegraafikul – alumisse ossa sattunud punktid kirjeldavad aastaid, mil veedefitsiit esines varakult, mais või juunis, kui kartul on vee puudujäägi suhtes vähem tundlik, ülemisse ossa aga need, mil põud esineb mugulate moodustumise ja kasvu perioodil, st juulis. Selline kahestumine esineb tugevamalt merelisema kliima (ka Tallinn) ja hilise sordi korral. Kontinentaalse kliimaga Tartu puhul esineb kevadisi ja kevadsuviseid sademeid rohkem kui mereäärsetes piirkondades ja kasvuperioodi alguse veedefitsiit on seetõttu harv nähtus; varajane sort on aga varasema kasvuperioodi põua suhtes (lehepind jääb väiksemaks) enam tundlik.

4. Kokkuvõtteks

Saadud tulemused näitavad, et juhul kui taimede kasv ei ole limiteeritud toitainete vähesusest ega puudulikust agrotehnikast, kummitab Mandri-Eesti kontinentaalses kliimas kartulit paljudel aastatel ligilähedase tõenäosusega nii põud kui ka liigniiskus. Viimane rohkem tingimustes, kus vee äravalgumine on takistatud looduslike ja nõrgumine süga-

vamale pinnasesse kas looduslike (alus kivim, savi) või inimtekkeliste (künnialune tihes) tegurite poolt. Üleminekul merelisele kliimale väheneb liigvee ja suureneb veedefitsiidi negatiivne mõju. Saaremaal asuva Kuressaare meteoroloogiajaama andmetel esineb veedefitsiiti rohkem kui 95% aastatest ja vähemalt igal kolmandal aastal annaks niisutus enam kui 25% saagilisa. Kuivendus oleks seal pigem negatiivse mõjuga.

Mandri-Eestis annaks saagilisa kõige enam kahepoolne veerežiimi reguleerimine, mis annab mõnevõrra suuremat enamsaagiefekti, kui eraldi võetud niisutuse ja kuivenduse mõju summaarselt.

Põuast või liigniiskusest põhjustatud saagikadu on seotud puuduva või liias oleva vee kogusega teise astme sõltuvuse järgi, kusjuures ei summaarne veedefitsiit ega ka liigvesi kuni 50 mm vegetatsiooniperioodi kohta ei anna veel märgatavat saagikuse muutust.

Tänuavaldused

Käesolev töö on valminud Eesti Maaeluministeeriumi finantseeritava rakendusüritingu „Agrometeoroloogilised prognoosid ja kokkuvõtted“ ning COST projekti *ES1106* EURO-AGRIWAT toetusel.

Kirjandus

- Jaagus, J., Truu, J., 2004. Climatic regionalisation of Estonia based on multivariate exploratory techniques. *Estonia. Geographical Studies* 9, 41–55.
- Haverkort, A.J., Van de Waart, M., Bodlaeader, K.B.A., 1990. The effect of early drought stress on numbers of tubers and stolons of potato in controlled and field conditions. *Potato Res.*, 33, 89–96.
- IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Kadaja, J., 2004a. Kartuli produktiooniprotsessi dünaamiline mudel ja selle rakendused. *Agraarteadus*, 15 (2), 74–89.
- Kadaja, J., 2004b. Water sub-model of a dynamic agroecosystem model and an empirical equation for evapotranspiration. In: Isemer, H.J. (Ed.), *Fourth Study Conference on BALTEX. Conference Proceedings. International BALTEX Secretariat*, pp. 184–185.
- Kadaja, J., Saue, T., 2016. Potential effects of different irrigation and drainage regimes on yield and water productivity of two potato varieties under Estonian temperate climate. *Agricultural Water Management*, 165, 61–71.
- Kadaja, J., Tooming, H., 2004. Potato production model based on principle of maximum plant productivity. *Agric. For. Meteorol.*, 127, 17–33.
- Karafyllidis, D.I., Stavropoulos, N., Georgakis, D., 1996. The effect of water stress on the yielding capacity of potato crops and subsequent performance of seed tubers. *Potato Res.*, 39, 153–163.
- Kitse, E., 1978. *Mullavesi*. Valgus, Tallinn.
- MacKerron, D.K.L., Jefferies, R.A., 1986. The influence of early soil moisture stress on tuber numbers in potato. *Potato Res.*, 29, 299–312.
- Onder, S., Caliskan, M.E., Onder, D., Caliskan, S., 2005. Different irrigation methods and water stress effects on potato yield and yield components. *Agric. Water Manage.* 73, 73–86.
- Sarv, J., Koppel, M., 1995. Anti. <http://www.etki.ee/index.php/eng/seeds/varieties2#anti> .

- Saue, T., Kadaja, J., 2014. Water limitations on potato yield in Estonia assessed by crop modelling. *Agric. For. Meteorol.*, 194, 20–28.
- Tsahkna A., Anderfeld A., Koppel M., 2003. Maret. <http://www.etki.ee/index.php/eng/seeds/varieties2#maret> (09.02.16.).
- Tõnismäe, M., Alekand, K., Tamm, V., Metsur, M., Ratassepp, E., Virma, F., Tamm, T., Tullus, H., Pikk, J., Tamberg, O., 1998. Sustainable water management strategies for the land drainage and irrigation sector—Estonia. FAO, Rome.

Estonian climate and water supply for potato crop: deficit as well as excess

Jüri Kadaja and Triin Saue
Estonian Crop Research Institute

Summary

To examine the impact of water limitations on potato yields, the crop model POMOD was used. The effects of irrigation, drainage and two-way water management (irrigation + drainage) were simulated with and without natural outflow (percolation to deeper soil layers and runoff). Calculations were performed for two Estonian mainland locations (sub-continental Tallinn for the period 1920–2011, continental Tartu, 1901–2011) and one insular, maritime region (Kuressaare, 1923–2011), and for an early and a late potato varieties, ‘Maret’ and ‘Anti’, accordingly (Fig. 1).

In the reference series without irrigation and drainage, the average yields were 18% higher for the late variety compared to the early variety (Table 1). In case of natural outflow, the mean reference yield in Kuressaare was lower than in mainland locations, its absence smoothes these differences. The highest and most statistically significant ($P < 0.05$) increase in yield was achieved from the two-way water management. In the case of natural outflow, the effect of irrigation prevailed over drainage in all locations. Without outflow, the effects of irrigation and drainage were comparable in the mainland, but the effect of drainage remained negative in Kuressaare (Table 1, Fig 2). Generally, a positive effect on tuber yield occurred more often from irrigation than from drainage. However, in some cases the highest yield losses were observed in years with excess water (Table 2). The extra yield depended on the amounts of irrigation or drainage by a second order polynomial (Fig. 3). Irrigation and drainage water amounts under 50 mm did not have any positive effect on yield. The need for irrigation is highest in maritime climate covering Estonian islands and western and north-western coast. In Kuressaare, irrigation increases the yield more than 25% in 35–38% of years (Table 3) and decreases its variability two-fold. In continental locations, if natural outflow is restricted, implementation of two-way water management projects should be considered, as its effects on yield quantity as well as on stability exceed the sum of separate effects from irrigation and drainage.

Põllukultuuride soojusega varustatuse ja kasvuperioodi muutused Eestis kliima soojenemisel

Triin Saue^{1,2}, Jüri Kadaja¹, Peeter Viil¹ ja Karin Käremaa²

¹Eesti Taimikasvatuse Instituut, ²Tallinna Tehnikaülikooli Meresüsteemide Instituut

1. Sissejuhatus

Ilmastik ja kliima omavad põllumajanduslikus tootmises olulist rolli. Mida paremini sobivad kultuuride kasvunõuded kokku kohaliku kliima tingimustega, seda paremini kultuurid kasvavad ja seda suuremaid saake neilt saame. Põllukultuuride saakide iga-aastased kõikumised, mis võivad ulatuda kordadesse, on sobiva agrotehnika korral umbes 80% ulatuses seotud ilmastikuga. Peamised meteoroloogilised tegurid, mis mõjutavad põllukultuuride saaki, on taimedele kättesaadav soojus, kasvuperioodi pikkus ja arengu seisukohalt oluliste fenoloogiliste faaside ning nende vahelise perioodi õhutemperatuur, samuti sademete hulk ja ajaline jaotus.

Kliima muutumine on juba tänapäeva põllumajandust mõjutanud või mõjutamas, põhjustades näiteks saakide vähenemist ja nende varieeruvuse suurenemist (Peltonen-Sainio et al., 2009b,c, 2010), ning seda peetakse ka peamiseks põhjuseks, miks näiteks hoolimata sordiaretuse jätkumisest ei ole Euroopas nisusaagid enam suurenenud (Brisson et al., 2010). Järgmise saja aasta jooksul on oodata globaalse temperatuuri jätkuvat tõusu. Prognoositavate muutuste mõju põllumajandusele on Euroopa erinevates osades küllalt erinev (Trnka et al., 2011a) ning võib ka ajaliselt oluliselt varieeruda (Trnka et al., 2011b). On üldiselt aktsepteeritud arvamus, et Põhja-Euroopas põllumajanduse tootlikkus suureneb, eelkõige tingituna taimede kasvuks sobiliku perioodi pikenemisest ja taimedele kättesaadava soojushulga suurenemisest (nt IPCC, 2007, Peltonen-Sainio et al., 2009a, Supit et al., 2010, Olesen et al., 2011). Eestis on aasta keskmise õhutemperatuuri tõus olnud möödunud sajandi keskpaigast alates isegi mõnevõrra kiirem kui maakeral tervikuna.

Käesoleva artikli eesmärgiks on hinnata, kuidas esinenud ning prognoositav kliima soojenemine mõjutab põllukultuuride jaoks olulisi soojusrežiimi näitajaid Eestis: kasvuperioodi pikkust ja sel perioodil kujunevaid temperatuurisummasid, ning milline on nende ajaline ja ruumiline varieeruvus.

2. Andmed ja meetodika

Uuringus kasutasime 11 Eesti meteoroloogiajaama ööpäeva keskmise õhutemperatuuri andmeid perioodi 1965–2013 kohta. Iga jaama andmete põhjal määrasime vegetatsiooniperioodi alguse ja lõpu kuupäeva: temperatuuri püsiva ülemineku üle ja alla 5 °C. Püsivaks üleminekuks kevadel loetakse sellist päeva, millest alates õhutemperatuuri positiivsete hälvete summa +5 °C suhtes ületab sama lävitemperatuuri suhtes kujunenud negatiivsete hälvete summa. Sügisene temperatuuri püsiv langus alla 5 °C leiab aset siis, kui hälvete summa jääb püsivalt negatiivseks. Nende kuupäevade vahelist perioodi temperatuuriga üle 5 °C nimetatakse vegetatsiooni- ehk taimikasvuperioodiks. Analoogselt määrasime aktiivse taimikasvuperioodi ehk ajavahemiku, mil temperatuur on püsivalt üle 10 °C.

Taimede soojusega varustatuse iseloomustamiseks kasutasime aktiivsete ja efektiivsete temperatuuride summasid, mida summeerisime alates vegetatsiooniperioodi algusest kuni selle lõpuni sügisel. Aktiivsete temperatuuride summa saamiseks liidetakse kokku kõik päevakeskmised temperatuurid, mis ületavad teatud lävitemperatuuri. Kuna enamiku põllukultuuride aktiivne vegetatsioon toimub Eesti laiuskraadil tavaliselt alles siis, kui ööpäeva keskmine õhutemperatuur on üle 10 °C, liitsime aktiivsete temperatuuride summa arvutamiseks need ööpäeva keskmised õhutemperatuurid, mis ületavad 10 °C. Põllukultuuride sobivust mingisse piirkonda saab samuti hinnata selle järgi, kui suurt aktiivsete temperatuuride summat nad valmimiseks vajavad.

Aktiivsete temperatuuride summeerimisel läheb arvesse ka see osa ööpäeva keskmisest õhutemperatuurist, mis jääb alla bioloogilise miinimumtemperatuuri ja mida taim ei kasuta. Seepärast kasutatakse taimekasvu seisukohalt olulise soojusrežiimi näitajana ka efektiivse temperatuuri mõistet, mis iseloomustab taimedele kättesaadavat soojust. Efektiivne temperatuur on see osa ööpäeva keskmisest temperatuurist, mis ületab lävitemperatuuri, st on aktiivse temperatuuri ja lävitemperatuuri vahe. Kõige sagedamini kasutatakse efektiivsete temperatuuride arvutamisel lävitemperatuurina 5 °C, kuna üldiselt vastab see meil traditsiooniliselt kasvatatavate kultuuride bioloogilisele miinimumtemperatuurile. Efektiivset üle 5 °C temperatuuri nimetatakse ka taimedele kasulikuks temperatuuriks või füsioloogiliselt aktiivseks temperatuuriks. Antud töös kasutame üle lävitemperatuuride 5, 10 ja 15 °C arvutatud efektiivseid temperatuurisummasid, arvestamaks ka soojalembesemate kultuuride nõudlusi. Kõigi nimetatud näitajate muutused perioodil 1965–2013 määrasime lineaarse trendi järgi.

