

VILNIAUS UNIVERSITETAS  
GAMTOS TYRIMŲ CENTRAS

Marija  
TAMKEVIČIŪTĖ

Aukštapelkėse augančios paprastosios  
pušies (*Pinus sylvestris* L.) kamieno  
radialiojo pokyčio priklausomybė nuo  
hidrometeorologinių sąlygų

**DAKTARO DISERTACIJA**

Biomedicinos mokslai,  
ekologija ir aplinkotyra [03 B]

---

VILNIUS 2018

Disertacija rengta 2012–2016 metais studijuojant doktorantūroje Gamtos tyrimų centre ir ginama eksternu. Mokslinius tyrimus rėmė Lietuvos mokslo taryba bei Lietuvos ir Šveicarijos bendradarbiavimo programa.

**Mokslinis vadovas:**

**doc. dr. Julius Taminskas** (Gamtos tyrimų centras, fiziniai mokslai, fizinė geografija – 06 P).

**Mokslinė konsultantė:**

**dr. Rūtilė Pukienė** (Vytauto Didžiojo universitetas, biomedicinos mokslai, ekologija ir aplinkotyra – 03 B).

Gynimo taryba:

Pirmininkas – **doc. dr. Kęstutis Jokšas** (Gamtos tyrimų centras, fiziniai mokslai, geologija – 05 P).

Nariai:

**prof. dr. Inga Dailidienė** (Klaipėdos universitetas, fiziniai mokslai, fizinė geografija – 06 P);

**doc. dr. Ilona Jukonienė** (Gamtos tyrimų centras, biomedicinos mokslai, ekologija ir aplinkotyra – 03 B);

**doc. dr. Alar Läänelaid** (Tartu universitetas, biomedicinos mokslai, ekologija ir aplinkotyra – 03 B);

**dr. Adomas Vitas** (Vytauto Didžiojo universitetas, biomedicinos mokslai, ekologija ir aplinkotyra – 03 B).

Disertacija ginama Gamtos tyrimų centre viešame disertacijos Gynimo tarybos posėdyje 2018 m. spalio mėn. 12 d., 14 val.

Adresas: Akademijos g. 2, LT-08412, Vilnius, Lietuva.

tel. +370 600 84217; el. p. m.tamkeviciute@gmail.com

Disertacija galima perskaityti Vilniaus universiteto ir Gamtos tyrimų centro bibliotekose bei VU interneto svetainėje adresu: <https://www.vu.lt/naujienos/ivykiu-kalendorius>

VILNIUS UNIVERSITY  
NATURE RESEARCH CENTRE

Marija  
TAMKEVIČIŪTĖ

Impacts of hydrometeorological  
conditions in raised bogs on radial stem  
dynamics in scots pine (*Pinus sylvestris* L.)

**DOCTORAL DISSERTATION**

Biomedical sciences,  
ecology and environment [03 B]

---

VILNIUS 2018

This dissertation was written between 2012 and 2016 at the Nature Research Centre. The research was supported by Research Council of Lithuania and Lithuanian-Swiss Cooperation Program. The dissertation is defended on an external basis.

**Academic supervisor:**

**Assoc. Prof. Dr Julius Taminskas** (Nature Research Centre, physical sciences, physical geography – 06 P).

**Academic consultant:**

**Dr Rūtilė Pukienė** (Vytautas Magnus University, biomedical sciences, ecology and environment – 03 B).

This doctoral dissertation will be defended in a public meeting of the Dissertation Defence Panel:

**Chairman – Assoc. Prof. Dr Kęstutis Jokšas** (Nature Research Centre, physical sciences, geology – 05 P).

**Members:**

**Prof. Dr Inga Dailidienė** (Klaipėda University, physical sciences, physical geography – 06 P);

**Assoc. Prof. Dr Ilona Jukonienė** (Nature Research Centre, biomedical sciences, ecology and environment – 03 B);

**Assoc. Prof. Dr Alar Läänelaid** (University of Tartu, biomedical sciences, ecology and environment – 03 B);

**Dr Adomas Vitas** (Vytautas Magnus University, biomedical sciences, ecology and environment – 03 B).

The dissertation shall be defended at a public meeting of the Dissertation Defence Panel at the Nature Research Centre, on October 12, 2018, at 2.00 p.m.

Address: Akademijos St. 2, LT-08412, Vilnius, Lithuania.

Tel. +370 600 84217; e-mail: m.tamkeviciute@gmail.com

The text of this dissertation can be accessed at the libraries of Vilnius University and Nature Research Centre, as well as on the website of Vilnius University: [www.vu.lt/lt/naujienos/ivykiu-kalendorius](http://www.vu.lt/lt/naujienos/ivykiu-kalendorius)

## TURINYS

SANTRUMPOS .....	7
TERMINŲ ŽODYNAS.....	8
ĮVADAS.....	10
1. LITERATŪROS APŽVALGA.....	15
1.1 Dendrochronologiniai tyrimai.....	15
1.2 Dendrochronologiniai tyrimai Lietuvoje.....	17
1.3 Aukštapelkėse augančios paprastosios pušies ( <i>Pinus sylvestris</i> L.) tyrimai .....	18
1.4 Dendrometrų taikymas dendrochronologiniuose tyrimuose .....	21
1.5 Hidrometeorologinių sąlygų įtaka medžių augimui .....	22
2. DARBO METODIKA .....	26
2.1 Tiriamų vietų parinkimas .....	26
2.2 Dendrochronologinis monitoringas <i>in situ</i> .....	28
2.3 Hidrometeorologinis monitoringas .....	32
2.3.1 Lietuvos hidrometeorologijos tarnybos duomenų panaudojimas darbe.....	32
2.3.2 Hidrometeorologinis monitoringas Čepkelių ir Rėkyvos šlapynių kompleksuose.....	33
2.3.3 Hidrologinis monitoringas parinktose aukštapelkėse.....	35
2.4 Medžių mėginių ėmimas ir datavimas .....	36
2.5 Dendrochronologinių duomenų naudojimas hidrometeorologinių sąlygų nustatymui.....	37
3. TYRIMŲ REZULTATAI.....	39
3.1 Hidrometeorologinių sąlygų įtaka pariniams ir sezoniniams medžių kamienų radialiesiems pokyčiams.....	39
3.1.1 Radialijų kamienų pokyčių priklausomybė nuo temperatūros ir gruntinio vandens lygio .....	39
3.1.2 Radialijų kamienų pokyčių periodai .....	42

3.1.3 Radialiujų kamienų pokyčių paros ciklai ir jų priklausomybė nuo hidrometeorologinių sąlygų.....	44
3.1.4 Ramybės būsenos giliosios fazės nustatymas .....	51
3.2 Medžių kamienų radialieji pokyčiai skirtingomis drėkinimo sąlygomis.....	55
3.3 Meteorologinių sąlygų įtaka metiniam medžių prieaugiui.....	63
3.4 Aukštapelkės gruntinio vandens lygio svyravimų rekonstrukcija naudojant kelis metodus .....	69
3.4.1 Gruntinio vandens lygio rekonstrukcija pagal kritulių kiekio ir potencialios evapotranspiracijos skirtumą.....	69
3.4.2 Metinių medžių rėvių priklausomybė nuo gruntinio vandens lygio.....	71
3.4.3 Gruntinio vandens lygio rekonstrukcija pagal metines medžių rieves.....	73
3.5 Gruntinio vandens lygio įtaka metiniam pušų prieaugiui .....	77
IŠVADOS.....	82
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	83
SANTRAUKA .....	100
PADĖKA.....	137
PUBLIKACIJŲ SĄRAŠAS IR JŲ KOPIJOS .....	140
UŽRAŠAMS .....	175

## SANTRUMPOS

- BS – vandens lygio pakilimas Baltijos sistemoje virš Baltijos jūros lygio, m
- EW (angl. *early wood*) – ankstyvoji mediena
- GTC – Gamtos tyrimų centras
- GWD (angl. *groundwater depth*) – gruntinio vandens gylis nuo durpės paviršiaus
- GWT (angl. *groundwater table*) – santykinis gruntinio vandens lygis
- LHMT – Lietuvos hidrometeorologijos tarnyba
- LW (angl. *late wood*) – vėlyvoji mediena
- MGWT – modeliuojamas gruntinio vandens lygis apskaičiuojamas pagal septynerių metų P-PET sumas
- MS – meteorologinė stotis
- P – krituliai
- PET – potenciali evapotranspiracija
- P-PET – kritulių kiekio (P) ir potencialios evapotranspiracijos (PET) skirtumas
- Raw chronologija – absoliučių duomenų chronologija
- RES chronologija (angl. *residual chronology*) – likutinė chronologija
- RSCH (angl. *radial stem changes*) – radialusis kamieno pokytis
- RW (angl. *ring width*) – vidutinis medžių metinių rėvių plotis tam tikrais metais (Raw/RES/STD chronologijos)
- RWGWT – gruntinio vandens lygis apskaičiuojamas pagal metines rieves
- STD chronologija (angl. *standard/detrended chronology*) – standartinė chronologija
- T – temperatūra

## TERMINŲ ŽODYNAS

Akrotelmas – viršutinis aukštapelkės durpių sluoksnis esantis aukščiau apatinės gruntinio vandens lygio ribos. Jam būdinga aerobinių ir anaerobinių sąlygų kaita, nulemianti organinės medžiagos skaidymo intensyvumą ir durpių kaupimąsi.

Ankstyvoji mediena (EW) (angl. *early wood*) – vidinė metinės rievės dalis, esanti šerdies pusėje, minkštesnė, dažniausiai šviesesnės spalvos. Ankstyvoji mediena susidaro pavasarį–vasaros pradžioje. Ją sudaro plonasiainiai ir plačiaertmiai elementai, kuriais iš šaknų į viršų teka vanduo.

Juostinis dendrometras (angl. *band dendrometer*) – medžio kamieno apimties matavimo prietaisas. Rankiniai arba savadarbiai dendrometrai – tai plieninės juostos, kurių galai sujungti spirale. Matavimai atliekami apjuosus medžio kamieną ir matuojant atstumą tarp dviejų juostoje fiksuotų taškų. Automatiniai juostiniai dendrometrai yra ženkliai tikslesni ir gali matuoti radialųjį prieaugį pagal nustatytą laiko intervalą.

Kamieno apimties pokyčiai – kamieno apimties pasikeitimas per laiko vienetą. Tyrimuose naudoti automatiniai dendrometrai kamieno apimtį matuoja kas valandą.

Kamieno pokyčių paros ciklas (angl. *diurnal/daily/stem cycle*) – ciklas, kuris parodo medžio kamieno pokyčius per parą. Apskaičiuojami vidutiniai kamieno pokyčiai tos pačios valandos visų parų tam tikru periodu.

Kamieno pokyčių periodai – suminiai valandiniai kamieno pokyčiai per metus, skirstomi į periodus pagal tai, ar kamienas plečiasi, susitraukia ar yra ramybės būsenoje.

Lagas – šlapia aukštapelkės pakraščio juosta, surenkanti vandenį nuo apypelkio reljefo paaukštėjimų ir aukštapelkės šlaito.

Medžių rievių sinchronizacija, kitaip kryžminis datavimas (angl. *cross dating*) – dėl kasmetinės vegetacijos ir ramybės sezonų kaitos medžiuose susiformuoja sluoksninė struktūra, t. y. medienos rievių seka, kurioje glūdi informacija apie augimo sąlygas konkrečiais metais. Jei praėję medžių augimo laikotarpiai laiko skalėje perdengia vienas kitą, jų rievių pločių (metinio radialiojo prieaugio) serijos dendrochronologiniais metodais gali būti tarpusavyje sinchronizuotos, t. y. vienerių metų tikslumu datuotos viena kitos atžvilgiu.



Plynė – pelkinių bendrijų tipas su neišreikštu medžių ardu.

Radialusis kamieno pokytis (RSCH) (angl. *radial stem changes*) – medžio kamieno spindulio pokytis per tam tikrą laiką. Kamieno radialusis didėjimas pasireiškia dėl ląstelių plėtimosi ir dalijimosi pavasario–vasaros sezonais. Atėjus žiemai dėl nepakankamo vandens pasisavinimo ir šalčio įtakos medžio ląstelės traukiasi ir kamieno spindulys mažėja. RSCH sudaro grįžtamoji ir negrįžtamoji dedamosios. Negrįžtamąją dedamąją sudaro kamieno radialusis prieaugis dėl brazdo ląstelių dalijimosi ir medienos ląstelių formavimosi. Grįžtamasis pokytis vyksta dėl medienos ląstelių vandeningumo pokyčių.

Prieaugis (angl. *increment*) – medžio kamieno prieaugis vegetacijos sezono metu per tam tikrą laiką. Medžio kamienas tuo pat metu į visas puses auga skirtingu mastu. Metinis radialusis prieaugis parodo visą matuojamo medžio kamieno perimetro pokytį per metus.

Raistas – pelkinių bendrijų tipas su gerai išreikštu medžių aukštu; medžių šakos tokiose bendrijose paprastai susisiečia.