Prognoositava temperatuurimuutuse arvutamiseks kasutasime AR4 stsenaariumite (IPCC, 2007) põhjal tehtud arvutusi tarkvaraga MAGICC/SCENGEN (Model for the Assessment of Greenhouse-gas Induced Climate Change/SCENario GENerator) (Hulme et al., 2000). Temperatuuri muutused on arvutatud kahe stsenaariumi järgi: tugevat soojenemist prognoosiv A2 ja mõõdukam B1. Temperatuuri võimalike muutuste hindamiseks kasutasime mõlema stsenaariumi korral nelja kliimamudeli prognoosi: USA mudel CCSM-3, Jaapani MIROC3, Saksamaa ECHAM5 ja Suurbritannia HadGEM. Hiljutine uurimus (Jaagus ja Mändla, 2014) näitas, et just nende mudelite abil on võimalik selgitada seniseid temperatuurimuutusi Eestis kõige täpsemalt. MAGICC/SCENGEN andmebaasis on Eesti hõlmatud kolme võrguruuduga, keskpunktidega 58,8N/21,3E (Saarte läänerannik, antud uuringus: Ristna), 58,8°N/23,8°E (Lääne-Eesti: Kihnu, Tallinn, Nigula, Kuusiku) ja 58,8°N/26,3°E (Ida-Eesti: Jõhvi, Türi, Jõgeva, Tartu, Viljandi, Võru).

MAGICC/SCENGEN abil määrasime kuu keskmise temperatuurimuutuse aastateks 2050 (perioodiks 2035–2065) ja 2100 (2085–2115) võrrelduna kontrollaastaga 1990 (1985–2005). Et saada prognoositavaid ööpäeva keskmise õhutemperatuuri andmeid, võtsime aluseks perioodil 1965–2013 mõõdetud ja aastale 1990 detrenditud temperatuuriread ning lisasime iga ööpäeva keskmisele temperatuurile kuu keskmise prognoositava muutuse. Sel moel saime iga stsenaariumi, prognoosiaja ja kliimamudeli kohta 49 võimalikku aastast õhutemperatuuri aegrida. Selline aegridade kogum sisaldab kliimamudelite abil hinnatud keskmise õhutemperatuuri muutust ning säilitab ajaloolistest mõõtmisandmetest pärineva varieeruvuse, millest on eemaldatud trend. Prognoositud aegridade alusel arvutasime, kuidas muutuvad vegetatsiooniperioodi algus, lõpp ja kestus ning milliseks kujunevad tulevikus temperatuurisummad. Hindamiseks, kas prognoositud tähtajad ja temperatuurisummad erinevad statistiliselt oluliselt mõõdetud näitajatest,

võrdlesime Studenti t-testi abil perioodi 1965–2013 detrenditud aegridu prognoositud aegridadega. Varieeruvuse kirjeldamiseks kasutasime tagatuskõveraaid, mis näitavad, millise tõenäosusega on vaadeldava parameetri mingi väärtus ületatud.

3. Tulemused

3.1. Toimunud muutused 1965–2013

Vegetatsiooniperiood (ööpäeva keskmine temperatuur üle 5 °C) algab kõige varem Kagu-Eestis ja kõige hiljem Lääne-Eestis, suhteliselt hilja saabub kevad ka Põhja-Eestis ning Peipsi järve põhja- ja läänekaldal (tabel 1). Vegetatsiooniperioodi lõpp esineb Mandri-Eesti sisealal kuni nädala jagu varem kui rannikul. Vegetatsiooniperioodi pikkus on Eestis ligi 6 kuud, pikenedes põhjast lõuna suunas. Kõige pikem on see periood Pärnu lahe rannikul. Perioodil 1965–2013 on vegetatsiooniperiood vaadeldud jaamade andmetel keskmisena pikenenud trendi järgi 3 nädala võrra (tabel 1), eelkõige tuleneb see vegetatsiooniperioodi alguse nihkumisest varasemaks. Vegetatsiooniperioodi pikenedes ei ole statistiliselt usaldusväärne Kesk-Eestis (Kuusiku, Türi), kus nii kevadine kui sügisene nihe on teiste jaamadega võrreldes väiksem. Suurim kevade varasemaks nihkumine on toimunud Kagu-Eestis (Võru, Tartu, Viljandi – 20 päeva), väikseim Kirde-Eestis (Jõhvi – 9 päeva), rannikul ja Kesk-Eestis 11–13 päeva. Vegetatsiooniperioodi lõpu kuupäeva muutus ei ole enamuses vaadeldud jaamades perioodil 1965–2013 statistiliselt usaldusväärne; erandiks on siin vaid Jõhvi, kus kasvuperioodi lõpp on trendi järgi 11 päeva hilisem ja nihe on statistiliselt usaldusväärne $p < 0,05$ tasemel. Kuigi sarnases mastaabis muutused on aset leidnud ka saartel, Kihnu ja Ristna näitel, ei osutunud see muutus seal statistiliselt usaldusväärseks.

Aktiivne kasvuperiood temperatuuriga püsivalt üle 10 °C kestab Põhja- ja Kesk-Eestis keskmiselt 130 päeva, Lõuna-Eestis ja läänerrannikul 140 päeva. Külma kevade ja varajase sügisega aastatel on see periood kõigest 90–110 päeva, soojadel aastatel võib aga kesta 160–170 päeva. Aktiivne kasvuperiood on aastate 1965–2013 vahemikus pikenenud keskmiselt 3 nädala võrra. Ka see muutus on suurem Lõuna- ja väiksem Põhja-Eestis.

Aktiivsed temperatuurisummad suurenevad Eestis põhjast lõunasse, mere lähedus ja suurem kõrgus merepinnast mõjuvad summasid vähendavalt. Samuti tuleb kogu vegetatsiooniperioodi soojusrežiimi vaadeldes arvesse võtta, et mere mõjul tekivad olulised erinevused kevade ja sügise vahel – Lõuna- ja Kagu-Eestit iseloomustab soe ja varajane kevad, Lääne-Eestis jätkub sügisel kauem soojust kui mujal. Pikaajalise keskmise aktiivsete temperatuuride summa territoriaalne erinevus ulatub kuni 300° (tabel 2). Konkreetsete põldude mullatemperatuur ja soojusvaru sõltuvad veel mulla liigist, reljeefist ja niiskusréžiimist ning seega võivad ka lähestikku asuvatel põldudel tingimused neist teguritest sõltuvalt suuresti erineda.

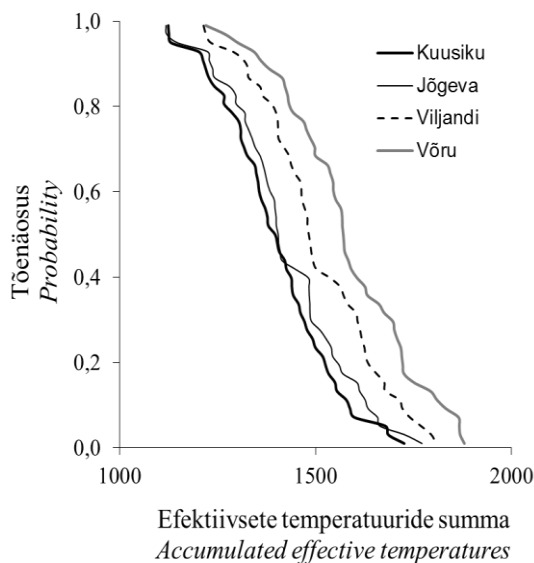
Tabel 1. Vegetatsiooniperioodi ja aktiivse taimekasvuperioodi algus, lõpp ja kestus aastate 1965–2013 keskmisena ja nende näitajate muutus trendi järgi päevades („-“, näitab kuupäeva nihkumist varasemaks, „+“ hilisemaks, kestuse puhul selle pikenemist). Rasvane kiri tähistab statistiliselt olulist muutust ($p < 0,05$).

Table 1. Average beginning, end and duration of vegetation period and active growth period in 1965–2013 and their change by trend in days („-“, denotes date switching earlier, „+“ later). Bold indicates statistically significant change ($p < 0,05$).

Vegetatsiooniperiood (õhutemperatuur püsivalt üle 5 °C) <i>Plant growth period (daily average temperature >5 °C)</i>						
JAAM <i>Station</i>	Algus <i>Beginning</i>	Muut <i>Change</i>	Lõpp <i>End</i>	Muut <i>Change</i>	Kestus <i>Duration</i>	Muut <i>Change</i>
Tallinn	23.04	-12	26.10	+6	186	+18
Jõhvi	22.04	-9	19.10	+11	180	+19
Nigula	21.04	-14	26.10	+8	189	+21
Kuusiku	21.04	-13	22.10	+3	184	+16
Türi	20.04	-12	22.10	+3	185	+15
Jõgeva	20.04	-13	20.10	+9	182	+22
Viljandi	18.04	-20	24.10	+2	189	+21
Tartu	17.04	-20	23.10	+4	189	+24
Võru	16.04	-20	23.10	+6	190	+26
Kihnu	25.04	-12	09.10	+14	198	+26
Ristna	27.04	-11	08.11	+12	195	+23
Aktiivne kasvuperiood (õhutemperatuur püsivalt üle 10 °C) <i>Active plant growth period (daily average temperature >10 °C)</i>						
Tallinn	17.05	-14	23.09	+3	129	+17
Jõhvi	16.05	-9	21.09	+10	128	+19
Nigula	15.05	-14	23.09	+8	130	+24
Kuusiku	15.05	-16	21.09	+8	130	+24
Türi	11.05	-17	22.09	+8	134	+24
Jõgeva	11.05	-16	21.09	+11	133	+27
Viljandi	08.05	-19	23.09	+8	138	+26
Tartu	09.05	-17	23.09	+8	137	+25
Võru	06.05	-15	24.09	+8	141	+23
Kihnu	17.05	-14	04.10	+10	140	+25
Ristna	26.05	-7	03.10	+12	129	+19

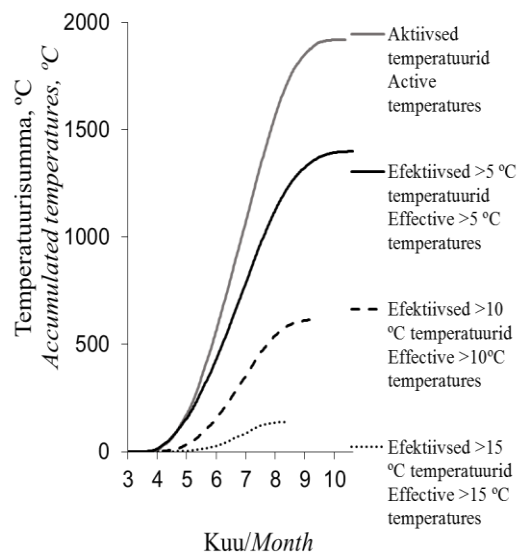
Esinevad ka suured aastatevahelised erinevused: vegetatsiooniperioodi pikkuses võivad need olla kuni 2 kuud, efektiivsete üle 5 °C temperatuuride summas 600–800°, aktiivsete temperatuuride summas 800–1100° (tabel 2).

Soojalembeste kultuuride kasvatamisel on kasulik teada ka üle kõrgemate lävi-temperatuuride ulatuvate päevade temperatuurisummasid. Efektiivsete üle 10 ja üle 15 °C ulatuvate temperatuuride summa on meil vegetatsiooniperioodil keskmiselt vastavalt 600–800° ja 150–250° (joonis 2).



Joonis 1. Efektiivsete (üle 5°C) temperatuuride summa tagatus varieeruvuse iseloomustamiseks 1965–2013 andmetel erinevates jaamades.

Figure 1. Cumulative distribution of effective (>5 °C) temperature sum in 1965–2013 at different stations.



Joonis 2. Keskmise temperatuurisumma kujunemine Kuusikul 1965–2013.

Figure 2. Accumulation of average temperature sum in 1965–2013 at Kuusiku.

Perioodil 1965–2013 võime näha olulist temperatuurisummade suurenemist (tabel 2). Aktiivse kasvuperioodi temperatuurisumma on sellel perioodil suurenenud keskmiselt 400 kraadi võrra ning taimedele kättesaadava soojuse hulk (efektiivsete >5 °C temperatuurisumma) keskmiselt 300 kraadi võrra. Efektiivsete üle 10 ja 15 °C temperatuuride summad (neid tabelis ei näidata) on suurenenud keskmiselt vastavalt 200 ja 100 kraadi võrra. Aktiivse kui ka efektiivse temperatuurisumma muutus on trendi järgi usaldatav kõikides analüüsitud jaamades vähemalt tasemel $p < 0,05$. Temperatuurisumma suuremad muutused on toimunud Lõuna- ja Edela-Eestis, väiksemad Põhja-Eestis.

Sarnaselt aktiivsetele temperatuurisummadele esinevad ka efektiivsete temperatuuride summades märgatavad territoriaalsed erinevused (tabel 2, joonis 1). Et Eestis on soojust suhteliselt vähe, on kasvuperioodil kogunevate temperatuurisummade erinevus 100–200° võrra taimekasvatuse seisukohast juba küllalki oluline.

Tabel 2. Temperatuurisummad ja nende suurenemine trendi järgi perioodil 1965–2013. Muutused on statistiliselt olulised $p < 0,05$ juures kõigis vaadeldud jaamades.

Table 2. Accumulated temperatures and their change by trend in 1965–2013. Changes are statistically significant ($p < 0,05$) at all stations.