Raw chronologija (absoliučią duomenų chronologija) – chronologija sudaryta iš pradinių tiriamų medžių rėvių pločio vidurkių. Tai visų tais pačiais metais chronologijoje persidengiančių medžių rėvių pločių vidurkiai (mm).

RES chronologija – likutinė (angl. *residual*) tiriamų medžių rėvių pločio chronologija. Tai skirtumas tarp stebimos ir modeliavimo vertės atlikus autokoreliaciją. Chronologijoje pašalinta kiekvienos serijos autoregresija. Išreiškiama indeksu.

STD chronologija – indeksuota, arba standartizuota, chronologija (angl. *standard/detrended chronology*). Tai chronologija, kurioje pašalinta medžių rėvių pločio serijų amžiaus tendencija. Chronologija sudaroma naudojant indeksus, gautus apskaičiavus santykį tarp rėvės pločio ir išlyginamosios kreivės (angl. *indexing curve, detrending curve, growth curve*) reikšmės kiekvienais metais.

Vėlyvoji mediena (LW) (angl. *late wood*) – išorinė metinės rėvės dalis, esanti žievės pusėje, dažniausiai tamsesnės spalvos. Vėlyvoji mediena susidaro vasaros pabaigoje. Ją sudaro storasieniai elementai. Ši mediena atlieka mechanines funkcijas.

## ĮVADAS

Pasaulyje nerimsta diskusijos apie klimato kaitą. Klimato kaitos fenomeną tyrinėja viso pasaulio mokslininkai. Greta kitų mokslo tiriamųjų veiklų ieškoma indikatorių, galinčių paliudyti klimato kaitos faktą, atliekama retrospektyvi klimato kaitos analizė, prognozuojama klimato kaita bei galimos jos pasekmės. Šiems tikslams pasiekti pasitelkiami ir dendrochronologiniai tyrimai.

Dendrochronologiniai tyrimo metodai sudaro galimybes tirti hidrometeorologines sąlygas tų laikotarpių, kai dar nebuvo instrumentinių matavimų. Praeities klimatas ir hidrologinės sąlygos gali būti analizuojamos vertinant medžių augimo tempus. Išskirtinis dendrochronologinių tyrimų objektas yra aukštapelkėse augančios pušys (toliau – aukštapelkių pušys; Edvardsson et al., 2016).

Lyginant su dauguma kitų ekosistemų, durpynai globaliu mastu yra pagrindiniai anglies (C) absorbentai (Gorham, 1991; Lafleur et al., 2001; Turunen et al., 2002; Sagerfors et al., 2008; Salm et al., 2009), bei gali būti reikšmingi CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> ir NO<sub>x</sub> šaltiniai (Matthews, Fung, 1987; Saarnio et al., 2007; Turetsky et al., 2014), ypač tuo atveju, jei keičiasi hidrologinės durpynų sąlygos. Anglies deponavimo, t. y. CO<sub>2</sub> įsisavinimo, greitis ir CH<sub>4</sub> emisijos labai priklauso nuo to, kokiame aukštyje virš gruntinio vandens lygio yra durpyno paviršius (Moore, Knowles, 1989; Freeman et al., 1993; Salm et al., 2009; Gažovič et al., 2010; Mitsch et al., 2013). Durpynų hidrologiniai pokyčiai gali būti nusakomi matuojant gruntinio vandens lygį (GWT), tačiau nustatyti C deponavimo ir GWT ryšius trukdo trumpas, dažnai vos keleriais metais apribotas instrumentinių matavimų laikotarpis (Tamkevičiūtė et al., 2018).

Medžių augimas durpynuose labiausiai priklauso nuo gruntinio vandens lygio svyravimų: esant aukštam vandens lygiui, šaknų sistema įsisavina mažiau deguonies ir maisto medžiagų (Boogie, 1972; Pukienė, 2001; Leuschner et al., 2002; Edvardsson et al., 2016), būtent dėl to medžių kaita durpynuose gali atspindėti visus praeityje buvusius gruntinio vandens lygio svyravimus. Kadangi metiniai aukštapelkių pušų augimo greičiai priklauso ir nuo temperatūros, ir nuo kritulių kiekio, galima daryti išvadą, kad medžių augimą šioje aplinkoje gali apriboti vienas arba keli faktoriai. Be to, reikia turėti omenyje, kad gruntinio vandens atsakas į klimatinių sąlygų pokyčius, kaip ir gruntinio vandens įtaka medžių metinėms rievėms, gali vėluoti (Kilian et al., 1995; Läänelaid et al., 2014; Tamkevičiūtė et al., 2018). Siekiant geriau suprasti sudėtingas aukštapelkių pušų augimo ir

hidrometeorologinių rodiklių sąveikas, o taip pat siekiant pagrįsti gruntinio vandens lygio rekonstrukciją, naudojant pelkėse augančių pušų metines rieves, reikalingos papildomos studijos.

Didelė dalis šiame darbe analizuojamų duomenų, reikalingų aukštapelkių pušų metinių rievų ir hidrometeorologinių rodiklių ryšio nustatymui, surinkti vykdant Lietuvos ir Šveicarijos bendradarbiavimo projektą CLIMPEAT („*Climate change in peatlands: Holocene record, recent trends and related impacts on biodiversity and sequestered carbon*“, projekto sutarties nr. CH-3-ŠMM-01/05). CLIMPEAT projekte vienomis svarbiausių klimato indikatorių pasirinktos metinės pušų rievės. Pažymėtinas ypač didelis dr. Johannesas Edvardssonas, Lundo universiteto Geologijos departamento mokslo darbuotojas, indėlis, atliekant projekte vykdytą dendrochronologinių tyrimų dalį, kuriuose dalyvavo ir šio darbo autorė. 3.2 skyriuje analizuojami ir dr. J. Edvardssonas sudarytų Rėkyvos, Kerėplio bei Aukštumalos aukštapelkių pušų metinių rievų chronologijų duomenys, kurių panaudojimui buvo gautas dr. J. Edvardssonas sutikimas.

**Darbo tikslas** – ištirti aukštapelkėse augančių pušų kamienų radialiųjų pokyčių priklausomybę nuo hidrometeorologinių sąlygų ir pagal dendrochronologinius rodiklius įvertinti hidrometeorologinių sąlygų rekonstrukcijos galimybę.

### **Darbo uždaviniai**

1. Įvertinti hidrometeorologinių sąlygų įtaką pariniams ir sezoniniams aukštapelkėse augančių pušų kamieno apimties pokyčiams.

2. Įvertinti galimybę pagal skirtingų vietovių pušų rievų plotį nustatyti drėgmės sąlygų pokyčius.

3. Įvertinti meteorologinių sąlygų ir gruntinio vandens lygio įtaką metiniam aukštapelkėse augančių pušų prieaugiui.

4. Skirtingų indikatorių metodu rekonstruoti aukštapelkės gruntinio vandens lygio kaitą XIX–XXI a.

### **Darbo aktualumas ir pritaikomumas**

Durpynai randami mažiausiai 175 šalyse. Jie užima apie 4 mln. km<sup>2</sup> plotą arba 3 % pasaulio sausumos. Lietuvos durpynai šiuo metu užima 9,9 % šalies teritorijos, iš jų tik 2,7 % yra natūralūs ir pusiau natūralūs, likę 7,2 % yra antropogeniškai paveikti (sausinti). Žemapelkiniai durpynai užima 77,8 % durpynų ploto, tuo metu tarpinio tipo durpynai – 14,6 %, aukštapelkiniai – 7,6 % (Taminskas et al., 2012; Povilaitis et al., 2011).

Durpynai yra paskelbti unikaliomis rečiausių augalų ir gyvūnų buveinėmis, o atviro tipo aukštapelkės pripažintos unikaliomis europinės svarbos buveinėmis (aktyvios aukštapelkės (7110), degradavusios aukštapelkės (7120); Tarybos Direktyva 92/43/EEB). Šioms buveinėms gresia išnykimas, todėl jos yra svarbios išsaugant Lietuvos ir ES biologinę įvairovę. Dėl šios priežasties daugiau nei 50 % Lietuvos durpynų yra įtraukti į NATURA 2000 tinklą.

Darnus durpynų tvarkymas taip pat turi įtakos šiltnamio dujų koncentracijai atmosferoje. Remiantis kaimyninėse šalyse sukauptais duomenimis ir skaičiavimais, natūralūs Lietuvos durpynai gali įsisavinti 768 000 tonų CO<sub>2</sub> (179 000 tonų gali būti įsisavinti durpių formavimosi proceso metu, 589 000 tonų – per miškų biomasę). Savo ruožtu, CO<sub>2</sub> sukauptas nepažeistuose Lietuvos durpynuose galėtų sukurti 11,6 mln. Eur dydžio metinę ekonominę vertę (Valatka, Oskolokaitė, 2010). Ekonominė durpynų produktyvumo (durpės, mediena, augalai, gyvūnai) vertė sudaro 26,9 Eur/ha<sup>-1</sup>. Tačiau perdėtas durpynų sausinimas, tenkinant žemės ūkio, miškininkystės ir durpių kasimo reikmes, ne tik sunaikino daugelio rūšių buveines ir sumažino bioįvairovę 468 000 ha plote, bet ir sutrikdė jų reguliacinę funkciją, padarydamas Lietuvai daugiau kaip 75 mln. Eur žalą (Valatka, Oskolokaitė, 2010).

Taigi išsamios žinios apie klimato kaitą ir jo poveikį durpynams bei gruntinio vandens lygiui būtinos, idant būtų vykdomas darnus šių vertingų ekosistemų valdymas ir išsaugojimas. Darbo autorės tyrimų metu gauti duomenys, geriau atskleidžiantys ryšius tarp pedosferos, atmosferos ir antropogeninių reiškinių, tikimasi, prisidės prie durpynų išsaugojimo ir tvarkymo. Remiantis medžių tyrimais sudaromos medžių rėvių chronologinės sekos, pagal kurias rekonstruojamas gruntinio vandens lygis. Įvertinus Holoceno metu vykusius pokyčius, galima nustatyti durpynų užaugimo medžiais laikotarpius, parengti durpynų istorines, klimatines ir aplinkos kaitos interpretacijas.

Tikimasi, kad tyrimo rezultatai bus naudingi aplinkosaugos, bioįvairovės išsaugojimo, šlapynių hidrologijos ir klimato kaitos sričių specialistams, suteiks žinių, reikalingų rengiant Lietuvos durpynų racionalaus naudojimo strategiją. Taip pat tikimasi, kad tyrimo rezultatai bus naudingi analizuojant klimato ir gruntinio vandens lygio pokyčius, nustatant šių pokyčių įtaką dabartinių durpynų būklei ir durpynų kaitai ateityje.

## **Darbo naujumas ir reikšmė**

Pastaraisiais metais pasirodė daug mokslinių darbų, kuriuose tiriama aukštapelkių raidos istorija, durpių formavimosi ypatumai įvairiose aplinkose ir sąlygose. Didžioji jų dalis paremti makrofosilijų bei dendrochronologiniais duomenimis, augalijos kartografinė medžiaga arba aerofotografijų interpretacijomis (Frankl, Schmeidl, 2000; Pellerin, Lavoie, 2003; Linderholm, Leine, 2004; Mauquoy, Yeloff, 2007; Gunnarson, 2008; Eckstein et al., 2010; Edvardsson et al., 2014; Edvardsson et al., 2015a; Stančikaitė et al., 2017). Dendrochronologinis tyrimo metodas paplitęs, kadangi pušų medienos liekanos dideliais kiekiais randamos durpėse ir teikia patikimus duomenis apie ekologinius pokyčius ir jų pasireiškimo laiką (Munaut, 1966; Munaut, Casparie, 1971; McNally, Doyle, 1984; Chambers et al., 1997; Pukienė, 1997; Gunnarson, 1999; Lagueard et al., 1999; Boswijk, Whitehouse, 2002; Boswijk, 2003; Läänelaid, 1979, 1982; Vaganov, Kachaev, 1992; MacDonald, Yin, 1999; Linderholm et al., 2002; Linderholm, Leine, 2004; Dauskane et al., 2011; Moir, 2012; Edvardsson et al., 2015b). Pelkėse augusių pušų kamienų liekanos durpių sluoksnyje išsilaiko nesuirusios, todėl jų rievlių tyrimai turi didžiulę reikšmę atliekant palyginamuosius klimato tyrimus ne tik Baltijos regione, bet ir kitose pasaulio dalyse.

Įvairių medžių rūšių metinių rievlių reakcija į klimatą bei metinių rievlių savitumai labiausiai susiję su biologinėmis medžių savybėmis, litologine dirvožemių sudėtimi, vandens ir maisto medžiagų kiekiu šaknų zonoje. Medžio metinės rievės leidžia įvertinti augimo sąlygas vienu metų tikslumu, tačiau metinių rievlių potencialas hidrologinių sąlygų rekonstrukcijai menkai išnaudotas (Eckstein et al., 2008, 2009, 2010; Moir et al., 2010; Edvardsson et al., 2012, 2016).