Jaam <i>Station</i>	Aktiivsete (> 10 °C) temperatuuride summa <i>Accumulated > 10 °C temperature</i>				Efektiivsete (> 5 °C) temperatuuride summa <i>Accumulated > 5 °C temperature</i>			
	Keskmine <i>Average</i>	Min	Max	Muut Change	Keskmine <i>Average</i>	Min	Max	Muut Change
	Tallinn	1840	1300	2390	270	1420	1150	1760
Jõhvi	1790	1320	2300	350	1380	1080	1690	290
Nigula	1870	1360	2390	400	1450	1140	1770	290
Kuusiku	1820	1320	2300	400	1400	1120	1730	290
Türi	1900	1390	2360	410	1450	1160	1750	300
Jõgeva	1850	1360	2380	410	1430	1120	1770	290
Tartu	1970	1650	2490	490	1510	1170	1870	370
Viljandi	1970	1610	2400	400	1510	1220	1810	290
Võru	2070	1680	2490	440	1580	1220	1880	330
Kihnu	2080	1520	2510	450	1600	1260	1970	340
Ristna	1860	1260	2240	390	1450	1090	1860	330

3.2. Prognoositavad muutused

Mõlema stsenaariumi korral prognoosivad kasutatud mudelid aasta keskmise õhutemperatuuri tõusu. Suuremat temperatuuri tõusu võib oodata külmal poolaastal, samas kui taimekasvuperioodil, aprillist septembrini, jääb soojenemine tagasihoidlikuks, 21. sajandi keskpaigaks 1,3–2,2 °C ja sajandi lõpuks 2,2–4,9 °C.

Kui senini on vegetatsiooniperiood pikenenud peamiselt kevade arvelt, siis jätkuval soojenemisel võib oodata taimekasvuks soojuslikult sobiva perioodi pikenedust ka sügisel. Pikema prognoosi jaoks muutuvad nii stsenaariumite kui mudelite vahelised erinevused juba oluliselt suuremaks, kasvuperiood võib pikeneda maksimaalselt kuni kolme kuu võrra.

Üldise temperatuuritõusu taustal jätkub vegetatsiooniperioodi pikenedust (tabel 3). Isegi kui soojenemine jääb mõõdukaks (B1), võime oodata vegetatsiooniperioodi pikenedust 21. sajandi keskpaigaks 17–20 päeva võrra võrreldes aastaga 1990; suurema soojenemisega stsenaariumi (A2) järgi võib kasvuperiood pikeneda kuni ühe kuu võrra. Arvutuste kohaselt algab vegetatsiooniperiood aastal 2050 keskmiselt 6–8 ja 11–13 päeva varem (vastavalt stsenaariumitele B1 ja A2) ja lõpeb 10–12 või 15–21 päeva hiljem. Võib oodata ka talve puudumist, kus temperatuur püsib aastaringselt üle 5 °C.

Tabel 3. Vegetatsiooniperioodi alguse ja lõpu keskmise kuupäeva ning kestuse muutus võrreldes aastaga 1990. Kõigis jaamades on prognoositav keskvaartuse muutus statistiliselt oluline $p < 0,05$ juures.

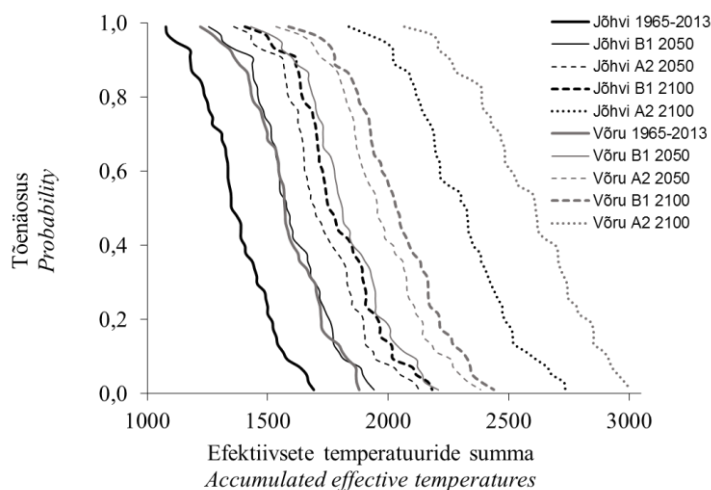
Table 3. Changes in average beginning, end and duration of vegetation period compared to reference year 1990. All changes are statistically significant ($p < 0,05$).

Jaam <i>Station</i>	Aasta/ <i>Year</i> <i>Stsenaarium</i> <i>Scenario</i>	2050			2100		
		Algus <i>Beginning</i>	Lõpp <i>End</i>	Kestus <i>Duration</i>	Algus <i>Beginning</i>	Lõpp <i>End</i>	Kestus <i>Duration</i>
Tallinn	B1	-7	+11	+18	-23	+17	+39
	A2	-13	+15	+28	-43	+38	+81
Jõhvi	B1	-6	+12	+18	-14	+19	+33
	A2	-11	+17	+29	-35	+41	+76
Nigula	B1	-7	+12	+19	-20	+19	+39
	A2	-13	+16	+29	-43	+37	+80
Kuusiku	B1	-8	+12	+20	-16	+18	+34
	A2	-12	+16	+28	-36	+38	+75
Türi	B1	-7	+12	+19	-17	+18	+35
	A2	-13	+17	+29	-42	+41	+83
Jõgeva	B1	-6	+12	+19	-16	+20	+35
	A2	-12	+18	+30	-37	+42	+79
Viljandi	B1	-6	+11	+17	-17	+18	+35
	A2	-12	+16	+28	-41	+40	+81
Tartu	B1	-6	+11	+17	-18	+18	+36
	A2	-11	+17	+28	-39	+40	+79
Võru	B1	-8	+12	+20	-21	+19	+40
	A2	-13	+18	+31	-41	+40	+81
Kihnu	B1	-8	+10	+18	-20	+20	+40
	A2	-13	+19	+31	-51	+35	+86
Ristna	B1	-8	+12	+20	-30	+25	+55
	A2	-17	+21	+37	-58	+36	+94

Tabel 4. Eesti keskmised eeldatavad muutused temperatuurisummades (°C).

Table 4. Prognosed changes in accumulated temperatures (°C), averaged over Estonia.

Aasta/ <i>Year</i> <i>Stsenaarium/Scenario</i>	2050		2100	
	B1	A2	B1	A2
Aktiivsete (> 10 °C) temperatuuride summa <i>Accumulated (> 10 °C) temperatures</i>	300	450	540	1180
Efektiivsete (> 5 °C) temperatuuride summa <i>Accumulated effective (> 5 °C) temperatures</i>	250	375	450	1000
Efektiivsete (> 10 °C) temperatuuride summa <i>Accumulated effective (> 10 °C) temperatures</i>	160	240	290	640



Joonis 3. Efektiivsete (>5 °C) temperatuuride summa jaotus Jõhvis ja Võrus aasta 1990 tasemel ning prognoos aastateks 2050 ja 2100 kahe erineva stsenaariumi põhjal.

Figure 3. Cumulative distribution of effective temperature sums (>5 °C) at Võru and Jõhvi in 1965–2013 and predicted by 2050 and 2100 under two scenarios.

Tabel 5. Väikseim vajalik aktiivsete temperatuuride (>10 °C) summa erinevate soojalembeste kultuuride valmimiseks põhjamaistes pika päeva tingimustes (Eesti NSV..., 1993) ja tõenäosused, millega need on tagatud praegu ning muutuva kliima korral (Võr = Võru, Jõh = Jõhvi).

Table 5. Minimal temperature sum (>10 °C), required for the maturation of several crops and the probability of achieving those sum under present and future climatic conditions (Võr = Võru, Jõh = Jõhvi).

Kultuur/Crop	Temperatuuri de summa (>10 °C Temperature sum >10 °C	Tõenäosus/Probability							
		1965–2013		2050 (B1)		2100 (B1)		2100 (A2)	
		Võr	Jõh	Võr	Jõh	Võr	Jõh	Võr	Jõh
Mais/Maize	Piimküpsus/Milk maturity 1800	0,1	0	0,2	0,1	0,5	0,4	1,0	1,0
	Täisküpsus/Full maturity 2100	0	0	0,1	0	0,4	0,1	1,0	0,8
Tomat/ Tomato	1800	0,1	0	0,5	0,1	0,9	0,4	1,0	1,0
	Päevalill/Sunflower	1600	0,6	0,1	0,95	0,5	0,97	0,9	1,0
Soja/Soy	1800	0,2	0	0,6	0,2	0,9	0,5	1,0	1,0
Puuvill (varane)/Cotton	2700	0	0	0	0	0	0	0,4	0,04
Tsitruselised/ Citrus	3500	0	0	0	0	0	0	0	0

Kliima soojenemisel võime eeldada temperatuurisumma olulist suurenemist (tabel 4). Keskmiste muutuste kõrval on oluline hinnata ka temperatuurisumma varieeruvust (joonis 3). Soojusolud jäävad ka kliima soojenemise korral Eesti siseselt erinevaiks – 21. sajandi keskpaigas võivad tingimused Jõhvis olla võrreldavad praeguste Võru tingimustega. Soojussumma suurenemise tulemusel saab eeldatavalt võimalikuks pikema kasvuajaga ja suurema soojusvajadusega kultuuride ja sortide kasvatamine (Eesti NSV..., 1993). Ka mõõduka soojenemise korral on sajandi lõpuks oodata soojalembeste kultuuride, nagu mais, tomat ja soja, valmimiseks piisavalt soojust keskmiselt igal teisel aastal, Kagu-Eestis praktiliselt igal aastal (tabel 5). Erinevate sortide puhul erineb soojusvajadus siiski oluliselt, mitmetel kultuuridel on olemas ka oluliselt lühema kasvuaja/soojusvajadusega sorte. Põllukultuuride kasvatamise võimalikkuse hindamisel tuleb kindlasti arvestada konkreetse sordi omadusi. Puuvilla ja apelsinide kasvatamine ei muutu meil aga võimalikuks ka tugevat soojenemist prognoosiva stsenaariumi täitumise korral.

4. Arutelu

Ilmastiku mõjud põllumajandusele ei vähene ka tulevikus. Eesti jaoks prognoositakse seoses kliima soojenemisega mõningaid positiivseid arenguvõimalusi, kuid need ei realiseeru iseenesest. Kliimamuutustega kaasnevate positiivsete muutuste ärakasutamiseks ja negatiivsete ilmingute mõju vähendamiseks osutuvad vajalikuks kohanemismeetmed.

Näitena kohanemisvõimest on Eesti põllumajandustootjad juba hakanud mitmeid kultuure varem külvama, sama tendentsi näeme ka mujal Euroopas (Kaukoranta ja Hakala, 2008, Olesen et al., 2011). Peamine positiivne efekt saakidele tulenebki varasemast kevadisest külvivõimalusest, mitte niivõrd valmimise ja koristuse hilisemaks muutmise. Sügise pikenedamine ei too paljude kultuuride kasvatamisele oluliselt kasu, kuna üldise soojenemisega ei muutu meie geograafilises asukohas sügisesed valgustingimused ega pikene lühikesed päevad (Saikkonen jt. 2012). Uued võimalused avanevad viljavahelduseks (Peltonen-Sainio ja Niemi, 2012, Peltonen-Sainio et al., 2014). Reidsma jt. (2010) näitasid, et üle Euroopa reageerivad farmerid juba praegu muutuvatele oludele vägagi efektiivselt just viljavahelduse muutmise kaudu.

Tulevikus on soojussummade suurenemine põhjustatud nii pikemast vegetatsiooni-perioodist kui ka kõrgemast ööpäeva keskmisest õhutemperatuurist. Samas on liiga kõrge õhutemperatuur mitmete kultuuride kasvu ja saagi kujunemise jaoks ebasoodne. Et kasvuperioodi pikenedamisest ja soojussummade suurenemisest tulenev kasu „raisku” ei läheks või koguni kahjulikuks ei pöörduks, on vajalik kohanemine sordiaretuse kaudu (Peltonen-Sainio et al., 2009c, Ingvordsen et al., 2015).

Kirjandus

- Brisson, N., Gate, P., Gouache, D., Charmet, G., Oury, F.-X. & Huard, F. 2010. Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France. – *Field Crops Research*, 119, 201–212.
- Eesti NSV agrokliima ressursid. 1993. Koostanud K. Kivi. Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituut. Tallinn [vene keeles, käsikirjaline materjal].
- Hulme, M., Wigley, T.M.L., Barrow, E.M., Raper, S.C.B., Centella, A., Smith, S.J., Chipanshi, A.C., 2000. Using a Climate Scenario Generator for Vulnerability and Adaptation Assessments: MAGICC and SCENGEN Version 2.4 Workbook. Climatic Research Unit, Norwich, UK.

- IPCC, 2007. Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (Eds. S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller). Cambridge University Press. Cambridge, New York.
- Ingvorsen, C.H., Backes, G., Lyngkjær, M.F., Peltonen-Sainio, P., Jahoor, A., Mikkelsen, T.N., Jørgensen, R.B. 2015. Genomewide association study of production and stability traits in barley cultivated under future climate scenarios. *Molecular Breeding*, 35, 3.
- Jaagus, J., Mändla, K. 2014. Climate change scenarios for Estonia based on climate models from the IPCC Fourth Assessment Report. – *Estonian Journal of Earth Sciences*, 63, 166–180.
- Kaukoranta, T., Hakala, K. 2008. Impact on spring warming on sowing times of cereal, potato and sugar beet in Finland. – *Agricultural and Food Science*, 17, 165–176.
- Olesen, J. E., Trnka, M., Kersebaum, K. C., Skjelvåg, A. O., Seguin, B., Peltonen-Sainio, P., Rossi, F., Kozyra, J., Micale, F. 2011. Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change. – *European Journal of Agronomy*, 34, 96–112.
- Peltonen-Sainio, P. 2012. Crop production in a northern climate. In: Meybeck A. et al (Eds). *Proceedings of a joint FAO/OECD Workshop, Building Resilience to Climate Change in the Agriculture sector* [<http://www.fao.org/docrep/017/i3084e/i3084e15.pdf>] (9.01.2016).
- Peltonen-Sainio, P., Niemi, J. 2012. Protein crop production at the northern margin of farming: to boost or not to boost, that is the question. – *Agricultural and Food Science*, 21, 370–383.
- Peltonen-Sainio, P., Jauhiainen, L., Hakala, K., Ojanen, K. 2009a. Climate change and prolongation of growing season: changes in regional potential for field crop production in Finland. – *Agricultural and Food Science*, 18, 171–190.
- Peltonen-Sainio, P., Jauhiainen, L., Laurila, I.P. 2009b. Cereal yield trends in northern European conditions: Changes in yield potential and its realisation. – *Field Crops Research*, 110, 85–90.
- Peltonen-Sainio, P., Jauhiainen, L., Hakala, K. 2009c. Are there indications of climate change induced increases in variability of major field crops in the northernmost European conditions? – *Agricultural and Food Science*, 18, 206–226.
- Peltonen-Sainio, P., Jauhiainen, L., Trnka, M., Olesen, J.E., Calanca, P.L., Eckersten, H., Eitzinger, J., Gobin, A., Kersebaum, K.C., Kozyra, J., Kumar, S., Marta, A.D., Micale, F., Schaap, B., Seguin, B., Skjelvåg, A.O., Orlandini, S. 2010. Coincidence of variation in yield and climate in Europe. – *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 139, 483–489.
- Peltonen-Sainio, P., Rajala, A., Känkänen, H., Hakala, K. 2014. Improving farming systems in northern European conditions. In: Sadras, V.O., Calderini, D. (Eds.). *Crop Physiology: Applications for Genetic Improvement and agronomy*. Elsevier, Amsterdam.
- Reidsma, P., Ewert, F., Lansink, A.O., Leemans, R. 2010. Adaptation to climate change and climate variability in European agriculture: The importance of farm level responses. – *Europ. J. Agronomy*, 32, 91–102.
- Saikkonen, K., Taulavuori, K., Hyvönen, T., Gundel, P.E., Hamilton, C.E., Vänninen, I., Nissinen, A., Helander, M. 2012. Climate change-driven species' range shifts filtered by photoperiodism. – *Nature Clim. Change*, 2, 239–24.
- Supit, I., van Diepen, C.A., de Wit, A.J.W, Kabat, P., Baruth, B., Ludwig F. 2010. Recent changes in the climatic yield potential of various crops in Europe. – *Agricultural Systems*, 103, 683–694.
- Trnka, M., Olesen, J. E., Kersebaum, K.C., Skjelvåg, A.O., Eitzinger, J., Seguin, B., Peltonen-Sainio, P., Rötter, R., Iglesias, A., Orlandini, S., Dubrovský, M., Hlavinka, P., Balek, J., Eckersten, H., Cloppet, E., Calanca, P., Gobin, A., Vucetic, V., Nejedlik, P., Kumar, S., Lalic, B., Mestre, A., Rossi, F., Kozyra, J., Alexandrov, V., Semerádová, D., Zalud, Z. 2011a. Agroclimatic conditions in Europe under climate change. – *Global Change Biology*, 17, 2298–2318.
- Trnka, M., Eitzinger, J., Semerádová, D., Hlavinka, P., Balek, J., Dubrovský, M., Kubu, G., Štěpánek, P., Thaler, S., Možný, M., Žalud, Z. 2011b. Expected changes in agroclimatic conditions in Central Europe. – *Climatic Change*, 108, 261–289.

Changes in the thermal growing season due to climate change in Estonia

Triin Saue^{1,2}, Jüri Kadaja¹, Peeter Viil¹ and Karin Käremaa²

¹*Estonian Crop Research Institute*

²*Marine Systems Institute of Tallinn Technical University*

Summary

We estimate the changes in the past and the possible change during the ongoing century in the length and timing of the growing season in Estonia. Additionally, changes in accumulated temperatures are analysed. The estimates are based on temperature projections simulated by 4 GCMs. Two greenhouse gas scenarios, B1 and A2, are considered.

During 1965–2013 the vegetation period has prolonged by about 3 weeks by trend, mostly due to the earlier spring. The projected increase in temperature suggests that the growing season will lengthen further, compared to the reference year 1990, on average by 17–30 days by 2050 and 33–94 days by 2100, depending on the emission scenario. Differences between the emission scenarios became quite substantial for the longer target period, indicating large uncertainty of the predictions. While until now, lengthening of the vegetation period has mostly occurred in spring, for the future, the end of thermal vegetation period is also moving significantly. However, lengthening of the growing season in autumn is not likely to support growth as effectively as the lengthening in spring, because of the low light intensity and short days.

The predicted increase in accumulated temperatures during the growing season is considerable. The average accumulated active temperatures are predicted to increase by 300–450 and 550–1200 degree-days and accumulated physiologically effective temperatures by 250–375 and 450–1000 degree-days by 2050 and 2100, respectively. Again, great differences between emission scenarios turn those predictions indefinite. While for the first projection period, the two contrasting scenarios do not diverge too much, later the high-emission A2 scenario projects considerably stronger increases.

Raskuskiirenduse anomaalvälja ja geoidi mudelpinna täpsustamine Eestis

Artu Ellmann¹, Tõnis Oja², Tarmo All³, Harli Jürgenson⁴, Tarmo Kall⁴
ja Aive Liibus⁴

¹Tallinna Tehnikaülikool, geodeesia õppetool; ²Maa-amet, geodeesia osakond; ³Eesti Geoloogiakeskus / Eesti Energia AS; ⁴Eesti Maaülikool, geomaatika osakond

1. Sissejuhatus

Paljude loodusnähtuste uuringutes on vajalik teada kõrgusi merepinnast ning kõrgusmäärangu lähtepinna, geoidi, täpset kuju. Geoid on Maa gravitatsioonivälja ekvipotentsiaalipind, mis langeb kokku „häirimata“ maailmamere pinnaga. Kuna geoid loodpinnana on otseselt mõjutatud Maa siseehituse tiheduse variatsioonidest, siis saab geoidi mudelkuju arvutada Maa raskuskiirenduse mõõtmisandmetest. Kahel viimasel aastakümnel on suurenenud nõudlus geoidi täpsustatud mudeli järele. Ennekõike on see seotud üleilmse asukohamäärangusüsteemi GNSS (*Global Navigation Satellite System*, mille vanim ja tuntum komponent on GPS – *Global Positioning System*) kasutajate vajadustega, kes praktilistes rakendustes peavad kokkuleppelise maa pöördellipsoidi suhtes GNSS-ga määratavad kõrgusväärtused transformeerima traditsioonilisteks absoluutkõrgusteks (merepinna suhtes). Tänapäevast GNSS-ga ja nivelleerimisega saavutatavat kõrgusmäärangu täpsust arvestades oleks vajalik ka teisendamise “abipinnana” kasutatava geoidi mudeli mõnesentimeetriline täpsus.

Taasiseseisvumisjärgselt on Eesti ala täienisti katvaid geoidimudeleid arvanud Forsberg jt. (1996), Denker ja Torge (1997), Ellmann (2002), Jürgenson (2003), Ellmann (2005). Eelmine ametlik geoidimudel EST-GEOID2003 (Jürgenson, 2003) võeti Vabariigi Valituse volitusel Keskkonnaministeeriumi poolt geodeetilist süsteemi kehtestava määrusega Eestis kasutusele juba 2004. aastal.

2003. a geoidimudeli pikalaineline komponent põhines globaalse geopotentsiaali mudeli EGM96 (Lemoine jt., 1998) reaksarendusel kuni astmeni 360 (vastab ruumilisele lahutusele 55 km). Olgu mainitud, et mudel EGM96 põhineb merealadel vähe kvaliteetsetel satelliitaltimeetria andmetel, arvutustes puuduvad hilisemate ja hoopis olulisemate gravimeetriliste satelliitide (CHAMP – *CHALLENGING Minisatellite Payload*, GRACE – *GRAVITY Recovery and Climate Experiment*, GOCE – *GRAVITY field and steady-state Ocean Circulation Explorer*) mõõtmistulemused. Viimase aastakümne kosmoseseire andmed (eriti aga GRACE ja GOCE satelliitidelt) on oluliselt täpsustanud teadmisi Maa gravitatsiooniväljast, kusjuures globaalse geoidi kuju „pikalaineline“ komponent on määratud juba mõne sentimeetri täpsusega. See omakorda võimaldab parendada ka regionaalseid geoidimudeleid.

Aastatel 2008–2011 madalorbiidil tiirelnud Euroopa Kosmoseagentuuri gravimeetrilise üksiksatelliidi GOCE pardale paigutatud raskuskiirenduse gradiomeeter võimaldas varasematega satelliitmõõtmistega võrreldes mitmeid kordi täpsemaid mõõtmisi. GOCE andmetöötluse tulemused võimaldavad geoidi ja raskuskiirendusele mudelitele vastavalt täpsuseid 1 cm ja 1 mGal, kuid tulemuste ruumiline lahutatavus jääb vaid 65 km

piiresse. 2011. aastal publitseeriti esimesed GOCE satelliidi andmetel põhinevad globaalmodelid. Nii oligi käesoleva uurimistöö eesmärgiks 1 cm täpsusega ja kõrge ruumilise lahutatuvusega (1'x2' kaareminutit, ca 1,9x2,0 km) Eesti geoidimudeli arvutamine, milleks töötati välja optimaalne lähenemisviis.

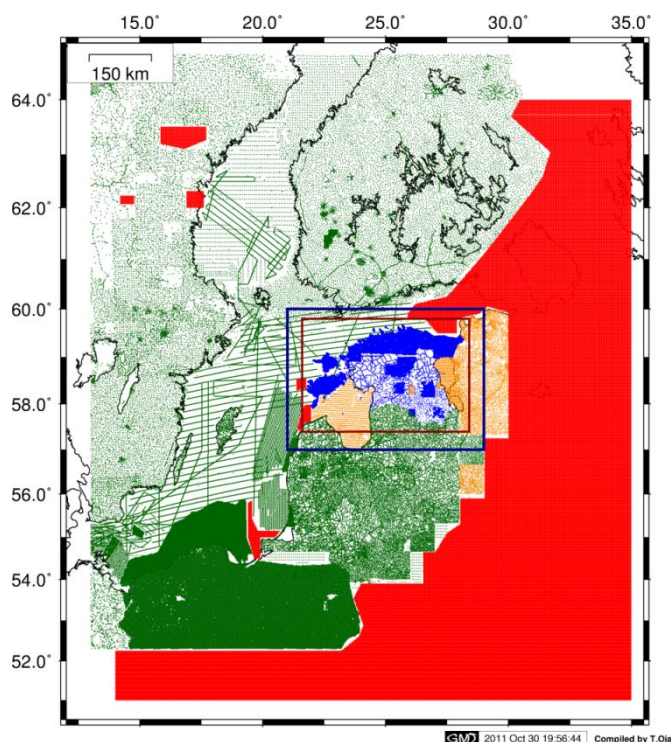
Uue geoidimudeli arvutustega seonduvat tegevust koordineeris Tallinna Tehnikaülikooli (TTÜ) geodeesia õppetool koostöös Eesti Maaülikooli (EMÜ) geomaatika osakonna, Maa-ameti geodeesia osakonna ja Eesti Geoloogiakeskusega (EGK). Seega sama eesmärgi nimel koondati esimest korda ühise mütsi alla peaaegu kõik gravitatsioonivälja modelleerimisega tegelevad Eesti spetsialistid. Tänuväärselt võimaldasid loetletud asutused uurimistööks kasutada olemasolevaid geodeetilisi seadmeid, samuti aidates kanda jooksvaid kulusid ning kaasata oma töötajaid ühistegevusse. Tööde tegemisele aitas oluliselt kaasa ka Eesti Teadusfondi 2008–2011 teadusgrant ETF7356 *Kosmosetehnoloogia rakendused geoidi ja gravitatsioonivälja täpsustamiseks Eesti alal*. Uurimistöö tulemusi on esmaselt kirjeldatud Ellmann jt. (2011) ja Oja jt. (2011) artiklites, nüüd avatakse tausta pisut avaramalt.

Käesoleva artikli ülesehitus on järgmine. Esmalt käsitletakse raskuskiirenduse anomaalvälja modelleerimist ja peamisi tulemusi. Seejärel tutvustatakse geoidiarvutuse põhimõtteid, millele järgneb ülevaade geoidimudeli valideerimisest, saavutatud täpsusest ning kasutusvõimalustest.

2. Geoidiarvutuse lähteandmed ja raskuskiirenduse anomaalvälja modelleerimine

Geoidi modelleerimisel kombineeritakse globaalse geoidi pikalainelist trendi piirkondlike terestriiliste mõõtmistulemustega (lühilaineline komponent), seega mõlemad andmetüübid on ühtlasi sisendandmeteks modifitseeritud Stokes'i (integraal)-valemis. Paraku on meie varasematest uurimustest (Ellmann jt. 2009a ja 2009b) ilmnunud lubamatud vead Läänemeremaade andmetes. Seetõttu viidi eelnevalt läbi geoidiarvutuseks vajalike lähteandmete (gravimeetriliste mõõdistuste andmed, GPS-nivelleerimise punktid, digitaalsed topograafilised mudelid, globaalsed geopotentsiaalvälja mudelid) kogumine, süstematiseerimine, kvaliteedi kontroll ja vigade elimineerimine. Gravimeetriliste andmete ettevalmistamine ongi üks töömahukamaid ning vastutusrikkamaid etappe geoidiarvutuses. On ilmne, et lähteandmete ebapiisav kvaliteet võib "murendada" parimadki teoreetilised parendused arvutusmetoodikas. Täiendavalt oli vajalik teha gravimeetrilisi ja geodeetilisi mõõtmisi puuduliku andmestikuga piirkondades Eestis.