Nors pastaraisiais metais Lietuvoje buvo nemažai diskutuota apie atskirų durpynų komponentus, jų tarpusavio sąveiką bei ryšius, taip pat antropogeninę veiklą ir klimato pokyčių atspindį durpynuose (Šimanauskienė et al., 2008; Linkevičienė et al., 2008; Mažeika et al., 2009; Taminskas et al., 2011; Zinkutė et al., 2015; Kažys et al., 2015), tačiau ilgą laiką Lietuvos durpynų tyrimai tebuvo epizodiniai (Balevičius ir kt., 1984; Стравинскене, 1981) ir nagrinėjantys daugiausiai atskirus durpynų reiškinius (Pakalnis, 1987; Bumblauskis, 1983; Pukienė, 1997).

Šioje disertacijoje analizuojami aukštapelkių tyrimų klausimai Lietuvoje nagrinėti mažai, o pušų kamieno apimties pokyčių nustatymo automatiniais dendrometrais tyrimai visai nevykdyti. Lauko tyrimų aikštelėse, įrengus gręžinius su automatiniais gruntinio vandens lygio ir temperatūros

matuokliais, bei automatinius dendrometrus, buvo vykdytas aukštapelkių hidro-dendrochronologinis monitoringas. Tai suteikė gana naujos informacijos apie trumpalaikes hidrometeorologinių rodiklių ir medžių kamieno apimties kitimo sąveikas. Naudojant kompleksinius hidrologinius ir dendrochronologinius tyrimų metodus, šiame darbe analizuojama klimato ir vandens režimo kaita aukštapelkėse bei jų aplinkoje, įvertinama hidrometeorologinių sąlygų įtaka medžių augimui, nustatomas aukštapelkių pušų augimas XIX a. pabaigoje – XXI a. pradžioje. Remiantis medžių tyrimais (metinių rievų prieaugio mėginių analize) buvo sudaromos medžių rievų serijos, pagal kurias rekonstruojami gruntinio vandens lygio bei klimato svyravimai. Medžių radialiajam prieaugiui tirti taikytas dendrometrų metodas leidžia spręsti ne vien apie prieaugio dinamiką, bet ir apie kitokius medžio kamieno apimties pokyčius, medžių fiziologinę būklę tam tikrais laiko periodais, priklausomybę nuo hidrometeorologinių sąlygų ir rievės formavimosi ypatybių.

### **Mokslinio darbo aprobacija**

Darbo tema paruošti septyni straipsniai. Trys iš jų publikuoti, vienas pateiktas periodiniuose mokslo leidiniuose, turinčiuose citavimo rodiklį („*Clarivate Analytics Web of Science (WoS)*“). Dar trys straipsniai publikuoti tarptautinėse duomenų bazėse referuojamuose ir kituose leidiniuose. Moksliniai tyrimai disertacijos tema pristatyti septyniose respublikinėse ir tarptautinėse mokslinėse konferencijose. Taip pat publikuotos aštuonios konferencijų tezės.

### **Darbo struktūra**

Disertaciją sudaro įvadas, literatūros apžvalga, tyrimo metodikos ir tyrimo rezultatų pristatymas, išvados, santrauka, padėka, publikacijų sąrašas ir jų kopijos. Pateiktos naudotos santrumpos, sudarytas naudotų terminų žodynas. Naudotos literatūros sąrašą sudaro 195 šaltiniai. Darbo apimtis – 176 puslapių. Disertacijoje pateiktos 8 lentelės ir 36 paveikslai.

## 1. LITERATŪROS APŽVALGA

Medžiai per visą savo augimo laiką kiekvienų metų rievėse (rievių plotis, radialusis prieaugis, tankis, cheminė rievių sudėtis) kaupia informaciją apie buvusias jų aplinkos gamtines ir antropogenines sąlygas. Todėl ne veltui informacija, gauta tyrinėjant kasmetinio medžių prieaugio dėsningumus ir jų priklausomybę nuo įvairių veiksnių, turi platų pritaikomumą daugelyje mokslo ir ūkio šakų. Klimatologija, astrofizika, archeologija, architektūra, kalnų glaciologija ir kitos mokslo šakos, sprendamos įvairius uždavinius, remiasi dendrochronologiniais tyrimais.

Sėkmingas medžių radialiojo prieaugio dinamikos dėsningumų ir jų priklausomybės nuo įvairių veiksnių pritaikomumas daugelyje mokslo ir ūkio šakų yra glaudžiai susijęs su tyrimams naudojamų medžių amžiaus nustatymu. Patikimai rekonstruoti buvusias gamtinės aplinkos sąlygas ir vėliau prognozuoti būsimas galima tik išsiaiškinus paros, vienerių ir kelerių metų bei šimtmetinius aplinkos sąlygų kaitos ciklus. Dėl palyginti jauno Lietuvoje augančių medžių amžiaus, siekiančio 200–300 (rečiau 400) metų, o aukštapelkėse – tik iki 100 metų, yra sunku patikimai nustatyti ilgalaikius (šimtmetinius ir ilgesnius) ciklus. Todėl sudarinėjamos ilgaamžės rievių serijos, panaudojant subfosilinės medienos prieaugio duomenis. Kadangi įvairiems pastarojo tūkstantmečio pastatams, meno kūriniams, baldams ir kt. daugiausiai buvo naudota paprastosios pušies (*Pinus sylvestris* L.), paprastojo ąžuolo (*Quercus robur* L.) ir paprastosios eglės (*Picea abies* (L.) Karsten) mediena, šių medžių rūšių radialusis prieaugis ištirtas geriausiai.

### 1.1 Dendrochronologiniai tyrimai

Ryšys tarp medžių radialiojo prieaugio ir klimato bei kitų aplinkos veiksnių pastebėtas jau XVI a. – tai liudija Leonardo da Vinčio, K. Linėjaus, D. Kuechlerio, A. Pokornio, D. Kapteyno, F. Švedovo darbai (Schweingruber, 1993). Pirmuoju dendrochronologu reikėtų laikyti Leonardą da Vinčį (1452–1519), kuris pastebėjo metinę rievių kilmę ir nustatė, kad jų plotis priklauso nuo drėgmės sąlygų, bei samprotavo apie klimatinių sąlygų rekonstrukciją (Baillie, 1982; Corona, 1986; Kienast, 1985; Shiyatov, 1988; Stallings, 1937). 1708–1709 metais metinėse medžių rievėse pastebėję šalčio pažeidimus daugelis mokslininkų, tarp jų ir K. Linėjus, susiejo juos su šalta tu metų žiema (Studhalter, 1956). 1837 metais Charlesas Babbageas aprašė medžių rievių sinchronizaciją (ang. *cross dating*) ir teigė, jog šis metodas padėtų nustatyti durpynuose palaidotų miškų amžių (Baillie, 1982). 1892

metais rusų mokslininkas F. Švedovas siedamas metines rieves su sausrų pasikartojimu aprašė baltosios akacijos siaurų rėvių ritmiškumą (Svedov, 1892). 1898 m. R. Hartigas nustatė, kad rėvių prieaugis susijęs su vegetacijos periodo trukme, krituliais ir oro temperatūra. T. ir R. Hartigų darbams priklauso ekstremalių klimato sąlygų ir „iškrentančių“ rėvių bei defoliacijos įtakos radialiajam prieaugiui tyrimai. XIX a. pabaiga – XX a. pradžia priskiriama pirmajam dendrochronologijos mokslų periodui (Schweingruber, 1993, 1996).

Sisteminę moksliniai tyrimai pradėti ir dendrochronologija kaip mokslo šaka susiformavo tik XX a. pradžioje (Schweingruber, 1993). Dendrochronologijos mokslinio termino autorystė priklauso Jungtinių Amerikos Valstijų (JAV) mokslininkui A. E. Douglassui (1867–1962), kuris ir pradėjo taikyti sistemingus mokslinius tyrimus, o rėvių datavimą naudoti ilgalaikių dendroskalių sudarymui (Douglass, 1914, 1921). A. E. Douglassas tyrė meteorologinių veiksnių ir saulės aktyvumo įtaką medžių metinėms rėvėms. Šio mokslininko gautos koreliacijos tarp žiemos kritulių ir šiaurinėje Arizonos dalyje augusių medžių rėvių plocių (Douglass, 1914) vėliau buvo patvirtintos tikslios statistinės analizės metodais (Fritts, 1976). XX a. pradžios – XX a. vidurio laikotarpis priskiriamas antrajam dendrochronologijos mokslų periodui (Schweingruber, 1993). Laikotarpio pabaigoje susiformavo dvi dendrochronologijos šakos: dendrochronologija siaurąja prasme, t. y. ilgaamžių dendroskalių sudarymas, ir dendroklimatologija, apimanti klimato veiksnių rekonstrukciją (Колчин, Черных, 1977).

Trečiojo dendrochronologijos mokslų periodo pradžia laikytini 1939-ieji metai (Schweingruber, 1993). Šiuo laiku B. Huberis Europoje patvirtino A. E. Douglasso nustatytus dėsningumus (Huber, 1941; Liese, 1978). Sudarytos ilgesnės radialiojo prieaugio chronologijos. B. Huberis naudodamas archeologinę medieną sudarė 1000 metų amžiaus ažuolo chronologiją Vakarų Europoje. E. Schulmanas vystė sinchronizavimą Amerikoje. Pirmą kartą Europoje atlikta klimato rekonstrukcija. Vystant mokslinius tyrimus Europoje, kur prieaugį ribojantys veiksniai kitokie nei Amerikoje, pakeisti sinchronizacijos principai (Schweingruber, 1993, 1996).

Ketvirtasis dendrochronologijos mokslų periodas prasidėjo 1950 metais (Schweingruber, 1993). Šio periodo metu Vokietijoje, Sovietų Sąjungoje (Novgorode), Didžiojoje Britanijoje, Lenkijoje, Švedijoje, Lietuvoje, Suomijoje ir kitose šalyse sudarytos ilgalaikės chronologijos (Pukienė, 1997). Atrandami radioanglies datavimo metodai. 1957 m. O. Lenzas pritaikė naują dendroklimatologijos ir dendroekologijos tyrimų metodiką –



radiodensitometriją, kuria rėvių medienos tankio svyravimai tiriami naudojant rentgeno spindulius (Eschbach et al., 1995; Kienast, 1985). Septintajame dešimtmetyje išleistos pirmosios dendroklimatologinių tyrimų monografijos: 1974 m. T. Bitvinsko, 1976 m. H. Fritts (Schweingruber, 1996). Sukurta prieaugiui įtaką darančių veiksnių nustatymui skirta atsako funkcijos (angl. *response function*) metodologija (Vitas, 2002). Šiaurės Amerikoje aštuntojo dešimtmečio viduryje atliktos pirmosios kiekybinės klimato rekonstrukcijos (Blasing, Fritts, 1973). Pusdykumių klimato sąlygomis medžiai jautriausiai reaguoja į drėgmės trūkumą, todėl jų prieaugio svyravimai gerai koreliuoja su kritulių kiekiu ir su hidrologiniais rodikliais: upių vandeningumu, ežerų lygiu (Pukienė, 1997). Atsižvelgiant į vandens išteklių svarbą sausringose JAV valstijose, bei pasitelkus medžių prieaugį atliktos hidrologinių rodiklių rekonstrukcijos (Stockton, Fritts, 1973; Stockton, 1975; Stockton, Meko, 1975; Cleaveland, Stahle, 1989; Meko et al., 1991). Praeities sausroms (Stahle, Cleaveland, 1988; Stahle et al., 1988; Huges, Brown, 1992), saulėtumo trukmei (Stahle et al., 1991), kritulių kiekio kaitai (Blasing, Duvick, 1984; Blasing et al., 1988) rekonstruoti buvo panaudotos skirtingos pusdykumių medžių rūšys. Kitame medžių paplitimo arealo pakraštyje, Šiaurės Amerikos arktinėje zonoje, kur pakankamai stabilus ribojantis veiksnys yra temperatūra, medžių prieaugis panaudotas temperatūros rekonstravimui (Blasing, Fritts, 1973; Jacoby, Cook, 1981; Jacoby et al., 1985; Jacoby et al., 1988).