Eesti geoidi mudeli arvutamiseks kaasati graviandmed Eestist ja väljastpoolt ca 550 km raadiuses, ühtekokku ligi 150 000 punkti. Seega tänu koostööle Balti- ja Põhjamaadega kaasati lisaks Eesti ning Läänemere andmetele gravimõõtmiste väärtused ka Lätist, Leedust, Soomest, Rootsist Norrast, Taanist, Saksamaalt, Poolast. Väljaspool Eestit jäävate alade katmisel oli suureks abiks Põhjamaade Geodeesia Komisjoni (NKG) gravimeetriliste punktide andmebaas 2001.a seisuga. Tänu vahepealsetel aastatel Eestis tehtud ulatuslikele gravimeetrilistele mõõtmistele ja EGK andmete ajakohastamisele õnnestus oluline osa 1949–1958.a mõõtmisandmetest asendada täpsemate andmetega, vt ka Ellmann jt. (2009a), Oja jt. (2011), Türk jt. (2011), Märdla jt. (2015). Venemaa ning Valgevene aladelt oli uurimistööks võimalike andmete hulk kahjuks peaaegu olematu. Seega tühikutega alade andmekatvuse tagamiseks kasutati globaalset EGM08 (Pavlis jt., 2009) geopotentsiaali mudelit, mille põhjal genereeriti 186 tuhat punkti, samas kui reaalseid mõõdistuspunkte oli kasutada 268 tuhat (joonis 1).



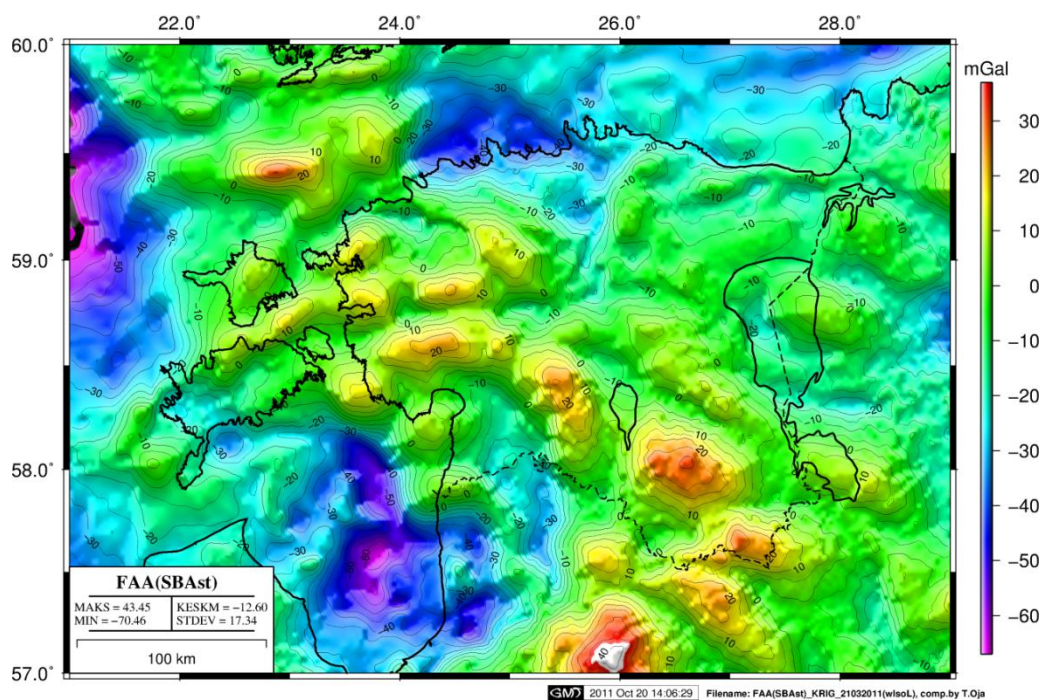
Joonis 1. Geoidiarvutusteks koostatud gravimeetiline andmebaas ligi 0,5 mln punktiga. Sinised punktid – Eesti gravimeetiline andmestik, oranž – NSV Liidu geoloogiaettevõtete poolt mõõdistatud andmestik, rohekad – Põhjamaade Geodeesia Komisjoni andmebaas (sisuga 2001) ning Läti ja Leedu uuemad gravimeetrilised andmed. Punane – globaalse geopotentsiaali mudeli EGM2008 põhjal arvatud punktid (sammuga 1'x2'). Ristkülikutega on tähistatud joonistel 2 ja 3 kujutatud uurimisalad.

Figure 1. Distribution of gravity data (appr. 0.5 million points) used for geoid modeling. Two rectangles enclose the areas depicted in Figs. 2 and 3.

Kogutud punktandmetele tuginedes arvutati Läänemere regiooni kattev raskuskiirenduse anomaalvälja (Δg) mudelpind regulaarse võrgustikuna (rasterpinnana), mille võrgu punktide (pikslite) sammuks valiti samuti 1'x2'. Mudelpind arvutati andmealale vahemikus 51°...65° p.l. ja 14°...35° i.p. Tulemust Eestis ja lähipiirkonnas kujutab joonis 2.

Võrgustamisel oli abiks SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) satelliit-andmestikule ja Maa-ameti aeromõõdistuslike LiDAR (*Light Detection And Ranging*) andmetele põhinev hübriidmaastikumudel.

Anomaalvälja modelleerimiseks ehk siis võrgustamiseks rakendati erinevaid, nii mittestohhastilisi kui stohhastilisi ruumilise interpolatsiooni meetodeid, mis põhinesid splineidel, Delaunay triangulatsioonil, vähimruutude kollokatsioonil ja krigingul. Lisaks võeti arvesse sisendandmete täpsushinnangud, suurendamaks arvutustes täpsema (ja enamasti ka uuema) andmestiku kaalu.



Joonis 2. Raskuskiirenduse vabaõhuanomaaliade $1' \times 2'$ võrgustik Eestis ja lähinaabruses. Ühikuku on mGal, kontuuridevahemik on 5 mGal. Selgelt väljendub maakoore geoloogilise ehituse struktuur (võrdluseks vt. All jt., 2004).

Figure 2. The $1' \times 2'$ gridded free air gravity anomalies in Estonia and its nearest vicinity. The unit is mGal, contour interval is 5 mGal.

Raskuskiirenduse anomaalvälja võrgustike arvutamisel valiti sisendiks ka erinevalt defineeritud anomaaliad. Tavapäraselt võrgustatakse vabaõhu anomaaliade (FAA) väärtusi, kuna FAA mudelpind ongi ju vajalik sisend geoidi modelleerimisel. Uurimaks ja vähendamaks FAA väärtuste ja topograafia omavahelise korreleeruvuse mõju, võrgustati veel ka Bouguer' anomaaliad (nn lihtne BA ehk SBA) ja topograafiliste masside mõjuga arvestava, reljeefiparandiga Bouguer' anomaaliad (CBA). SBA arvutusvalem on

$$\Delta g_B(\Omega) = g(r_t, \Omega) - 2\pi G \rho H - \frac{dg}{dH} H - \gamma_0 \approx g(r_t, \Omega) - 0,0419 \rho H + 0,3086 H - \gamma_0 \quad (1),$$

kus $g(r_t, \Omega)$ on maapinnal (geotsentrilise raadiusega r_t ja asukohas Ω) mõõdetud raskuskiirenduse väärtus, γ_0 on normaalraskuskiirenduse väärtus maaellipsoidi pinnal, G on gravitatsioonikonstant, dg/dH on raskuskiirenduse vertikaalsuunaline gradient, H on mõõtepunkti kõrgus merepinnast ja ρ on topograafiliste masside tihedus. SBA ja CBA pinnamudelitest saab lihtsa teisenduse abiga tekitada FAA pinnad, kaasates eespool nimetatud hübriidmaastikumudelit.

Peale arvukaid katsetusi, võrdlusi ja statistilist analüüsi hinnati täpseimaks raskuskiirenduse anomaalvälja mudelpinnaks võrgustik, mille sisendiks olid SBA väärtused. Arvutusmeetodiks valiti kriging koos anisotroopse variogrammi mudeliga. Empiirilise variogrammi lähendamiseks rakendati astmefunktsiooni

$$f(\psi) = C |\psi|^n \quad (2),$$

kus ψ on mõõtmispunktide vaheline geotsentriline nurkkaugus (kraadides, inglise k *lag distance*), n on aste (*power*) ning lävi (*sill*) parameetri väärtus fikseeriti $C = 100$. Punktandmete dispersiooni väärtuseks võeti $0,7 \text{ mGal}^2$. Näiteks SBA välja modelleerimisel valiti $\psi_{max} = 0,58^\circ$ (suurim kaugus variogrammi arvutuses) ja astme väärtuseks hinnati $n = 1,38$. Variogrammi anisotroopia suunaks ja suhtarvuks (*anisotropy angle, ratio*) hinnati vastavalt $0,0^\circ$ ning $1,83$. Arvutused viidi läbi Golden Software tarkvarapaketiiga Surfer vers. 8.

Raskuskiirenduse SBA ja CBA anomaalväljade mudelpinna määramatuse hindamiseks arvutati jääkhälvete (tulemusmudel võrrelduna algse mõõtmistulemusega) standardhälve $STD_{res} = \pm 0,35 \text{ mGal}$ ning risthinnangu (ühe väärtuse väljajätmisega) standardhälve $STD_{cv} = \pm 0,58 \text{ mGal}$. FAA pinnamudeli korral olid vastavad statistilised näitajad $STD_{res} = \pm 0,55 \text{ mGal}$ ja $STD_{cv} = \pm 0,84 \text{ mGal}$, mis selgelt ületavad BA mudeli vastavaid näitajaid ning kirjeldavad FAA väärtuste suuremat varieeruvust topograafiliste masside mõjul ja seega suuremat signaal-müra suhet (SNR – *signal-to-noise ratio*).

Risthinnangu arvutuses eemaldati mudelpinna arvutusest järgemööda üks sisendpunktiväärtus, millele interpoleeriti uuesti arvutatud mudelist prognoosiväärtus. Eespool esitatud hinnang ongi mõõdetud ja prognoositud väärtuste erinevuste standardhälve, kusjuures arvutusse kaasati kõik mõõtmispunktid.

3. Geoidiarvutuse põhimõtted ja tulemused

Gabriel Stokes'i poolt 1849. aastal publitseeritud valem on kaasajalgi füüsikalise geodeesia olulisim valem. Gravimeetrilise geoidi undulatsioon N (referentsellipsoidi suhtes) arvutatakse globaalse kattuvusega gravimeetrilise mõõdistuste andmete integreerimisel (üle ühiksfääri pinna σ) järgmiselt:

$$N = \frac{R}{4\pi\gamma} \iint_{\sigma} S(\psi) \Delta g d\sigma \quad (3),$$

kus R on Maa keskmine raadius (ca' 6371 km), γ on normaalraskuskiirendus, ψ on siin arvutus- ning integreeritava punkti vaheline geotsentriline nurkkaugus ja $S(\psi)$ on Stokes'i integraali tuum ning $d\sigma$ on pindalaelement.

Nagu valemist (3) selgub, tuleb geoidi kõrguse arvutamiseks Stokes'i valemiga teada raskuskiirenduse anomaaliade väärtusi üle kogu maakera. Praktikas on gravimeetrilised andmed arvutuspiirkonna ümber kättesaadavad vaid mõnesaja kilomeetri raadiuses (tähistame seda piirkonda σ_0) (vt joonis 1). Integreerimisala sellisest piiratusest tuleneb viga geoidi arvutustulemusesse. Stokes'i valemi modifitseerimine (originaalidee Molodenskii jt., 1962) võimaldab integreerimisala piiratusest tulenevat viga kompenseerida. Modifitseeritud Stokes'i valemis lisatakse arvutuspiirkonnast kaugemate alade gravitatsioonivälja mõju (e geoidi pikalaineline trend) globaalse geopotentsiaalvälja spektraalmudelist (GGM), samas kui detailne (nn kõrgsageduslik) geoidikomponent saadakse lokaalsete terrestriiliste mõõtmisandmete integreerimisest.

Modifitseeritud Stokes'i valemiga üle piiratud integreerimisala σ_0 arvutatakse geoidi undulatsioon N arvutuspunktis modifitseerimiskoeffitsientide $s_0, s_1 \dots s_M$, (terrest-

riliste) raskuskiirenduse anomaaliate $\Delta\hat{g}$ ning GGM-ist arvatud raskuskiirenduse anomaaliate liikmete $\Delta\hat{g}_n$ väärtuste asetamisega üldvalemisse

$$N = \frac{R}{4\pi\gamma} \iint_{\sigma_0} S_M(\psi) \Delta\hat{g} d\sigma + \frac{R}{2\gamma} \sum_{n=2}^M s_n \Delta\hat{g}_n, \quad (4)$$

kus

$$S_M(\psi) = S(\psi) - \sum_{k=0}^M \frac{2k+1}{2} s_k P_k(\cos\psi) \quad (5)$$

ja M on kõrgeim modifitseerimisaste ning $P_k(\cos\psi)$ on Legendre polünoom.

Tänaseks on välja pakutud mitmeid erinevaid Stokes'i integraalvalemite modifikatsioone, vt näiteks Wong ja Gore (1969), Meissl (1971), Sjöberg (1984), Vaníček ja Kleusberg (1987) ja mitmed teised. Sjöbergi (1984) ettepanekutel võib Stokes'i valemit modifitseerida selliselt, et lisaks integreerimisala piiratud arvestamisele on ka terestriliste graviandmete ning GGM koefitsientide vigadest tulenev mõju vähimruutude meetodil minimiseeritud. Uurimistöö tulemusena andiski vähimruutude meetodil modifitseeritud Stokes'i valem Eesti geoidi mudeli arvutustes statistiliselt täpseima tulemuse.