## 1.2 Dendrochronologiniai tyrimai Lietuvoje

Pirmuosius dendrochronologinius tyrimus Lietuvoje atliko T. Bitvinskas 1953 metais Biržų girios juodalksnyuose. Tirtas juodalksnio (*Alnus glutinosa* L. Gaertn.), paprastosios pušies bei paprastosios eglės prieaugis (Bitvinskas, 1986). 1968 metais Botanikos institute, įsteigus dendroklimatochronologijos laboratoriją, prasidėjo naujas dendrochronologinių tyrimų etapas, pradėtos naudoti naujos tyrimų metodikos (Bitvinskas, 1986, 1998). 1974 metais pradėti medžių metinio prieaugio priklausomybės nuo klimato veiksnių tyrimai. T. Bitvinskas konstatavo, kad dėl to, jog prieaugis priklauso tiek nuo temperatūros, tiek nuo kritulių, geresnius rezultatus atskleidžia koreliacija su hidrologiniais rodikliais, apjungiančiais tam tikrų mėnesių grupių temperatūros ir kritulių rodiklius (Битвинскас, 1981). Tuo pačiu laikotarpiu formavosi nauja dendrochronologų karta: J. Kairaitis, J. Karpavičius, A. Stupneva, V. Brukštus, L. Kairiūkštis, V. Stravinskienė, V. Antanaitis, I. Čerškienė,

V. Bartkevičius ir kt. (Bitvinskas, 1986; Kairiūkštis, 1973). 1980 m. Kaune įkurtas dendrochronologinių duomenų bankas. Sudarinėjant ilgaamžes chronologijas R. Pukienės 1997 m. paskelbtoje disertacijoje „Pušynų augimo dinamika Užpelkių tyrelio aukštapelkėje subatlančio laikotarpiu“ sudaryta 2200 metų Užpelkių tyrelio paprastosios pušies chronologija. 2013 metais Gamtos tyrimų centre įgyvendinant Šveicarijos bendradarbiavimo programą pradėtas vykdyti CLIMPEAT („Klimato kaita durpynuose: Holoceno ženklai ir dabartinės tendencijos; įtaka bioįvairovei ir anglies deponavimui durpėse“) projektas. Penkiose Lietuvos aukštapelkėse (Aukštumaloje (Šilutės raj.), Rėkyvoje (Šiaulių raj.), Kerėplyje (Trakų raj.), Rieznyčioje (Trakų raj.), Čepkeliuose (Varėnos raj.)) iširtos augančios ir subfosilinės pušys. 2014–2018 metais paskelbti nauji aukštapelkėse augusių pušų dendroklimatologinių tyrimų rezultatai (Tamkevičiūtė ir kt., 2014; Edvardsson et al., 2015a; Edvardsson et al., 2015b; Edvardsson et al., 2016a; Tamkevičiūtė et al., 2018). Pasitelkus dendrochronologinius ir radioaktyviosios anglies metodus, bei ankstesnius R. Pukienės, A. Vito ir kitų Latvijos bei Estijos mokslininkų tyrimus, sudaryta kelių tūkstantmečių chronologija ir įvertinta ilgalaikių klimato ir drėgmės rekonstrukcijų Baltijos regione galimybė (Edvardsson et al., 2016a).

### 1.3 Aukštapelkėse augančios paprastosios pušies (*Pinus sylvestris* L.) tyrimai

Spygliuočiai, palyginus su lapuočiais, pripažįstami kaip geresni aplinkos būklės indikatoriai (Dagys, 1980), o paprastoji pušis dendroekologiniu požiūriu yra viena svarbiausių rūšių Europoje (Schweingruber, 1996). Ji auga įvairiose augavietėse: mineraliniame ir durpiniame grunte, žemapelkėse, aukštapelkėse ir tarpinio tipo pelkėse, prisitaikydama prie kintančių aplinkos sąlygų (Vitas, Erlickytė, 2008). Dėl šių priežasčių paprastoji pušis – viena išsamiausiai dendrochronologiniu požiūriu iširtų rūšių tiek Lietuvoje, tiek ir kitose Baltijos šalyse (Nekrošienė, 2013).

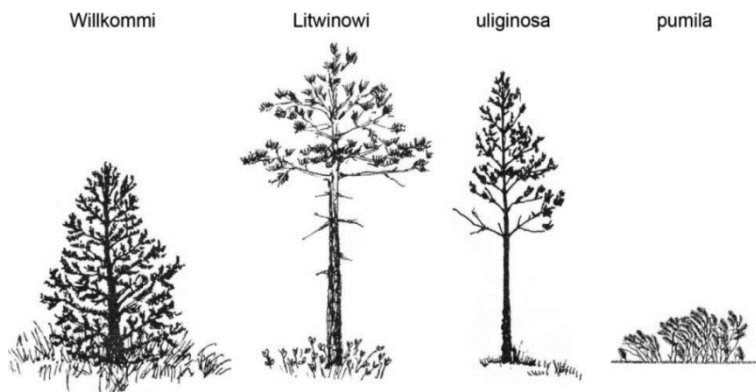
Pelkės durpynuose išaugusios pušys labai skiriasi nuo pušų, augančių mineraliniame grunte. Aukštapelkėje pušis turi prisitaikyti prie nuolat kintančio gruntinio vandens lygio, mažo mineralinių medžiagų ir deguonies kiekio, bei didelių temperatūros svyravimų šaknų zonoje (Sinkevičius, 2001; Schweingruber, 1988; Linderholm et al., 2002). Medžių jautrumas glaudžiai susijęs su augaviečių hidrologiniu režimu ir dėl to kintančia šaknų sistema. Kaip teigia M. Kalininas (Калинин, 1983), medžiai augdami aukšto gruntinio vandens lygio sąlygomis formuoja paviršinę šaknų sistemą. Dėl

deguonies trūkumo durpėse augančių augalų audiniuose yra oru užpildytų stambių tarpulauščių. Durpėse įsitvirtinusių augalų požeminės dalys yra prisitaikiusios augti ne gilyn į substratą, bet kilti aukštyn kartu su besikaupiančiu durpių sluoksniu. Aukštapelkių augalų šaknys telkiasi viršutiniame (iki 20–30 cm gylio), o kartais net ir žalių kiminų sluoksnyje (Jarašius, 2015). Dėl tokios šaknų sistemos aukštapelkėse augančios pušys į gruntinio vandens lygio pokyčius reaguoja jautriau nei pušys, augančios mineraliniame grunte. Manoma, kad aukštapelkėse augančių pušų amžių ribojantis veiksnys yra šaknies kaklelio slūgsojimo gylis. Kuo senesnė pušis, tuo gyvų kiminų ir besiformuojančių durpių sluoksnius virš jos šaknies kaklelio yra storesnis. Rusų botanikas V. N. Sukačiovas ilgai tyrinėjęs pelkėse augančių pušų formas nerado šaknų kaklelių giliau kaip 50 cm. Manoma, kad tai yra pušies gyvybingumo riba (Sinkevičius, 2001). Aukštumalos aukštapelkę 1898 metais tyrinėjęs C. A. Weberis nustatė, kad nunykusių skurdžių pušelių šaknies kaklelis buvo užklotas 30–40 cm samanų sluoksniu (Weber, 2016). Kai kiminai užauga virš šaknies kaklelio, vėjas judindamas kamieną išsuka aplink jį ratą. Kai šiame cilindre prisisunkia vandens ir šaknies kaklelis apsemiamas, medžio būklė pradeda prastėti. Kiti mokslininkai teigia, kad kai tik šaknies kaklelį apauga samanų kilimas ir jis atsiduria 15–20 cm gylyje, pušys pradeda silpti (Sinkevičius, 2001). Aukštapelkėje augančių pušų šaknų sistema privalo išsilaikyti paviršiuje, nes jau 10–20 cm gylyje slūgso vanduo, o jame beveik nėra deguonies. Ne tik deguonies stygius, bet ir toksiški metabolizmo produktai yra augimą ir bendrą augalo gyvybingumą ribojantys veiksniai. Bloga aeracija lemia pušų šaknų atsparumo šalčiams mažėjimą, sutrikdoma maisto medžiagų pasisavinimo apykaita, mažėja A ir B chlorofilo kiekiai spygliuose, trumpėja jų amžius (Sinkevičius, 2001). Medžiai su paviršine šaknų sistema nestabiliai įsitvirtina į durpinį gruntą, todėl dėl vėjo įtakos kamienne gali keliomis kryptimis formuotis suspaustos metinės rievės (Schweingruber, 1988; Linderholm et al., 2002). Kaip vieną pagrindinių kamienų kreivumą lemiančių priežasčių C. A. Weberis (1902) nurodo didelį šakoms, o kartu ir kamienui, tenkantį sniego spaudimą. Dėl tokių medžių augimui nepalankių sąlygų aukštapelkėse augančių pušų tyrimai yra labai komplikuoti.

Atšiauri abiotinių veiksnių lemiama aplinka suformavo savitas pušų formas, tarpusavyje besiskiriančias morfologiškai ir net geografiškai (Sinkevičius, 2001). V. Sukačiovas (Сукачев, 1905) aprašė šiuos pelkių augaviečių *Pinus sylvestris* savitumus: jų spygliai trumpesni, juose daugiau sakotakių, kankorėžiai ir sėklos mažesni, metinės rievės labai siauros, mediena tankesnė ir sakingesnė, todėl lėčiau pūva. Pelkėje augančios pušys

dažniausiai yra žemaūgės, jų laja reta, kamienai ploni, kreivi, pagrindinės šaknys dažniausiai nnykusios, o kitos išlieka susitelkusios paviršiuje. A. McNally ir G. J. Doyle'is (1984a) nurodo, kad Airijoje durpynuose augusių pušų produktyvumas beveik dvigubai mažesnis nei augusių mineraliniame grunte. Be to durpyno pakraštyje augančios pušys turi didesnę prieaugį, nei augusios durpyno centre, net jei durpių sluoksnis po šaknimis yra vienodo storio. Be nepalankių aplinkos sąlygų, mažą pelkių pušų prieaugį lemia silpnesnė nei mineraliniame grunte mikorizė (McVean, 1963).

Keičiantis augavietės sąlygoms, prie kurių turi prisitaikyti pušis, keičiasi ir jos požymiai. Kaip dar 1915 metais rašė R. J. Abolinas, kiekviena ekologinė pušų forma yra tų sąlygų, kuriose ji formuojasi, išraiška. Jis aprašė pagrindinius bruožus, skiriančius pelkėse augančią pušį nuo pušies augančios mineraliniame grunte, ypač pabrėždamas, kad nors jos ir skiriasi ne tik morfologiškai, bet ir anatomiškai, tačiau vis tiek išlieka tik ekologinėmis formomis, atsiradusiomis dėl nepalankių sąlygų pelkėje. R. Abolinas aprašė keturias formas, kurios vėliau buvo visuotinai pripažintos (Sinkevičius, 2001). Tai *Pinus sylvestris* f. *uliginosa* Abolin, *P. sylvestris* f. *litwinowi* Sukacz., *P. sylvestris* f. *willkommi* Sukacz., *P. sylvestris* f. *pumila* Abolin (1 pav.).



**1 pav.** Ekologinės pelkėse augančių pušų formos: *Pinus sylvestris* f. *uliginosa* Abolin, *P. sylvestris* f. *litwinowi* Sukacz., *P. sylvestris* f. *willkommi* Sukacz., *P. sylvestris* f. *pumila* Abolin (Sinkevičius, 2001)

Labiausiai nepalankiomis sąlygomis auga *Pinus sylvestris* f. *pumila*. Tai keružinės formos pušis. Centrinis kamienas ir pagrindinės šakos paprastai būna durpėje ar kiminų paklotėje. Lietuvoje *P. sylvestris* f. *pumila* aptinkama retai, dažniausiai tik vakarinių rajonų aukštapelkių ir užaugančių ežerų

kompleksuose (Ramanauskas, 1973). *P. sylvestris* f. *willcommii* sutinkama truputį aukštesnėse vietose. Ji pasiekia 1,5–2 m aukštį. *P. sylvestris* f. *litwinowii* auga ten, kur gruntinio vandens gylis ne aukštesnis kaip 25–30 cm. Šios formos pušys išauga iki 3–4 m aukščio su plačia, ne mažesne kaip 2/3 medžio aukščio pločio, laja. *P. sylvestris* f. *uliginosa* artimiausia mineraliniame grunte augančioms pušų formoms. Ji pasiekia 10–12 m, kartais net 15 m aukštį (Abolin, 1915). Dendrochronologiniams tyrimams vertingiausios yra *P. sylvestris* f. *uliginosa* ir *P. sylvestris* f. *litwinowii* formos, nes labai skurdžių ir užmirkusių augaviečių paprastosios pušies formų stiebo kreivumas daro įtaką metinių rėvių ekscentriškumui ir paslepia klimatinį signalą radialiojo prieaugio dinamikoje. Formos *P. sylvestris* f. *pumila* radialusis prieaugis beveik neturi ryšio su meteorologiniais faktoriais (Läänelaid, 1979).

#### 1.4 Dendrometrų taikymas dendrochronologiniuose tyrimuose

Medžio augimo spartą (radialųjį prieaugį) galima įvertinti ir naudojant specialius prietaisus, tvirtinamus ant medžio kamieno. Vienas iš paprasčiausių įrenginių yra medžio kamieno apjuosimas plienine juosta, jos galus sujungiant spyruokle ir matuojant atstumą tarp dviejų juostoje fiksuotų taškų. Nuolatiniai sezoniniai medžių radialiojo prieaugio tyrimai Lietuvoje atliekami nuo 1976 m. (Vitas, 2011). Medžio kamieno augimas į visas puses yra skirtingas, todėl šio metodo privalumas yra tai, kad matuojamas viso medžio kamieno perimetro pokytis (Schweingruber, 1993). Tačiau kaip pažymi Krameris ir Kozlovskis (Крамер, Козловский, 1983), šis metodas turi vieną esminį trūkumą – sunku nustatyti dėl kokių priežasčių: žievės ar medienos prieaugio, ar audinių prisotinimo vandeniui, kinta stiebo perimetras. Metinės rievės priklauso ne tik nuo klimato kaitos, bet ir nuo edafinių, fitocenologinių ir kitų veiksnių. Radialųjį prieaugį kaip labai sudėtingą biologinį procesą įvardija ir A. Jacenka-Chmelevskis ir L. Lotova (Яценко-Хмелевский, Лотова, 1987). Automatiniais dendrometrais atlikti matavimai yra kur kas tikslesni. Medžių radialiajam prieaugiui tirti taikomas automatinis dendrometrų metodas leidžia nustatyti ir interpretuoti klimatinį rodiklių įtaką medžio fiziologijai ir augimui, įvertinti mikroklimatinių sąlygų poveikį medžio kamieno pokyčiams. Medžių jautrumas meteorologinėms sąlygoms priklauso ne vien nuo biologinių medžių savybių, ar augaviečių hidrologinio režimo, nulemiančio šaknų sistemos sandarą, bet ir nuo laikotarpio, kada formuojasi atskiros metinės rievės dalys (Tamkevičiūtė ir kt., 2014). Nevienareikšmiški ryšiai tarp medžių prieaugio ir įvairių jį

veikiančių aplinkos veiksnių vidutinio klimato sąlygomis skatina ieškoti naujų analizės metodų, kurie suteiktų galimybes patikslinti klimato rekonstrukcijos modelius. Pagrindinis Sheilio (2003) bei Drew ir Downeso (2009) nurodomas automatinį juostinių dendrometrų matavimų trūkumas, ypač aktualus vertinant trumpo laikotarpio kamieno pokyčius, yra juostos atsilaisvinimas, nes jis gali būti fiksuojamas kaip kamieno plėtimasis, nors tuo tarpu kamieno pokyčiai nevyksta.

Atliekant šiame darbe pristatomus autorės tyrimus remtasi tiek standartinėmis rievų pločio chronologijomis, tiek automatinį dendrometrų valandiniais duomenimis. Vieningos metodikos kaip nustatyti lėtai augančių medžių kamieno radialiųjų pokyčių ypatumus kol kas nėra, todėl darbe remtasi keleto autorių (Tardif et al., 2001; Deslauriers et al., 2007; Vieira et al., 2013; Turcotte et al., 2009) išvalgomis analizuojant ir vertinant standartinio augimo medžių automatinį dendrometrų duomenis.

Kamieno augimo rodikliai gali pasitarnauti kaip indikatorius ateinančių metų prieaugio prognozei, o taip pat gali padėti tiriant medžių produktyvumą šiltėjant klimatui.

### 1.5 Hidrometeorologinių sąlygų įtaka medžių augimui

Svarbiausi klimato rodikliai, naudojami dendrochronologiniuose tyrimuose – oro temperatūros bei kritulių kiekio periodų kaita (Stravinskienė, 2002). Temperatūra tiesiogiai veikia medžių augimą vegetacijos periodu ir netiesiogiai per vandens lygio reguliaciją vandeniui garuojant (Mannerkoski, 1985). Optimaliomis sąlygomis klimato veiksnių koreliacija su medžių metinių rievų radialiuoju prieaugiu yra nežymi, tačiau kuo augimo sąlygos blogesnės, tuo jų poveikis medžių metinio radialiojo prieaugio formavimuisi didesnis (Läänelaid, 1994). Po ilgesnio sausros laikotarpio, net ir iškritus mažesniai kritulių kiekiui, medžiai reaguoja teigiamai ir greitai (per 1 parą). Vyraujant nepalankioms sąlygoms, pavyzdžiui, esant aukštam gruntiniam vandens lygiui (GWT) aukštapelkėse, medžiai formuoja siauresnes metines rieves. Ši medžių savybė padeda dendrochronologinei praeities klimato rekonstrukcijai, įgalina patikimai atstatyti praeityje vykusius aplinkos pokyčius (Eronen et al., 1986).

Pagal ribojančių veiksnių teoriją, medžio prieaugį lemia tas veiksnys, kuris yra intensyviausias (Pukienė, 1997). Tačiau daugelyje arealo vietų, artimų ekologiniam optimumui, ribojantis veiksnys nėra pastovus bėgant laikui, t. y. jis keičiasi tiek sezono metu, tiek skirtingais augimo sezonais. Tik retais atvejais, dažniausiai rūšies arealo pakraščiuose, galima išskirti

daugmaž pastovų vieną ribojantį veiksnį, pvz. drėgmės trūkumas sausringuose JAV pietvakariuose, vasaros temperatūra prie šiaurinės ar aukštutinės (kalnuose) miško ribos. Todėl dendroklimatologiniai tyrimai Europoje daugiausiai nukreipti į šiaurinius ar aukštuminius arealo pakraščius (Pukienė, 1997). Dendroklimatologiniai tyrimai Europoje daugiausiai atlikti Alpėse, Tatuose, šiaurės Švedijoje. Šiaurinėse ir aukštuminėse miško arealo ribose nustatomi stipriausi ryšiai tarp klimato veiksnių ir radialiojo prieaugio (Bednarz, 1984; Eckstein, 1986). Čia augančių spygliuočių rėvių serijos lengvai sinchronizuojasi tarpusavyje, tuo tarpu pietų Europoje sinchronizacija yra ženkliai sudėtingesnė. Pietų Europoje net ir subalpinėse vietovėse prieaugį formuoja ilgos vasaros sausros (Richter, 1988; Schweingruber, 1985). Patikimi ryšiai tarp radialiojo medžių prieaugio ir oro temperatūros svyravimų aptinkami tik pietų Europos aukštikalnėse (Kienast, 1985; Richter et al., 1991).

Lietuvos pušnyuose nustatyti gana nestiprūs (koreliacijos koeficientas tik retais atvejais didesnis už 0,4) koreliaciniai ryšiai tarp metinio prieaugio ir meteorologinių rodiklių (Карпавичюс, 1984). Dendroklimatologiniais paprastosios pušies tyrimais nustatyta, kad Lietuvoje pušų prieaugis neigiamai reaguoja į šaltas žiemas ir vasaros sausras (Vitas, Erlickytė, 2008). Paprastoji pušis dideliu jautrumu žiemos ir pavasario temperatūroms pasižymi ir Lenkijos teritorijoje, kur metinės rievės susiaurėja po šaltos žiemos, nors ir palankiu vegetacijos periodu, o švelni žiema ir pavasaris be šalnų padaro teigiamą įtaką pušų metiniam radialiajam prieaugiui (Cedro, 2001). 2013 metais atlikti pušų tyrimai Abakano regione parodė, jog didžiausią patikimą neigiamą įtaką metinių pušų prieaugiui daro tų pačių metų liepos ir rugpjūčio mėnesio temperatūra (Shah et al., 2015). Estijos aukštapelkėje atlikti tyrimai rodo neigiamą vasario mėnesio temperatūros įtaką aukštapelkių pušų augimui (Smiljanić et al., 2014). Skandinavijoje atlikti paprastosios pušies dendrochronologiniai tyrimai fiksuoja medžių teigiamus radialiojo prieaugio atsakus į praėjusio sezono rudens bei ankstyvos žiemos temperatūras (Linderholm et al., 2003). Tirtose teritorijose atmosferos kritulių įtaka santykinai yra ne tokia žymi kaip oro temperatūros (Cedro, 2001). Tačiau paprastosios pušies tyrimai atlikti Ispanijoje parodė, kad krituliai vegetacijos periodu buvo lemiamas veiksnys, turėjęs įtakos radialiojo prieaugio didėjimui (Bogino et al., 2009). Sausose vietose Šveicarijoje tarp paprastosios pušies prieaugio ir kritulių gautos teigiamos koreliacijos, o koreliacijos su oro temperatūra – neigiamos. Teigiamai koreliuoja balandžio, gegužės, spalio bei buvusios žiemos (gruodžio, sausio ir kovo) krituliai, o neigiamos koreliacijos su temperatūra užfiksuotos

birželio, rugpjūčio bei spalio mėnesiais (Rigling et al., 2001). Žiemos pabaigos krituliai ir augimo sezono pradžios krituliai teigiamai koreliuoja su paprastosios pušies prieaugiu daugelyje Europos vietų, pvz. Šveicarijos Alpėse, Prancūzijos Alpėse. Tai pastebima net ir Sibiro miškuose (Rigling et al., 2001). Stipri gegužės mėnesio kritulių įtaka užfiksuota Abakano regione atliktuose tyrimuose. Čia didžiausia patikima kritulių įtaka prieaugiui pasireiškia gegužės ir birželio mėnesiais (Shah et al., 2015). Pietinėje Švedijoje atlikti dendroklimatologiniai paprastosios eglės tyrimai parodė, kad reikšmingiausias klimato veiksnys, lemiantis prieaugį – birželio krituliai. Estijos aukštapelkėje atlikti tyrimai rodo neigiamą vasario mėnesio kritulių įtaką aukštapelkių pušų augimui (Smiljanić et al., 2014).

Dendroklimatologiniais tyrimais nustatyta, kad metinių rivių formavimuisi Lietuvos sąlygomis didžiausią reikšmę turi temperatūra, vyraujanti prieš vegetacinį laikotarpį (Edvardsson et al., 2015b), bei vegetacijos periodo (balandžio–rugsėjo mėnesiai) temperatūra ir vasaros mėnesių krituliai (Stravinskienė, 2003). Metinių rivių formavimuisi didesnės neigiamos įtakos turi gegužės ir birželio mėnesių sausros, o rugpjūčio mėnesio sausros ne tokios reikšmingos. Didžiausios įtakos medžių augimui turi keletą mėnesių besitęsiančios sausros, kurios stipriai paveikia pušis augančias tiek organiniame, tiek mineraliniame grunte (Stravinskienė, 2003).

Metinių rivių potencialas hidrologinių sąlygų rekonstrukcijai yra menkai išnaudotas (Eckstein et al., 2008, 2009, 2010; Moir et al., 2010; Edvardsson et al., 2012, 2016). Atliktos tik kelios Baltijos jūros regiono šalių studijos, kuriose tiriamos pelkėse augančios pušys. 2015 metais Edvardssonas ir kiti savo studijoje nustatė neigiamą drėgmės poveikį pelkėse augančių pušų prieaugiui (Edvardsson et al., 2015b). Aukštas gruntinio vandens lygis (GWT) sukuria nepalankias sąlygas augimui dėl įvairių fizinių, cheminių ir biologinių faktorių, iš kurių ko gero svarbiausias yra sumažėjęs prieinamų maisto medžiagų kiekis užlietoje zonoje. Kaip ir meteorologinių rodiklių, taip ir GWT koreliacija su metiniu rivių pločiu esant optimalioms augimo sąlygoms yra nežymi, tačiau kuo augimo sąlygos blogesnės, tuo jų poveikis medžių prieaugiui didesnis (Läanelaid, 1994; Fritts, 1976). Jeigu GWT yra per aukštas, trūksta deguonies, medžiai kenčia nuo hipoksijos arba anoksijos. Kai GWT yra per žemas, medžiai patiria sausros stresą (Braekke, 1983; Dang, Lieffers, 1989; Pepin et al., 2002). Išsamiai gruntinio vandens lygio rekonstrukcija analizuota 2014 metų Marko Smiljanićo ir kitų straipsnyje (Smiljanić et al., 2014). Šiame straipsnyje buvo nustatyti ryšiai tarp metinio medžių prieaugio ir GWT, tačiau sąlyginė riba iki kiek gali sumažėti GWT,



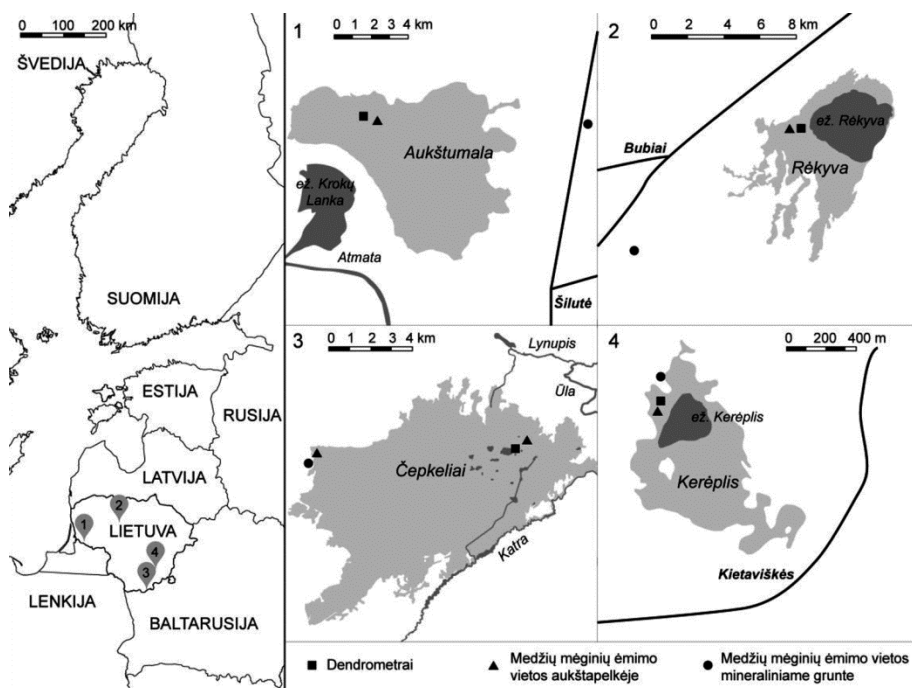
kol medis nepatiria sausras streso, nebuvo nustatyta. Manoma, kad GWT atstatymas pagal metines rieves gali būti patikimas tik tol, kol GWT nenukrenta žemiau medžių patiriamos sausras streso ribos (Smiljanić et al., 2014).