Märkimist väärib, et gravimeetrilise geoidimudeli GRAV-GEOID2011 arvutamiseks kasutati gradiomeetrilise satelliidi GOCE uusimate andmete põhjal 2011.a alguses koostatud globaalset geopotsiaali mudelit GO_CONS_GCF_2_TIM_R2 (Pail jt. 2011), kusjuures selle maksimaalne aste on 250.

Eesti geoidi modelleerimise vähimruutude meetodi modifitseerimiskoeffitsientide arvutamisel eelistatud ja statistiliselt parima tulemuse andnud kriteeriumid olid järgnevad:

- modifitseerimisaste $M=160$, mis vastab ruumilisele lahutusele 125 km;
- terestriliste graviandmete (empiiriline) dispersioon 9 mGal^2 (korrelatsiooni vahemaad väärtuseks eeldatud $0,1^\circ$);
- integreerimisala raadius 2° (ca 220 km).
- arvutussamm $1' \times 2'$ (1,9 x 2,0 km).

Regionaalse geoidimudeli arvutamisel modifitseeritud Stokes'i valemiga kombineeriti globaalse geoidi mudeli pikalaineline komponent piirkondlike terestriliste mõõtmistulemustega (lühilaineline komponent). Saadud tulemust võrreldi alternatiivse, tasapinnalise kiirel Fourier' teisendusel (FFT, inglise k *FastFourierTransform*) põhinevate geoidi arvutusmeetodiga. Tasapinnalises FFT-l põhinev geoidi modelleerimine osutus meetodina lihtsaks (polnud vaja määrata täiendavaid arvutusparameetreid) ning kiireks, pidades silmas arvutustele kuluvat aega. FFT-l põhineva meetodi puuduseks on aga tasapinnalisus, mistõttu suuremal alal modelleerides tekib maakera kumeruse tõttu oht geoidi pinnamudeli moonutusteks.

Mõned parameetrid (võrgustiku samm, GOCE põhise GO_CONS_GCF_2_TIM_R2 aste 240) tuli FFT-l põhineva meetodi rakendamiseks siiski fikseerida – selleks võrdsustati need eeltoodud parameetrite väärtustega. Võrdlus vähimruutude ja tasapinnalise FFT meetoditel arvatud geoidi mudelitega (sisendandmed täpselt samad) näitas 1...2 cm erinevusi Eesti mandriosas, mis osutas küllalt heale eri meetodite vahelisele kooskõlale. Kuna hilisem võrdlus GNSS-nivelleerimise andmetega näitas paremat kooskõla vähim-

ruutude meetodiga arvatud geoidiga, siis edaspidi FFT arvutusmeetodiga saadud geoidi mudelit ei käsitleta.

Eelmise geoidimudeli Jürgenson (2003) puhul oli arvutusmeetodiks nn „eemalda-
arvuta-taasta“ põhimõte ning sfäärilisel FFT-l põhinev integreerimine. Neist esimene
võimaldab näiteks anda geoidiarvutuses kohalikule anomaaliaväljale suurema kaalu, teise
eeliseks on aga oluliselt väiksem ajakulu arvutustes võrreldes eeltoodud vähimruutudel
põhineva meetodiga. GRAV-GEOID2011 ja Jürgenson (2003) omavahelisi erinevusi on
üksikasjalikult lahatud artiklis Oja jt. (2011). Kokkuvõtvalt võib öelda, et maismaal jäid
erinevused reeglina alla 3 cm, kuid Viljandi ja Pärnu vahelisel alal küündisid 9 cm-ni.
Tõenäoliselt on need tingitud erinevatest terrestrialse gravimeetria andmetest. Nagu eel-
nevalt mainitud, on alates 2008. aastast kogutud ja mõõdetud hulgaliselt uusi gravimeet-
rilisi andmeid Kagu-, Lõuna- ja Edela-Eestis. See on võimaldanud nendes piirkondades
asendada 1949.–1956. aasta TA Geoloogia Instituudi ebatäpsed mõõdistuspunktid kaas-
aegsete gravimeetriliste andmetega, mis on gravimeetrilise geoidi lahendust selgelt paran-
danud.

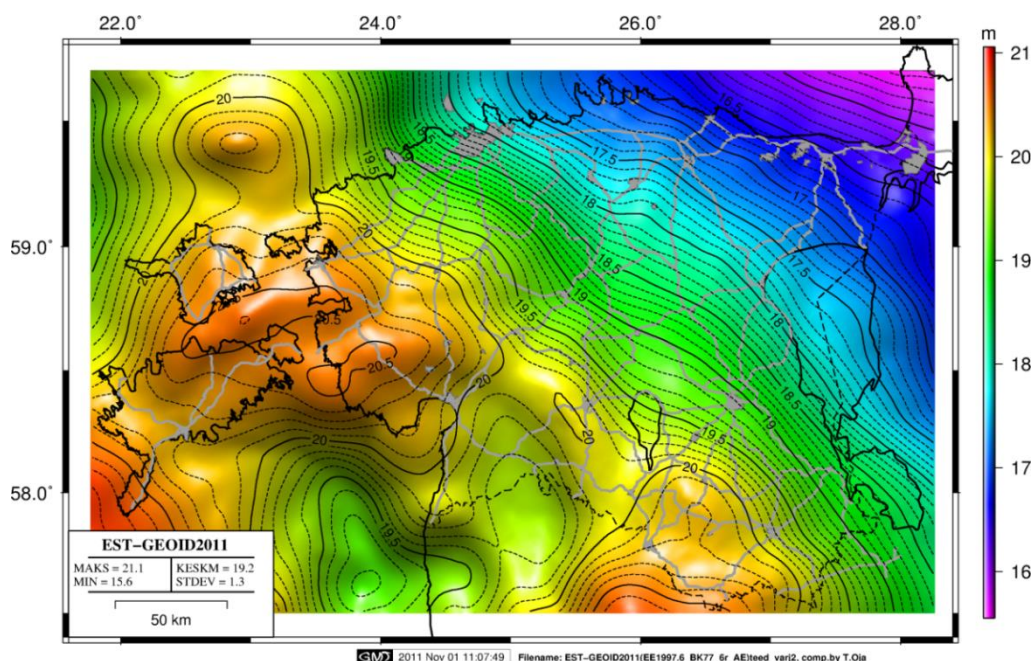
4. Geoidimudeli transformeerimine ja valideerimine GNSS-nivelleerimispunktidega

Gravimeetrilise regionaalgeoidi mudelit ei saa praktilistes töodes ehedal kujul
kasutada, kuna see ei ühildu kohaliku kõrgussüsteemiga. Viimane on ajalooliselt seotud
mõne mereäärse veemõõtejaama keskmise tasemega (meil on selleks seni Kroonlinna
mõõtepunkt), mis ei pruugi kokku langeda globaalgeoidi (maailmamere) nivoo-pinnaga
ning isegi mitte tänapäevase keskmise veetasemega Läänemeres. Gravimeetrilise geoidi ja
kohaliku kõrgussüsteemi erinevused tehakse kindlaks GNSS-nivelleerimise (kõrgused
referentsellipsoidi pinna suhtes ja ka kohalikus vertikaaldaatumis) punktide abil. Nii
toimubki regionaalgeoidi arvutus reeglina kahes etapis. Esmalt arvutatakse gravimeetrilise
regionaalgeoidi pind, mis seejärel ühildatakse GNSS-nivelleerimise punktide geodeetiliste
(ellipsoidi suhtes) ja normaalkõrgustega (vertikaaldaatumi suhtes).

Uue gravimeetrilise geoidimudeli GRAV-GEOID2011 praktiliseks kasutamiseks
ühildati see kõrgtäpsete GNSS-nivelleerimise punktidega (täpsemalt riikliku geodeetilise
võrgu punktide EUREF-EST97 ellipsoidaalsete ja Balti 1977 kõrgussüsteemi (BK77)
normaalkõrguste väärtuste vahedega), mille tulemusena gravimeetriline geoid trans-
formeeriti nn geomeetrilise geoidi mudelpinnaks EST-GEOID2011 (joonis 3). Jooniselt
nähtub, et EST-GEOID2011 geoidi mudelpinna undulatsiooni väärtused kahanevad Eesti
alal edela-kirdesuunaliselt enam-vähem ühtlaselt, 21 meetrist kuni 16,5 meetrini.

Nagu öeldud, on EST-GEOID2011 tuletamiseks gravimeetrilist geoidimudelit
GRAV-GEOID2011 korrigeeritud riikliku geodeetilise (GNSS) võrgu I ja II klassi punk-
tide EUREF-EST97 ellipsoidaalsete ja kõrgussüsteemi BK77 normaalkõrguste väärtuste
põhjal. Selleks viidi läbi nivelleerimisvõrgu mõõtmistulemuste andmetöötlus ja esialgne
tasandamine. Tegemist ei olnud lõpliku ega ametliku tasandusega, kuna peaeesmärgiks oli
saada geoidimudeli korrigeerimispunktidele esialgsed kõrgused. Lähteandmetena oli
kasutada aastatel 2001–2010 riikliku kõrgusvõrgu kõrgtäpsete nivelleerimiste keskmised
kõrguskasvud (~2250 kõrguskasvu) ja Saaremaa ning Hiiumaa nivelleerimispolügoonide
mandriga sidumiseks arvatud kolm nn veeületuse esialgset kõrguskasvu Virtsu-Kui-
vastu, Sõru-Triigi ning Heltermaa-Rohuküla veemõõtejaamade vahel (Liibus jt. 2013).
Nivelleeritud keskmistesse kõrguskasvudesse ei olnud veel sisse viidud kõrgusvõrgu ran-

geks andmetötluseks ja tasandamiseks vajalikke parandeid (lati-, refraktsiooniparandid, üleminek geopotentsiaali põhistele kõrguskasvudele jne). Juba ainuüksi seetõttu ei ole meie tasandamisest saadud kõrgused lõplikud ja võivad erineda ametlikest kõrgusandmetest, mida esitletakse peale uue riikliku kõrgusvõrgu tasandust. Kasutatud esialgsed kõrgused peaksid olema siiski märgatavalt täpsemad ja süstemaatilistest vigadest vähem mõjutatud kui ametlikud BK77 kõrgused.



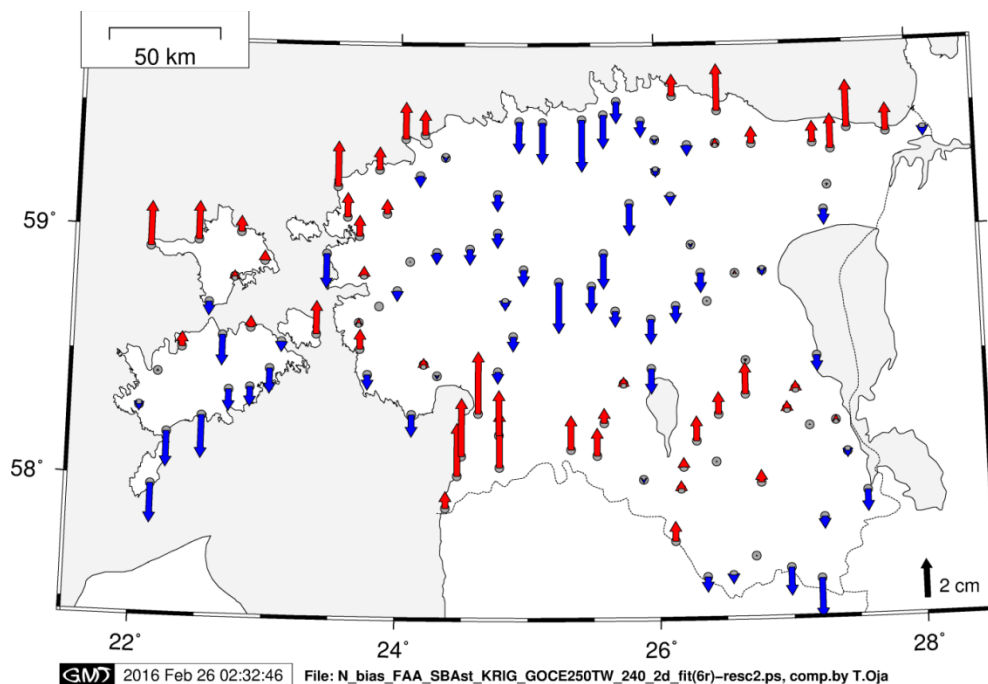
Joonis 3. Mudelpind EST-GEOID2011 (koos suuremate asulate ja peamiste maanteedega), mis on rakendatav EUREF-EST97 ellipsoidaalsete kõrguste ümberarvutamiseks BK77 kõrgusteks ja vastupidi. Isojoonte vahe on 0,1 m.

Figure 3. Model EST-GEOID2011, contour interval is 0.1 m.

Kuna praktilistest kaalutlustest lähtuvalt tuli sobitada gravimeetiline geoidimudel GRAV-GEOID2011 Balti 1977.a kõrgussüsteemiga, tuli uued nivelleerimisandmed tasandada nii, et sobituspunktide (ühtekokku 114 riikliku geodeetilise võrgu I ja II klassi punkti, vt joonis 4) kõrgus ühtiks BK77 süsteemi kõrgusega. Samas on teada, et uued nivelleerimisandmed ei sobitu enam kuigi hästi vanade reeperite kõrgustega ja seda nii mitmelgi põhjusel, üheks peamiseks neist jääajajärgne maakerge Eestis. Võrgu tasandamiseks fikseeriti 24 üle Eesti paikneva fundamentaalreeperi kõrgus BK77 süsteemis, mille normaalkõrgus on leitav NSVL 1976.–1977.a nn O-katoloogides ning tasandati uued nivelleerimisandmed nende vahele. Kuigi tegemist on üsnagi robustse lähenemisega, võimaldas see siiski ühildada gravimeetrilist geoidimudelit Eestis kehtiva kõrgussüsteemiga, rakendades samas uusi täpsemaid nivelleerimisandmeid. EST-GEOID2011 puhul hinnati GNSS-nivelleerimispunktide asukohtades ühildamise jääkhälvete (vt. joonis 4) standardhälbeks $\pm 1,3$ cm.