Remiantis anksčiau išdėstyta medžiaga, rekonstruojant klimato sąlygas ir įvairiais laikotarpiais naudojant radialiojo prieaugio duomenis, patikimai galima rekonstruoti tik buvusias ekstremalias sąlygas. Kitaip tariant, buvusias šaltas žiemas ir sausus, vėsius ar normalaus drėgnumo, bet labai karštus periodus. Dažniausiai literatūroje nurodoma, kad tyrimuose metinių rėvių pločio ir klimatinių veiksnių ryšiams nustatyti turėtų būti nagrinėjama tų pačių metų vegetacijos periodo temperatūra, trejų praėjusių metų žiemos temperatūra, tų pačių metų pavasario šalnos bei vasaros krituliai. Visgi analizuojant metines rieves daugelyje aukščiau aptartų straipsnių tiriama klimato sąlygos priklauso vasaros laikotarpiui. Nepaisant to, kitų laikotarpių klimatinės sąlygos, ypač žiemos krituliai, taip pat gali daryti įtaką metinės rievės formavimuisi ateinančiais metais (Vaganov et al., 1999). Medžio jautrumas klimato veiksniams priklauso ir nuo laikotarpio, kada formuojasi atskiros metinės rievės dalys. Medžio vėlyvoji mediena reaguoja jautriau nei ankstyvoji. Tai suprantama, nes ankstyvojo prieaugio formavimuisi didesnę įtaką turi ankstesnės (rudens, žiemos ir ankstyvojo pavasario) negu vėlyvesnės hidrologinių metų klimato sąlygos (Кайрайтис, 1978; Karpavičius et al., 1996). Paprastai didesnės drėgmės atsargos ilgesnį laiką dirvožemyje išsilaiko po rudeninių lietų ir pavasariinių polaidžių. Vėlyvojo prieaugio formavimasis daugiausiai susijęs su vėlyvojo pavasario ir vasaros klimato sąlygų kaita.

## 2. DARBO METODIKA

### 2.1 Tiriamų vietų parinkimas

Įvertinus ankstesnių tyrimų duomenis, atsižvelgiant į tiriamų vietų imties reprezentatyvumą, antropogeninio pažeidimo intensyvumą ir tolygų tiriamų vietų pasiskirstymą Lietuvoje, šiame darbe pristatomiems tyrimams buvo pasirinktos keturios aukštapelkės (2 pav.). Tiriamos vietos pasirinktos ir pagal turimus meteorologinius (Rėkyvos durpyno automatinė meteorologinė stotis) ir hidrologinius duomenis – vietas, kuriose anksčiau buvo vykdyti hidrometeorologiniai matavimai.



**2 pav.** Tyrimų vietos Aukštumalos (1), Rėkyvos (2), Čepkelių (3) ir Kerėplio (4) šlapynių kompleksuose

Siekiant nustatyti hidrometeorologinių rodiklių ir medžių augimo ryšius, atliktas hidrologinis-dendrochronologinis monitoringas. 2013 m. rugsėjo–spalio mėnesiais natūraliose aukštapelkių dalyse augančiose pušyse įdiegti 6 automatiniai didelės raiškos juostiniai dendrometrai (DRL 26). Tuo pat metu greta šių medžių įrengti gręžiniai su automatiniais gruntinio vandens lygio (GWT) matuokliais.

Rėkyvos šlapynių kompleksas, kuriame aukštapelkė užima apie 21 % bendro ploto, yra Šiaulių rajono savivaldybėje, 140 km į rytus nuo Baltijos jūros, 131–134 m virš jūros lygio (2 pav.). Durpėdaros procesai čia vyksta pereinamojo iš jūrinio į kontinentinį klimato sąlygomis. Rėkyvos šlapynių komplekso plotas – 3 787 ha. Jis susiformavo Dubysos, Ventos, Nevėžio ir Mūšos baseinų vandenskyroje. Vieta tyrimams pasirinkta Aukštelkės aukštapelkėje, kuri išliko natūrali iki šių dienų. Vidutinis durpės storis čia 4,8 m, didžiausias durpės storis – 9,6 m (Lietuvos durpynų kadastras, 1995).

Kerėplio šlapynių kompleksas yra Onuškio sen., Trakų rajono savivaldybėje (2 pav.). Durpėdaros procesai čia vyksta kontinentinio klimato sąlygomis. Jis yra Merkio-Verknės vandenskyroje, 250 km į rytus nuo Baltijos jūros, apie 142,5 m virš jūros lygio. Aukštapelkinė šlapynės dalis nebuvo naudojama žemės ūkio reikmėms, buvo apaugusi pavieniais medžiais ir mišku. Pietinė pelkės dalis 1986–1992 metais buvo eksploatuojama, todėl tyrimų vieta pasirinkta šiaurės vakarinėje dalyje – beveik natūralioje aukštapelkėje. Šlapynių komplekso plotas – 144 ha, jame 79 % užima aukštapelkė, 7 % – mišri pelkė, 4 % – žemapelkė, 10 % – Kerėplio ežeras. Vidutinis durpės storis – 1,8 m, didžiausias storis – 5,4 m (Lietuvos durpynų kadastras, 1995).

Aukštumalos šlapynių kompleksas yra vakarų Lietuvoje, Šilutės rajono savivaldybėje, Nemuno deltos regioniniame parke, apie 15 km į rytus nuo Baltijos jūros, 5,5 m virš jūros lygio (2 pav.). Durpėdaros procesai čia vyksta jūrinio klimato sąlygomis. Aukštumalos pelkė yra stipriai paveikta durpių kasybos ir su ja susijusių sausinimo darbų. Aukštapelkės vakarinė dalis daugiausiai išliko nepakitusi, todėl čia buvo pasirinkta tyrimų vieta. Aukštumalos plotas – 3 018 ha, 98 % jos ploto užima aukštapelkė, 1 % – tarpinio tipo pelkė ir 1 % – žemapelkė. Vidutinis durpės storis – 2,74 m, didžiausias storis – 6,2 m (Lietuvos durpynų kadastras, 1995).

Čepkelių šlapynių kompleksas yra pietinėje šalies dalyje, šalia Lietuvos-Baltarusijos sienos. Apie 270 km į pietryčius nuo Baltijos jūros, apie 130 m virš jūros lygio (2 pav.). Durpėdaros procesai čia vyksta kontinentinio klimato sąlygomis. Čepkeliai yra Katros, Ūlos ir Grūdosių upių vandenskyroje. Pelkės plotas – 5 858 ha. Lietuvos durpynų kadastru nurodyta, jog šlapynių komplekse 82 % užima aukštapelkė, 16 % – žemapelkė, apie 2 % užima tarpinės pelkės. Vidutinis durpės storis – 2,34 m, didžiausias – 6,5 m (Lietuvos durpynų kadastras, 1995). Čepkelių pelkės ir apypelkio melioracija beveik nepalietė. Tačiau paskutiniaisiais XX a. dešimtmečiais nustatytas spartus Čepkelių aukštapelkės užaugimas medžiais (Taminskas et al., 2007).

## 2.2 Dendrochronologinis monitoringas *in situ*

Prieaugio jutiklis Increment Sensor DRL 26 yra automatinis juostinis dendrometras skirtas ilgos trukmės monitoringui – kamieno prieaugio ir oro temperatūros matavimui bei duomenų kaupimui (3 pav.). Prietaisu fiksuojami ir įrašomi kamieno apimties pokyčiai ir oro temperatūra, atliekama iki 50 000 įrašų. Dendrometro matavimų paklaida yra 0,001 mm, matavimų intervalas – nuo 10 minučių iki 24 valandų. Temperatūros jutiklio tikslumas  $\pm 2$  °C, matavimų intervalas – nuo -30 iki 60 °C.



**3 pav.** Prieaugio jutiklis DRL 26, Aukštumalos aukštapelkė

Tyrimams natūraliose aukštapelkių dalyse (durpių storis vidutiniškai 4 – 6 m), 57–126 metų amžiaus pušyse, buvo įdiegti 6 automatiniai dendrometrai (1 lentelė). Po du dendrometrus buvo įdiegta *P. sylvestris* f. *litwinowii* ekologinės formos pušyse Rėkyvos ir Aukštumalos aukštapelkėse, po vieną – *P. sylvestris* f. *uliginosa* ekologinės formos pušyse Kerėplio ir Čepkelių aukštapelkėse. Pušų ekologinė forma nustatyta atsižvelgus į pušų aukštį, lajų formą, augavietės augalų rūšis. Visi dendrometrai įdiegti 2013 m. rugsėjo–spalio mėnesiais. Matavimai vyko iki 2016 m. sausio mėnesio. Kamieno apimties pasikeitimai ir oro temperatūra matuota kas valandą. Pasirenkant medžius dendrometrų įdiegimui buvo parinktos pušys su vizualiai panašia lajos defoliacija bei spyglių dechromacija. Taip pat buvo atsižvelgta į kamieno kreivumą, kuris gali daryti įtaką metinių rėvių ekscentriškumui ir paslėpti klimatinį signalą kamieno apimties kitimo dinamikoje.

*1 lentelė. Prieaugio jutiklių (DRL 26) įdiegimo duomenys*

<b>Aukštapelkė</b>	<b>Įdiegimo data</b>	<b>Medžio amžius</b>	<b>Kamieno apimtis 100 cm aukštyje nuo durpės paviršiaus, cm</b>	<b>Koordinatės (WGS)</b>
Kerėplis	2013 10 03	57	73	54° 27' 45,3"; 24° 33' 3,52"
Čepkeliai	2014 04 16	71	75	54° 1' 15,6"; 24° 34' 15,08"
Aukštumala	2013 09 18	117	52	55° 23' 45,26"; 21° 21' 35,61"
Aukštumala	2013 10 05	126	55	55° 23' 45,26"; 21° 21' 35,61"
Rėkyva	2013 09 19	112	61	55° 51' 54,52"; 23° 15' 12,85"
Rėkyva	2013 10 12	90	63	55° 51' 54,52"; 23° 15' 12,85"

Vieningos metodikos lėtai augančių medžių kamieno radialiesiems pokyčiams įvertinti kol kas nėra, todėl darbe remtasi keleto autorių išvalgomis analizuojant ir vertinant automatinių dendrometrų duomenis. Pirmiausia duomenys buvo peržiūrėti, pašalinami netipiški matavimai, kuriuos galėjo lemti vorai, voverės, paukščiai, dendrometrų gedimai, juostos pasislinkimai ir kt. (Tardif et al., 2001). L. R. Auchmoody 1976 metais savo darbe pažymėjo, kad tiriant lėtai augančius medžius reikalinga labai atidi duomenų patikra. Pašalinti netipiniai matavimai atsiradę dėl dendrometrų juostų pasislinkimų gali lemti neigiamo augimo rezultatą. Tais atvejais kai tyrimų vietoje buvo keli dendrometrai, siekiant nustatyti netipinius matavimus kamienų apimties pokyčių duomenys buvo sulyginti tarpusavyje. Kai skirtumas tarp skirtingų dendrometrų tų pačių valandos duomenų reikšmių buvo didesnis arba mažesnis nei 0,2 mm, duomenys pašalinti iš skaičiavimų. Kadangi dendrometrai matuoja kamieno apimties pasikeitimus ir oro temperatūrą, toje pačioje tyrimų vietoje esant dviem dendrometrams, oro temperatūros duomenys taip pat buvo sulyginami tarpusavyje. Kai skirtumas tarp skirtingų dendrometrų tų pačių oro temperatūros valandos reikšmių buvo didesnis nei 3 °C arba mažesnis nei –3 °C, duomenys pašalinti iš skaičiavimų. Kiekvieno dendrometro duomenys taip pat buvo lyginami su arčiausiai tyrimo vietos esančių meteorologinių stočių temperatūrų duomenimis. Esant vidutinės paros temperatūros didesniai nei

5 °C neatitikimui, dendrometro rodmenys buvo pašalinami. Eliminuoiant netipiškus matavimų rezultatus, remtasi Tardifo ir kt. (2001), Deslaurierso ir kt. (2007), Vieiros ir kt. (2013) atliktais tyrimais. Rėkyvoje pašalinta 810 (~4 %) valandinių duomenų eilučių, Aukštumaloje – 911 (~5 %), Kerėplyje – 763 (~4 %), Čepkeliuose – 123 (~1 %).