Samas on jääkviigade suurused piirkonniti (Riia lahe ümbrus, põhjarannik jne) üsna erinevad (ulätudes 2...3 cm-ni), mis viitab mõningatele süstemaatilistele vigadele kas gravimeetrilise geoidi sisendandmetes või GNSS/nivelleerimise punktide kõrgusväärtuses, ehk ka arvutusmeetodite vigadele. Uus täpne kõrgusvõrgu lahendus lähitulevikus võimaldaks vigade põhjuseid ning ruumilist jaotust põhjalikumalt uurida.

Seda, et uued nivelleerimistulemused ei taha vanade kõrguste vahele hästi sobida, näitasid ka tasandamisjärgsed statistilised näitajad: dispersioonikordaja $S_0 = \pm 2,98$ (aprioorne väärtus 1, mida enam 1-st erineb, seda suuremad on olnud parandid kõrguskasvudele), maksimaalne ja minimaalne parand kõrguskasvule olid vastavalt +1,7 ja -1,5 mm. Enamik parandeid (ca 2000-le kõrguskasvule) jäid siiski $-0,5...+0,5$ mm vahemikku. Uute tasandatud kõrguste keskmine standardhälve on $\pm 9,9$ mm.



Joonis 4. Gravimeetrilise geoidimudeli GRAV-GEOID2011 sobitamise jääkvead GNSS-nivelleerimise punktide asukohtades peale 6-parameetrilise polünoompinnaga lähendamist. Ühik on sentimeeter.

Figure 4. GRAV-GEOID2011 post-fitting residuals at the locations of GNSS-levelling points. The unit is cm.

Ka peaks uurima veel GNSS-nivelleerimise punktide optimaalset tihedust ja ruumilist jaotust Eestis. Neid punkte võiks olla senisest rohkem, et tagada ühtlasem jaotus kogu riigi ulatuses. Hetkel jäävad need punktid peamiselt kõrgusvõrgu käikude vahetusse lähedusse, mis aga ei taga ühtlast jaotust, sest näiteks suured alad nivelleerimiskäikude polügoonide sees on korrigeerimispunktidega katmata. Sellest, milliseks kujuneb geoidi mudelpinna täpsus piirkondades, kus GNSS-nivelleerimise punktidele lisaks on puudu ka gravimeetristest mõõdistuspunktidest, on näitlikustanud Oja (2011). Sealt võib leida

vastuse ka küsimusele, kas GNSS-nivelleerimise punktide oluliselt suurem tihedus Eestis võimaldaks geoidi pinna täpsuse märgatavat suurendamist, jättes tähelepanuta ebatäpse ja hõreda gravimeetrilise andmestiku. Kokkuvõttena võib öelda, et korrigeerimisandmestiku oluline tihendamine ei osutu ei optimaalsemaks ega ka efektiivsemaks lähenemiseks geoidi mudelpinna täpsuse parandamisel. Hetkel on parimaks lahenduseks jätkata gravimeetriliste mõõdistamistega hõreda ja ebatäpse graviandmestikuga aladel. Eestis on sellisteks aladeks suuremad rabad ja rannast 5–10 km kaugusele merele ulatuvad piirkonnad, samuti mõned piirialad Läti ja Venemaaga.

5. Tulemuste kasutamine

Uurimistöö tulemusena saadud geoidimudel EST-GEOID2003 kehtestati Keskkonnaministeeriumi 26.10.2011 määrusega nr 64 Eesti Vabariigi geodeetilise süsteemi koostisosana. Uus geoidimudel on osutunud vajalikuks Maa-ametile, Veeteede Ametile, Eesti Geoloogiakeskusele ja teistele Keskkonnaministeeriumi ning Majandus- ja kommunikatsiooniministeeriumi haldusalas tegutsevatele asutustele. Võimalusi mudeli kasutamiseks näeme ka Eesti Kaitsejõududes ning sisejulgeolekuasutustes. Võimaldab ju uus geoidimudel GNSS-tehnoloogiaga saadud kõrguste täpset ümberarvutamist Eesti kõrgussüsteemi ametlikeks kõrgusteks, teisisõnu, üleminekut geodeetiliselt kõrguselt absoluutkõrgusele. Mainigem, et ka peatsel üleminekul nn Amsterdamis veemõõdejaama nullile saab kasutada sedasama GRAV-GEOID-2011 mudelit, kuid siis juba tihedamalt Amsterdamis kõrgussüsteemi kõrgusi omavate GNSS nivelleerimise punktidega. Uus geoidimudel võimaldab täpset GNSS kõrgusmäärangut riiklikus kõrgussüsteemis, mis seega on kiireks ning suhteliselt odavaks alternatiiviks nivelleerimisele. Esmajoones on tulemused kasutatavad geodeetiliste inseneriülesannete lahendamisel kogu riiki hõlmavate objektide (näiteks raud- ja maanteed, side- ja jõukaablid jne) rajamisel ning haldamisel. Usaldusväärse geoidimudeli olemasolu on eelduseks taoliste tööde kulutuste vähendamiseks, lisaks omab see olulist rolli rajatiste eksploateerimisel ning ohutuse tagamisel. Samuti on geoidi täppismudeli olemasolu eelduseks klassikaliste (seni küllaltki kallite!) geodeetiliste võrkude rajamise põhimõtete revideerimiseks ja seda just lihtsustamise suunas.

Hinnanguliselt annavad raskuskiirenduse anomaalvälja ja geoidi mudelpindade jätkuva uurimistöö tulemused ainet mitmesugusteks interdistsiplinaarseteks analüüsideks ning tõlgendusteks. Esmajoones pakuvad geoidi ja gravitatsioonivälja (ja ennekõike selle ajalisi muutumisi) kirjeldavad mudelid teistele geoteadustele huvi näiteks kliimauuringutes, mitmesuguste loodusnähtuste, Maa siseehituse ja jätkuvalt Maad vormivate füüsikaliste protsesside (isostaasia, jääajajärgne maatõus jne) põhjuste uurimisel ja seletamisel. Veealade detailsem geoidimudel kombineerituna merepinna topograafiat ning atmosfääriprotsesse (nt tormituuled) kirjeldavate mudelitega peaks võimaldama suurema täpsusega prognoosida rannikualasid tabavaid üleujutusi, nende ulatust ning võimalikku kahju.

Uurimistöö võimaldas ühiselt tegutsedes rakendada mitmeid innovatiivseid mudeleid ning meetodikaid, lahendada hulgaliselt probleeme ning esitada tulemina täpsema ja usaldusväärsema (võrreldes senistega) raskuskiirendusvälja ja geoidi mudeli Eesti alale. Samas saavutatule puhkama jääda pole võimalust ega tahtmiski, sest neis valdkondades jätkub tegevust ju veel küllaga. Teadmised Maa raskusjõuvälja ning geoidi osas täienevad pidevalt, seda tänu nii globaalsete mudelite parendamisele rahvusvahelises ühistegevuses

kui ka meie enda ettevõtmistele Eestis. Näiteks on vaja parendada gravimeetrilist geoidimudelit, mille täpsus nii mõneski Eestimaa kohas võib jääda tagasihoidlikumaks kui eeldatud (Oja, 2011). Nii jätkubki praegu gravimeetrilise andmestiku täiendamine „valgete laikudega aladel“ nii Maa-ameti gravimeetria mõõterühma kui ka ülikoolide tegevusena. Ajavahemikus 2011–2016 on kokku lisandunud u 1900 uut punkti. Mõõdistatud on talvise jääkatte ajal Väinameri ja Narva lahe rannikulähedane mereala, maismaal aga Lääne-, Kesk-, Kagu- ja Ida-Eesti maakondi. Hiljuti on lisandunud uusi mõõdistuspunkte ka Eesti-Läti piirialadel ning suuremate rabade servades. Nii lülitati lisandunud andmed Põhjamaade geodeesia komisjoni korraldatud kogu Läänemere regiooni geoidimudeli (NKG2015) arvutustesse, mille tulemused kinnitati märtsis 2016 Tallinnas toimunud NKG töökoosolekul. Sellele järgnev Läänemere regiooni riikide meremõõdistajaid ja geoidiarvutajaid hõlmav koostöö on suunatud geoidimudeli parendamisele merealadel.

Võib arvata, et tulevikus veelgi täiustunud andmestikuga geoidi mudelpinnad ei ühildu täpselt ka praeguse EST-GEOID2011 mudeliga. Üksikutes kohtades võivad erinevused küündida kõige optimistlikul hinnangul kuni ± 1 cm, pessimistlikul hinnangul üle sellegi. Seega teatud skepsis GNSS-seadmetega kõrguste määramisel ja mõõtmistulemustele täpsushinnangute andmisel on igati omal kohal.

6. Kokkuvõte

Geoid on Maa gravitatsioonivälja ekvipotentsiaalpinna, mis langeb kokku „häirimata“ maailmamere pinnaga. Eesti uue geoidimudeli arvutamiseks modifitseeritud Stokes'i (integraal)valemiga kombineeriti globaalse geoidimudeli pikalaineline komponent piirkondlike terrestriilsete mõõtmistulemustega (lühilaineline komponent). Paraku on varasematest uurimustest ilmnenud lubamatud vead Läänemere maade raskuskiirenduse mõõdistusandmetes. Seetõttu viidi esmalt läbi geoidiarvutuseks vajalike lähteandmete kogumine, süstematiseerimine, kvaliteedi kontroll ja tuvastatud vigade elimineerimine. Jäähälbed gravimeetrilise geoidi ühildamisest geodeetiliste ja normaalkõrguste väärtustega võimaldasid hinnata saadud mudelpinna EST-GEOID2011 täpsuseks $\pm 1,3$ cm. See täpsushinnang on otseses sõltuvuses geodeetilise koordinaatsüsteemi EUREF-EST97 ellipsoidaalsete ja kõrgussüsteemi BK77 normaalkõrguste väärtuste täpsusest, lisaks on tulemused mõjutatud ka jääajajärgsest maakerkest. Täiendavad arvutused, kuhu kaasati uusimad nivelleerimisandmed ning maakerke mudeli prognoosid, parendasid mudeli EST-GEOID2011 täpsushinnangut väärtuseni ± 1 cm ja isegi alla selle. Uurimistöö tulemusena saadud täpne geoidimudel EST-GEOID2011 on Keskkonnaministeeriumi 26.10.2011 määrusega nr 64 Eesti Vabariigi geodeetilise süsteemi koostisosa ja kõrgusmäärangu lähtepind, mida saab kasutada (näit. GNSS-põhiseks kõrgusmääranguks) nii maismaal kui merel.

Tänuavaldused

Eesti Teadusfond toetas 2008–2011. a teadusgrandiga ETF7356 uuringuid teemal *Kosmosetehnoloogia rakendused geoidi ja gravitatsioonivälja täpsustamiseks Eesti alal*.

Kirjandus

- All, T., Puura, V., Vaher, R., 2004. Orogenic structures of the Precambrian basement of Estonia as revealed from the integrated modelling of the crust. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Geology*, 53 (3), 165–189
- Denker, H., Torge, W., 1998. The European gravimetric quasigeoid EGG97 – an IAG supported continental enterprise. In: Forsberg R, Feissel M, Dietrich R (eds) *Geodesy on the move. IAG Symp. Series*, vol 119, Springer Verlag, Berlin Heidelberg NewYork, pp 249–254
- Ellmann, A., 2002. An improved gravity anomaly grid and a geoid model for Estonia. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Geology*, 51, 199–214
- Ellmann, A., 2005. Two deterministic and three stochastic modifications of Stokes's formula: a case study for the Baltic countries. *Journal of Geodesy*, 79, 11–23
- Ellmann, A., All, T., Oja, T., 2009a. Toward unification of terrestrial gravity data sets in Estonia. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 58(4), 229–245.
- Ellmann, A., Kaminskis, J., Parseliunas, E., Jürgenson, H., Oja, T., 2009b. Evaluation results of the Earth Gravitational Model EGM08 over the Baltic countries. *Newton's Bulletin*, 4, 110–121
- Ellmann, A., Oja, T., Jürgenson, H., 2011. Kosmosetehnoloogia rakendused geoid ja gravitatsioonivälja täpsustamiseks Eesti alal. *Geodeet* 41(65), 22–25.
- Forsberg, R., Kaminskis, J., Solheim, D., 1997. Geoid for the Nordic and Baltic region from gravimetry and satellite altimetry. In: Segawa J, Fujimoto H, Okubo S (eds.) *Gravity, Geoid and Marine geodesy. IAG Symposium Series vol 117*, Springer Verlag, Berlin Heidelberg NewYork, 540–547
- Jürgenson, H., 2003. Eesti täppisgeoidi arvutus. Doktoriväitekiri. Tartu, EMÜ, 157 lk.
- Lemoine, F.G., Kenyon, S.C., Factor, J.K., Trimmer, R.G., Pavlis, N.K., Chinn, D.S., Cox, C.M., Klosko, S.M., Luthcke, S.B., Torrence, M.H., Wang, Y.M., Williamson, R.G., Pavlis, E.G., Rapp, R.H., Olson, T.R., 1998. The development of the joint NASA GSFC and NIMA Geopotential Model EGM96. NASA/TP-1998–206861, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt Maryland
- Liibusk, A., Ellmann, A., Kõuts, T., Jürgenson, H., 2013. Precise hydrodynamic levelling by using pressure gauges. *Marine Geodesy*, 36(2): 138–163. DOI: 10.1080/01490419.2013.771594
- Molodenskii, M.S., Eremeev, V.F., Yurkina, M.I., 1962. Methods for study of the external gravitational field and figure of the Earth. (transl. from Russian 1960). Israel program for Scientific translations, Jerusalem.
- Märdla, S., Oja, T., Ellmann, A., Jürgenson, H., 2015. Improving and validating gravity data over ice-covered marine areas. In: *International Association of Geodesy Symposia (1–8)*. Springer. DOI 10.1007/1345_2015_163.
- Oja, T., 2011. Raskuskiirenduse anomaalvälja kerkest Luusika kandis ning selle mõjust geoidile. *Geodeet* 41(65), 26–30.
- Oja, T., Ellmann, A., Jürgenson, H., Kall, T., 2011. Mudelpindade EST-GEOID2011 ja EST-GEOID2003 omavahelistest erinevustest ning võimalikust üleminekust uuele kõrgussüsteemile. *Geodeet* 41(65), 31–37.
- Oja, T., Türk, K., Ellmann, A., Gruno, A., Bloom, A., Sulaoja, M., 2011. Relative gravity surveys on ice-covered water bodies. In *Proceedings: D. Cygas, K. D. Froehner (Eds.) Selected papers of the 8th International Conference on Environmental Engineering*, Vilnius, Lithuania, 19-20, May, 2011. (1394–1401). Vilnius: Vilnius Gediminas Technical University Press "Technika".
- Pail, R., Bruinsma, S., Migliaccio, F., Foerste, C., Goiginger, H., Schuh, W.-D., Hoeck, E., Reguzzonim, M., Brockmann, J.M., Abrikosov, O., Veichert, M., Fecher, T., Mayrhofer, R., Krasbutter, I., Sanso, F., Tscherning, C.C., 2011. First GOCE gravity field models derived by three different approaches; *Journal of Geodesy*, 85, 819–843.