DRL 26 dendrometrais kas valandą buvo matuojama kamieno apimtis. Norint sužinoti kiek konkrečiai tam tikrą valandą pasikeitė kamieno apimtis, iš kiekvienos valandos pirminių kamieno apimtys duomenų buvo atimti prieš tai buvusios valandos pirminiai kamieno apimtys duomenys. Šis nuoseklus skirtumo tarp dviejų duomenų apskaičiavimas, kaip vienas iš būdų, minimas Deslaurierso ir kt. (2007) straipsnyje. Toliau darbe pateikiami dendrometrų kamieno apimtys duomenys, padalinant kamieno perimetrą iš  $2\pi$ , perskaičiuoti į radialiuosius kamieno pokyčių (RSCH) duomenis (Tardif et al., 2001; Vieira et al., 2013; Deslauriers et al., 2007). Valandiniai RSCH buvo apskaičiuoti pagal šią, darbo autorės sudarytą, formulę:

$$RSCH = \frac{P_n - P_{n-1}}{2\pi}; \quad (1)$$

$P_n$  – tam tikros valandos kamieno apimtis.

Skaičiuojant paros kamieno pasikeitimą (angl. *daily approach*), skaičiuojamas 24 valandų RSCH vidurkis (nuo 00.00 iki 23.00) (Tardif et al., 2001; Deslauriers et al., 2007; Vieira et al., 2013).

Suminiai radialieji kamienų pasikeitimai metų intervale apskaičiuoti iš kiekvieno pirminio valandinio dendrometro rodmenis atimant pirmosios metų paros pirmąjį pirminį dendrometro rodmenį (pvz., 2014 metais tai būtų 2014-01-01 00.00 val. rodmuo). Jeigu dendrometro matavimai pradėti ne nuo metų pradžios, tuomet iš pirminių valandinių rodmenų atimamas pirmosios matavimų paros pirmasis pirminis dendrometro rodmuo. Suminiai RSCH metų intervale buvo apskaičiuoti pagal šią, darbo autorės sudarytą, formulę:

$$\sum RSCH_n = \frac{P_n - P_{prad}}{2\pi}; \quad (2)$$

$P_{prad}$  – pirmos metų paros pirmasis valandinis kamieno apimtys rodmuo.

Kamieno paros ciklui (angl. *daily cycle* (DC)) įvertinti buvo apskaičiuoti tam tikrų periodų vidutiniai kiekvienos paros tos pačios valandos kamieno apimties arba radialieji pokyčiai (Tardif et al., 2001; Deslauriers et al., 2007; Vieira et al., 2013). Kamieno paros ciklą grafikuose pateikti suminiai vidutiniai medžio kamieno valandiniai kitimai tam tikru paros laikotarpiu, apskaičiuoti pagal šią, darbo autorės sudarytą, formulę:

$$RSCH_{t,n}^{DC} = \overline{RSCH_{t,n}} + \overline{RSCH_{t,(n-1)}}; \quad (3)$$

$RSCH_{t,n}$  – radialusis kamieno pokytis tam tikru periodu (t) tam tikrą valandą (n).

Radialijų kamieno pokyčių paros ciklai apskaičiuoti šešioms periodams: rudens pabaigos–žiemos–pavasario pradžios ramybės periodas (periodas 1), pavasario pabaigos–vasaros pradžios augimo periodas (periodas 2), vasaros kamieno susitraukimo periodas (periodas 3), vasaros pabaigos–rudens pradžios kamieno plėtimosi periodas (periodas 4) ir atskirai vegetacijos periodas (2, 3, 4 periodų laikotarpis) bei ramybės būsenos pradžios periodas (1 periodo pradžia).

Siekiant nustatyti aukščiau pateiktų periodų trukmes buvo apskaičiuoti suminiai radialieji kamienų pokyčiai metų intervale. Remiantis kitų autorių atliktais tyrimais (Turcotte et al., 2009), sudarytuose duomenų sekų grafikuose išskirti suminių RSCH pakitimo laikotarpiai, priklausantys nuo kamieno plėtimosi, susitraukimo ar ramybės būsenos. Nustatytai laikotarpių trukmei įvertinti naudota *Regime detection3.2* programa, kuri, priklausomai nuo įvesties duomenų (pasirinkto trumpiausio intervalo ilgio (angl. *Cut-off Length*) bei reikšmingumo lygmens), parodė, kad nustatytų laikotarpių ribos gali kisti 5 dienų intervale. Aukštumaloje aiškus priešrudeninio kamieno apimties susitraukimas nenustatytas.

Analizuojant ramybės būsenos pradžios periodą dėl ypač mažų kamieno apimčių pokyčių (~0 mm) duomenys neperskaičiuoti į radialiuosius kamieno pokyčius. Tiriant šį periodą analizuojami valandiniai kamieno apimties kitimo duomenys. Darbe pateikti 2013 metų rugsėjo–lapkričio mėnesių Rėkyvos, Aukštumalos ir Kerėplio aukštapelkėse augančių pušų kamienų apimties pokyčių duomenys. Siekiant patvirtinti gautus rezultatus, taip pat buvo patikrinti 2015 m. bei 2016 m. aukštapelkėse įdiegtų dendrometrų duomenys.

Vegetacijos periodo pradžia nustatoma nuo tos dienos kada kamieno suminis paros radialusis pokytis pastoviai didėja (Deslauriers et al., 2007). 2014 ir 2015 metų duomenimis vegetacijos laikotarpis visose aukštapelkėse prasidėjo pirmą gegužės mėnesio dekadą.

Vertinant parinių RSCH atskirais periodais priklausomybę nuo kintančio gruntinio vandens lygio, vidutinės paros oro temperatūros bei kritulių kiekio, buvo taikyta statistinė lyginamoji analizė. Duomenys buvo palyginti naudojant Stjudento *t*, dispersinės analizės (ANOVA) statistinius kriterijus ir tiesinės regresijos metodą, grupuojant RSCH į aukštos ( $\geq 15$  °C) bei žemos (nuo  $\geq 7$  °C iki 15 °C) temperatūros, skirtingo kritulių kiekio (0 mm ir  $>0$  iki 5 mm), aukšto (iki  $-0,2$  m), vidutinio (nuo  $-0,2$  iki  $-0,3$  m) ir žemo (žemiau  $-0,3$  m) gruntinio vandens gylio nuo durpės paviršiaus grupes.

## 2.3 Hidrometeorologinis monitoringas

### 2.3.1 Lietuvos hidrometeorologijos tarnybos duomenų panaudojimas darbe

Mėnesiniai duomenys apie oro temperatūrą ir kritulius 1929–2014 metais sukaupti Lietuvos hidrometeorologijos tarnybos (LHMT) duomenų bazėse. Arčiausiai tiriamųjų vietų yra LHMT Varėnos, Šiaulių, Šilutės ir Vilniaus (Trakų Vokės) meteorologijos stotys. Šalia Čepkelių yra Marcinkonių automatinė meteorologinė stotis, o Rėkyvos durpyne yra Rėkyvos automatinė meteorologinė stotis.

Be temperatūros ir kritulių kiekio darbe naudota potenciali evapotranspiracija (PET). Kritulių ir PET skirtumas ( $D_i$ ) beveik atitinka efektyviusius kritulius, kurie lemia vandens atsargas ir nuotėkį iš aukštapelkių. Siekiant pratęsti gruntinio vandens lygio matavimų seriją Čepkelių aukštapelkėje potenciali evapotranspiracija buvo apskaičiuota pagal Thornthwaite'o lygtį (Thornthwaite, 1948):

$$PET_i = 16 \left( \frac{10 T_i}{I} \right)^a ; \quad (4)$$

$T_i$  – vidutinė mėnesio temperatūra,

$I$  – šilumos indeksas pasirinktai teritorijai,

$a$  –  $I$  funkcijos eksponentė:

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left( \frac{T_i}{5} \right)^{1,514} \quad (5)$$



$$a = 0,000000675I^3 - 0,000077I^2 + 0,0179I + 0,49 \quad (6)$$

Skirtumas (D) tarp kritulių (P) ir potencialios evapotranspiracijos (PET) parodo vandens perteklių arba deficitą per analizuojamą mėnesį ir yra apskaičiuojamas pagal formulę (Vicente-Serrano et al., 2010):

$$D_i = P_i - PET_i \quad (7)$$

Remiantis P-PET instrumentiniai gruntinio vandens lygio matavimų duomenys Čepkelių aukštapelkėje pratęsti. Ryšiai tarp P-PET ir instrumentinių gruntinio vandens lygio matavimų serijų nustatyti atlikus regresinę analizę. Darbe analizuota kelerių metų P-PET suma geriausiai koreliuoja su instrumentiniais vandens lygio matavimais skirtinguose Čepkelių aukštapelkės grėžiniuose. Modeliuojamo gruntinio vandens lygio (MGWT) tiesinė priklausomybė išreikšta lygtimi ir pagal šią lygtį pratęsta gruntinio vandens lygio matavimų serija 1935–2002 metų laikotarpiui.

### 2.3.2 Hidrometeorologinis monitoringas Čepkelių ir Rėkyvos šlapynių kompleksuose

Pirmieji ilgalaikiai pelkių gruntinio vandens lygio matavimai Lietuvoje pradėti Čepkelių raiste. Čia pelkės GWT monitoringas vykdomas nuo XX a. paskutiniojo dešimtmečio, o nepertraukiami vandens lygio matavimai pradėti 2002 metais. GWT Čepkeliuose 2002-2014 m. buvo matuojamas rankiniu būdu kartą per 10 dienų, balandžio–spalio mėnesiais. Matavimų tikslumas – 0,01 m. Rekonstruojant ilgalaikius GWT, darbe remtasi 2002–2014 m. duomenimis.

Gruntinio vandens lygis grėžiniuose buvo matuotas pagal absoliutinį aukštį. Vandens lygio perskaičiavimui į gruntinio vandens gylį, nuliniu aukščiu laikomas pelkės paviršius šalia grėžinio. 2009 metais grėžinio 4-A nulinis aukštis buvo 133,1 BS. Paviršius nustatomas suspaudus akrotelmo augaliją.

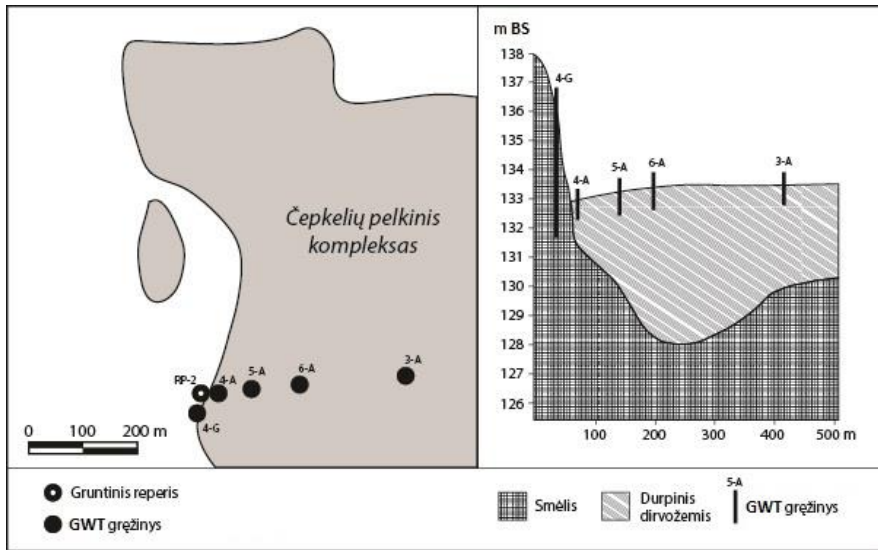
Darbe naudoti penkių Čepkelių pelkės grėžinių matavimo rezultatai (2 lentelė). Analizuotą Čepkelių pelkės GWT matavimų profilį sudaro 4-G, 4-A, 5-A, 6-A, 3-A grėžiniai. Prie profilio yra kontrolinis gruntinis reperis RP-2. Šio reperių altitudė yra 135,67 m, koordinatės: 54° 1' 1,47" N; 24° 25' 53,7" E. Grėžinys 4-G yra apypelkio kopoje, arti kopos papėdės. 4-A grėžinys įrengtas pelkės lage, kiti grėžiniai (5-A, 6-A, 3-A) įrengti

aukštapelkės šlaite. Grėžinys 5-A yra raiste, grėžinys 6-A yra plynraistyje, grėžinys 3-A yra plynėje (4 pav.).