- Sjöberg, L.E., 1984. Least squares modification of Stokes and Vening-Meinesz formulas by accounting for errors of truncation, potential coefficients and gravity data. The Department of Geodery Report No. 27, University of Uppsala.
- Türk, K., Sulaoja, M., Oja, T., Ellmann, A., Jürgenson, H., 2011. Precise gravity surveys in South Estonia from 2009 to 2010. In Proceedings: D. Cygas, K. D. Froehner (Eds.) Selected papers of the 8th International Conference on Environmental Engineering, Vilnius, Lithuania, 19–20, May, 2011. (1499–1505). Vilnius: Vilnius Gediminas Technical University Press "Technika".
- Vaniček, P., Kleusberg, A., 1987. The Canadian geoid–Stokesian approach. *Manus Geod* 12, 86–98.
- Wong, L., Gore, R., 1969. Accuracy of geoid heights from the modified Stokes kernels. *Geophys J. R. Astron. Soc.*, 18, 81–91.

Enhanced gravity field and geoid models over Estonia

Artu Ellmann¹, Tõnis Oja², Tarmo All³, Harli Jürgenson⁴, Tarmo Kall⁴ and Aive Liibus⁴
¹*Tallinn University of Technology, Geodesy Chair;* ²*Estonian Land Board, Depart. of Geodesy;*
³*Geological Survey of Estonia/Eesti Energia;* ⁴*Estonian University of Life Sciences, Depart. of Geomatics*

Summary

The study involves significantly improved gravity data coverage in Estonia and its vicinity. A new gravity anomaly model over Estonia was computed, accompanied with a careful and versatile revision of results of gravity surveys. A GOCE satellite-only geopotential model and the free air gravity anomaly 1' x 2' grid was utilized in the computation of the Estonian gravimetric geoid model GRAV-GEOID2011 by the least squares modification of Stokes's formula. The model was fitted to a set of 114 high-precision GPS-levelling points, resulting with the EST-GEOID-2011 model. The postfitting residuals yielded an accuracy of 1.3 cm, which indicates the suitability of the EST-GEOID-2011 model for many practical applications.

Publicationes Geophysicales Universitatis Tartuensis

(Tartu ülikooli geofüüsika-alased toimetised)

1. Грозы в Лифляндской и Эстляндской губерниях в 1894 году. Ученые записки Императорского Юрьевского Университета, 1895, 4.
2. **Срезневский, Б. И.** (сост.) Таблицы ежедневных осадков, выпавших на всех метеорологических станциях Прибалтийского края (в Лифляндской и Эстляндской губерниях) в 1900 году. Ученые записки Императорского Юрьевского университета, 1902.
3. **Срезневский, Б. И.** Радиация перистых облаков. Из трудов Метеорологической Обсерватории Императорского Юрьевского Университета, 1906.
4. **Letzmann, J.P.** Die Höhe der Schneedecke im Ostbaltischen Gebiet. Acta et comm. univ. Tartuensis, A2, 1921.
5. **Letzmann, J.** Die Trombe von Odenpäh am 10. Mai 1920. Acta et comm. univ. Tartuensis, A3, 1922.
6. **Letzmann, J.** Das Bewegungsfeld im Fuss einer Fortschreitenden Wind- oder Wasserhose. Acta et comm. univ. Tartuensis A6, 3, 1923.
7. **Frisch, K.** Die Temperaturabweichungen in Tartu (Dorpat) und ihre Bedeutung für die Witterungsprognose. Acta et comm. univ. Tartuensis A: Mathematica, physica, medica 3., 2, 1925.
8. **Frisch, K.** Ein Versuch das Embachhochwasser im Frühling für Tartu (Dorpat) Vorherzubestimmen. Acta et comm. univ. Tartuensis A: Mathematica, physica, medica 9., 8, 1926.
9. **Frisch, K.** Zur Frage der Luftdruckperioden. Acta et comm. univ. Tartuensis A: Mathematica, physica, medica 13., 4, 1927.
10. **Frisch, K.** Zur Frage der Temperaturanstiegens im Winter. Acta et comm. univ. Tartuensis A: Mathematica, physica, medica 13., 7, 1928.
11. **Frisch, K.** Zur Frage über die Beziehung zwischen der Getreideernte und einige meteorologischen Faktoren in Eesti. Acta et comm. univ. Tartuensis A: Mathematica, physica, medica 14., 4, 1929.
12. **Liedemann, H.** Über die Sonnenscheindauer und Bewölkung in Eesti. Acta et comm. univ. Tartuensis A: Mathematica, physica, medica 19., 3, 1930.
13. **Frisch, K.** Zur Frage der Zyklonenvertiefung. Acta et comm. univ. Tartuensis A: Mathematica, physica, medica 18., 7, 1930.
14. **Frisch, K.** Die Veränderungen der klimatischen Elemente nach den meteorologischen Beobachtungen von Tartu 1866-1930. Acta et comm. univ. Tartuensis A: Mathematica, physica, medica 23., 5, 1932.
15. **Kärsna, A.** Über das Problem der Vorhersage des Nächtlichen Temperaturminimums. Acta et comm. univ. Tartuensis A: Mathematica, physica, medica 27., 6, 1934.
16. **Kärsna, A.** Vereinfachte Methoden zur Berechnung des Korrelationskoeffizienten bei normaler Korrelation. Acta et comm. univ. Tartuensis A: Mathematica, physica, medica 29., 1935.

17. **Kirde, K.** Meteorological elements characterized by frequency-curves. Tartu Ülikooli Meteoroloogia Observatooriumi teaduslikud väljaanded N. 1. 1936.
18. **Kirde, K.** Change of climate in the Northern Hemisphere. Tartu Ülikooli Meteoroloogia Observatooriumi teaduslikud väljaanded N. 2. Tartu, 1938, 35 pp.
19. **Kärsna A.** Über das Problem der Messung der Störung bei statistischen Reihen mit Anwendung auf die Klimatologie. Tartu Ülikooli toimetused. A, Mathematica, physica, medica ; 34, 1938.
20. **Kirde, K.** Andmeid Eesti kliimast. Tartu Ülikooli Meteoroloogia Observatooriumi teaduslikud väljaanded N. 3. Acta et comm. univ. Tartuensis A: Mathematica, physica, medica 34., 8, 1939.
21. **Kärsna, A.** Über das System der einmodigen Häufigkeitskurven. Tartu Ülikooli Meteoroloogia Observatooriumi teaduslikud väljaanded N. 4, 1939.
22. **Prants, L.** Charakteristische Merkmale der Luftmassen über Europa nach aerologischen Beobachtungen. Acta et comm. univ. Tartuensis A: Mathematica, physica, medica 37., 1, 1940.
23. **Kirde, K.** Kliima-valdkonnad Eestis. Tartu Ülikooli Meteoroloogia Observatooriumi teaduslikud väljaanded N. 5, 1943.
24. **Kirde, K.** Einige Angaben über die Zyklonenbewegung. Tartu Ülikooli Meteoroloogia Observatooriumi teaduslikud väljaanded N. 6. Acta et comm. univ. Tartuensis A: Mathematica, physica, medica 38., 1943.
25. **Liidemaa, H.** Soojuse ringvool lumikattes. Acta et comm. univ. Tartuensis. Füüsika ja keemia 1, 1946.
26. **Mitt, A.** Molioonide tiheduse kõikumine atmosfääris Tartus 1937. a. Acta et comm. univ. Tartuensis. Füüsika ja keemia 2, 1946.
27. Geofüüsika-alaseid töid. Tartu Riikliku Ülikooli toimetised, N. 59, Tartu, 1958, 137 lk.
28. Труды по аэроионизации и электроаэрозолям 1. Tartu Riikliku Ülikooli toimetised, N. 140, Tartu, 1963, 138 lk.
29. Труды по аэроионизации и электроаэрозолям 2. Х.Ф.Таммет. Аспирационный метод измерения спектра аэроионов. Tartu Riikliku Ülikooli toimetised, N. 195, Tartu, 1967, 232 lk.
30. Труды по аэроионизации и электроаэрозолям 3. Tartu Riikliku Ülikooli toimetised, N. 240, Tartu, 1970, 324 lk.
31. Труды по аэроионизации и электроаэрозолям 4. Tartu Riikliku Ülikooli toimetised, N. 239, Tartu, 1969, 159 lk.
32. Труды по аэроионизации и электроаэрозолям 5. Tartu Riikliku Ülikooli toimetised, N. 283, Tartu, 1971, 235 lk.
33. Труды по аэроионизации и электроаэрозолям 6. Tartu Riikliku Ülikooli toimetised, N. 320, Tartu, 1973, 350 lk.
34. Труды по аэроионизации и электроаэрозолям 7. Tartu Riikliku Ülikooli toimetised, N. 348, Tartu, 1975, 190 lk.
35. Труды по аэроионизации и электроаэрозолям 8. Tartu Riikliku Ülikooli toimetised, N. 409, Tartu, 1977, 171 lk.
36. Труды по аэроионизации и электроаэрозолям 9. Tartu Riikliku Ülikooli toimetised, N. 443, Tartu, 1977, 164 lk.

37. Труды по аэроионизации и электроаэрозолям 10. Tartu Riikliku Ülikooli toimetised, N. 479, Tartu, 1979, 168 lk.
38. Труды по аэроионизации и электроаэрозолям 11. Tartu Riikliku Ülikooli toimetised, N. 534, Tartu, 1980, 159 lk.
39. Труды по аэроионизации и электроаэрозолям 12. Tartu Riikliku Ülikooli toimetised, N. 588, Tartu, 1981, 157 lk.
40. Ионизация, аэрозоли, электрометрия. N. 13. Tartu Riikliku Ülikooli toimetised, N. 631, Tartu, 1982, 153 lk.
41. Ионизация, аэрозоли, электрометрия. N. 14. Tartu Riikliku Ülikooli toimetised, N. 648, Tartu, 1983, 99 lk.
42. Ионизация, аэрозоли, электрометрия. N. 15. Tartu Riikliku Ülikooli toimetised, N. 669, Tartu, 1984, 142 lk.
43. Ионизация, аэрозоли, электрометрия. N. 16. Tartu Riikliku Ülikooli toimetised, N. 707, Tartu, 1985, 179 lk.
44. Ионизация, аэрозоли, электрометрия. N. 17. Tartu Riikliku Ülikooli toimetised, N. 755, Tartu, 1987, 207 lk.
45. Ионизация, аэрозоли, электрометрия. N. 18. Tartu Riikliku Ülikooli toimetised, N. 809, Tartu, 1988, 183 lk.
46. Ионизация, аэрозоли, электрометрия. N. 19. Tartu Riikliku Ülikooli toimetised, N. 824, Tartu, 1988, 167 lk.
47. Ionization, aerosols, electrometry. Tartu Ülikooli toimetised, N. 880, Tartu, 1990, 121 lk.
48. Air ions and electrical aerosol analysis. Tartu Ülikooli toimetised, N. 947, Tartu, 1992, 171 lk.
49. Ionization, aerosols, electrometry. Tartu Ülikooli toimetised, N. 950, Tartu, 1992, 138 lk.
50. Tartu Ülikooli ilmade observatooriumi 140. juubeli konverentsi ettekanded. Publicationes Geophysicales Universitatis Tartuensis, 50, Tartu, 2006, 227 lk.
51. Tartu Ülikooli ilmade observatooriumi 150. aastapäeva konverentside artiklid. Publicationes Geophysicales Universitatis Tartuensis, 51, Tartu, 2016, 167 lk.