**2 lentelė. Čepkelių pelkės hidrologinio monitoringo grėžinių rodikliai**

Grėžinio koordinatės ir altitudė	Atstumas nuo pelkės pakraščio (m)	Horizontas	Durpių klogo storis (m)	Grėžinio gylis nuo grunto paviršiaus (m)	Grėžinio medžiaga ir filtro konstrukcija
<b>4-G</b> 54° 01' 00" N, 24° 25' 53" E 136,21 m BS	–	Smėlis	–	4,50	PVC Valo tinklelis 4,0 – 4,5 m nuo mineralinio grunto paviršiaus
<b>4-A</b> 54° 01' 01" N, 24° 25' 55" E 133,29 m BS	10,00	Durpė	1,50	0,72	PVC Ištisai perforuotas vamzdis
<b>5-A</b> 54° 01' 01" N, 24° 25' 56" E 133,60 m BS	75,00	Durpė	3,20	1,00	PVC Ištisai perforuotas vamzdis
<b>6-A</b> 54° 01' 01" N, 24° 26' 03" E 133,69 m BS	150,00	Durpė	5,10	0,92	PVC Ištisai perforuotas vamzdis
<b>3-A</b> 54° 01' 01" N, 24° 26' 14" E 133,50 m BS	340,00	Durpė	3,50	0,80	PVC Ištisai perforuotas vamzdis

Trumpalaikiams tyrimams (matavimų dendrometrais laikotarpiu), nustatant kamieno apimties pokyčių priklausomybę nuo meteorologinių veiksnių, naudoti arčiausiai tyrimų vietų esančių meteorologinių stočių duomenys. 3.1.3. skyriuje nustatant RSCH priklausomybę nuo klimatinės veiksnių, buvo įvertintas meteorologinių stočių atstumas nuo tyrimų vietų. Arčiausiai tiriamųjų vietų yra Čepkelių ir Rėkyvos meteorologinės stotys. Šiame skyriuje detalesnei analizei pasirinktos Rėkyvos aukštapelkės pušys, kadangi šioje aukštapelkėje automatinė meteorologinė stotis įrengta arčiausiai tiriamųjų pušų, o tyrimų laikotarpis ilgesnis nei Čepkelių aukštapelkėje. Be to čia tiriamuoju laikotarpiu veikė du dendrometrai.



**4 pav.** Gruntinio vandens matavimų profilis ŠV Čepkelių raisto dalyje: GWT matavimų gręžiniai pelkėje (3-A, 4-A, 5-A, 6-A), GWT matavimų gręžinys – mineraliniame grunte – kontinentinėje kopoje (4-G), kontrolinis reperis (RP-2)

Siekiant patikrinti pelkės GWT rekonstrukcijų kokybę, buvo panaudoti Nemuno upės nuotėkio duomenys ilgą matavimų seką turinčioje Smalininkų vandens matavimų stotyje (nuo 1812 metų).

### 2.3.3 Hidrologinis monitoringas parinktose aukštapelkėse

Parinkus vietas tyrimams ir įrengus matavimo aikšteles, jose buvo įrengti gręžiniai, į kuriuos įdiegti automatiniai GWT ir vandens temperatūros matuokliai. Matuokliai įrengti Rėkyvos, Aukštumalos, Kerėplio ir Čepkelių šlapynių kompleksuose šalia pušų, kuriose įdiegti dendrometrai. Kartu su jais buvo įdiegti ir atmosferinio slėgio matuokliai. Įdiegta įranga kas valandą buvo matuojamas gruntinio vandens lygis, oro ir vandens temperatūra bei atmosferos slėgis. Nors GWT matuokliai įdiegti visose aukštapelkėse, tačiau Čepkelių aukštapelkės GWT duomenys, dėl prietaiso gedimo, nefiksuoti.

Matavimams naudoti SOLINST gamybos automatiniai GWT matuokliai „Levellogger Gold“. GWT kompensavimui naudoti automatiniai atmosferos slėgio kompensatoriai „Barologger Gold“, kurių tikslumas  $\pm 0,05\%$ . Vandens temperatūros matavimo tikslumas:  $\pm 0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$ , matavimo ribos nuo  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  iki  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Maksimalus įrašų skaičius: 40 000.

**3 lentelė. Aukštapelkių hidrologinio monitoringo gręžinių rodikliai**

<b>Gręžinio koordinatės</b>	<b>Horizontas</b>	<b>Gręžinio medžiaga ir filtro konstrukcija</b>
<b>Kerėplis</b> 54° 27' 45,8" N, 24° 33' 1,54" E	Durpė	PVC Ištisai perforuotas vamzdis
<b>Rėkyva</b> 55° 51' 54,52" N, 23° 15' 12,87" E	Durpė	PVC Ištisai perforuotas vamzdis
<b>Aukštumala</b> 55° 23' 45,26" N, 21° 21' 35,63" E	Durpė	PVC Ištisai perforuotas vamzdis
<b>Čepkeliai</b> 54° 1' 15,6" N, 24° 34' 15,08 E	Durpė	PVC Ištisai perforuotas vamzdis

**2.4 Medžių mėginių ėmimas ir datavimas**

Medžių rėvių dendrochronologinio datavimo mėginiai rinkti Aukštumaloje, Čepkeliuose, Kerėplyje ir Rėkyvoje. Mėginiai surinkti, paruošti matavimams bei sudarytos jų chronologijos bendradarbiaujant su partneriais iš Šveicarijos ir Švedijos. Lauko tyrimų metu, 2013 metais gegužės ir rugsėjo mėnesiais, bei 2014 metais balandžio, rugsėjo, spalio mėnesiais paimti 344 pušų mėginiai. Kiekvienoje vietovėje sudarytos dvi medžių rėvių chronologinės sekos – viena iš medžių, kurie auga aukštapelkėse, kita – iš medžių augančių ant mineralinio grunto šalia aukštapelkės. Išsamesnė informacija apie medžių mėginių ėmimą ir chronologijų sudarymą pateikta Edvardsono ir kt. (2015a, b) straipsniuose. Kerėplio aukštapelkėje paimti 63, Rėkyvos – 52, Aukštumalos – 56 augančių pušų mėginiai. Atitinkamai, 22, 20 ir 15 mėginių paimta iš greta šių aukštapelkių mineraliniame grunte augančių pušų. Čepkeliuose sudarytos trys medžių rėvių chronologinės sekos – dvi aukštapelkėje ir viena mineraliniame grunte. Išsamesnė informaciją apie medžių mėginių ėmimą ir chronologijų sudarymą pateikta Tamkevičiūtės ir kt. (2018) straipsnyje. Aukštapelkėje paimti 96 medžių mėginiai: rytiniame aukštapelkės pakraštyje (greta pažintinio tako) – 49 ir vakarinėje aukštapelkės vandenskyrinėje dalyje (prie Ešerinio ežero) – 47. Mineraliniame grunte buvo paimta 20 paprastosios pušies mėginių (2 pav.).

Mėginiai buvo imami Presslerio prieaugio grąžtu (angl. *Increment Borer*) naudojant standartinę techniką (Fritts, 1976; Cook, Kairiukstis, 1990).

Norint sumažinti metinių rėvių praradimą, dėl lėto aukštapelkių pušų augimo, mėginiai buvo imti apie 40 cm nuo durpės paviršiaus, tuo tarpu mineraliniame grunte augančių pušų mėginiai imti standartiniame, krūtinės, aukštyje. Mėginiai buvo išdžiovinti ir šlifuojami tol, kol medžių metinės rievės ir laštelių struktūra tapo aiškiai matoma (Stoffel, Corona, 2014). Dėl kai kurių mėginių rėvių struktūros problemų, analizei panaudota apie 60 % aukštapelkių pušų mėginių. Lyginant su kitų autorių atliktais pelkėse augančių pušų tyrimais, šiame darbe pateiktame tyrime atmestų mėginių skaičius yra panašus – 40 % (Linderholm et al., 2002; Dauskane et al., 2011; Moir, 2012). Medžio rėvių chronologija buvo sukurta remiantis 0,01 mm tikslumo matavimais, naudojant standartinę dendrochronologinę įrangą (Lintab 5 matavimo stalas ir TSAPWin programinė įranga (Rinn, 2003)) ir bendrą kryžminio datavimo techniką (Fritts, 1976). Čepkelių ir Rėkyvos aukštapelkių mėginiams atskirai išmatuota ankstyvoji ir vėlyvoji rievė (EW, LW). Kryžminis datavimas ir matavimo kokybė, taip pat chronologijų patikimumas buvo įvertintas naudojant TSAPWin ir COFECHA programines įrangas. ARSTAN (Cook, 1985) programa buvo panaudota sukurti tiriamosios vietos chronologiją iš patikimai kryžmiškai datuotų (angl. *crossdated*) serijų. Norint sumažinti neklimateinius pokyčius ir tendencijas, susijusias su medžio amžiaus ir geometrijos įtaka, rėvių chronologijos duomenys buvo standartizuoti ir indeksuoti (Fritts, 1976; Cook, Kairiukstis, 1990). Buvo sudarytos trys chronologijos: Raw, STD, RES. Standartizacijos procesui buvo naudojamos tokios funkcijos kaip „*negative exponential trend*“, „*spline*“, „*variable span smoother*“, aprašytos Cooko ir Peterso (1981, 1997), Friedmano (1984). Standartizacija atlikta ARSTAN\_41d programa (Cook, Krusic, 2006). Chronologijų patikimumas ir dispersija buvo nustatyti naudojant „*expressed population signal*“ (EPS) (Wigley et al., 1984) ir „*running rbar*“ funkcijas (Cook, Kairiukstis, 1990). Patikimumo riba, kai duomenys buvo laikomi patikimais, nustatyta kai  $EPS \geq 0,85$  (Wigley et al., 1984).

## 2.5 Dendrochronologinių duomenų naudojimas hidrometeorologinių sąlygų nustatymui

Ryšių tarp medžių rėvių pločių (RW) ir klimatinių rodiklių nustatymui buvo naudojama DendroClim2002 programa. DendroClim2002 – tai statistinis įrankis skirtas klimato ir medžių augimo santykių analizei. Ši programa koreliacijos ir atsako funkcijų koeficientų reikšmėms įvertinti naudoja saviranką – atsitiktinius intervalus sudaromus iš pateiktų duomenų sekų

(angl. *bootstrap*). Analizei naudojama tiesinė koreliacija, principinių komponentų sukimo (angl. *Jacobian rotations for Eigen values*) principas, atskirų verčių suskaidymas (angl. *singular value decomposition*) ir pagrindinių komponentų analizės regresija (angl. *principle component regression*) (Biondi, Waikul, 2004). Ryšiams tarp vietos chronologijos ir meteorologinių rodiklių nustatyti darbe buvo pasirinkta kintančių intervalų funkcija (angl. *evolutionary and moving intervals*). Norint gauti didžiausią duomenų eilę pasirinktas mažiausias galimas intervalo ilgis – 24 metai. Ryšiai tarp įvairių aukštapelkių pušų metinių rievinių chronologijų (Raw, RES, STD) ir meteorologinių mėnesinių kintamųjų buvo ieškomi išskiriant EW ir LW. Vidutinės mėnesio temperatūros ( $T_{vid}$ ), kritulių kiekio (P) ir skirtumų tarp kritulių ir evapotranspiracijos (P-PET) sumos buvo apskaičiuotos 86 metų periodui, t. y. nuo 1929 iki 2014 metų. Tyrimams naudotos maksimalios ir minimalios mėnesio temperatūros nuo 1947 iki 2014 m. (68 metų periodas, kada Varėnos MS buvo matuojama minimali ir maksimali oro temperatūra). Todėl visos grafikuose pateiktos  $T_{vid}$ , P ir P-PET koreliacijos reikšmės prasideda nuo 1953 metų, o su maksimalia bei minimalia temperatūra susijusios reikšmės – nuo 1971 metų. Savirankos koreliacija gauti rezultatai darbe pateikiami grafiškai. Darbe nepateikiamos visos programa apskaičiuotos reikšmės, kadangi išrinkti tik ilgiausi patikimas koreliacines reikšmes turintys metų intervalai. Labiausiai patikimi koreliacijos rezultatai buvo gauti naudojant RES chronologijas. Todėl disertacijoje pateikti ir aptariami rezultatai daugiausiai grindžiami RES chronologijų analizėmis.

Siekiant nustatyti geriausią GWT aukštapelkėse indikatorių ir atstatyti GWT, buvo ieškoma ryšio tarp metinių GWT ir vienerių–dešimties metų P-PET sumų. Siekiant pratęsti GWT rekonstrukcijas buvo nustatyti ryšiai tarp GWT ir metinių rievinių chronologijų. Ryšiams nustatyti darbe remtasi Pearsono koreliacijos ir regresijos analizėmis. Siekiant paaiškinti duomenų sekų vėlavimą viena kitos atžvilgiu (angl. *lag effects*), remtasi kryžminės koreliacijos (angl. *cross-correlation*) testu. Netiesiniai ryšiai tarp RW ir GWT nustatyti netiesinės regresijos analize. Naudojant segmentuotą regresinę analizę sukurtas tiesinės regresijos modelis. Sudaryto modelio patikimumui įvertinti buvo naudoti kalibracijos (1986–2012) ir patikros (1935–1964) laikotarpiai. Toliau darbe pagal atstatytą GWT aiškinamasi, kodėl P ir P-PET tam tikrais metais turėjo didžiausią įtaką metinių rievinių formavimuisi. Darbe analizuojami DendroClim2002 programa nustatyti periodai, kai P ir P-PET turėjo įtaką RW ir šių periodų GWT kitimo tendencijos.

### 3. TYRIMŲ REZULTATAI

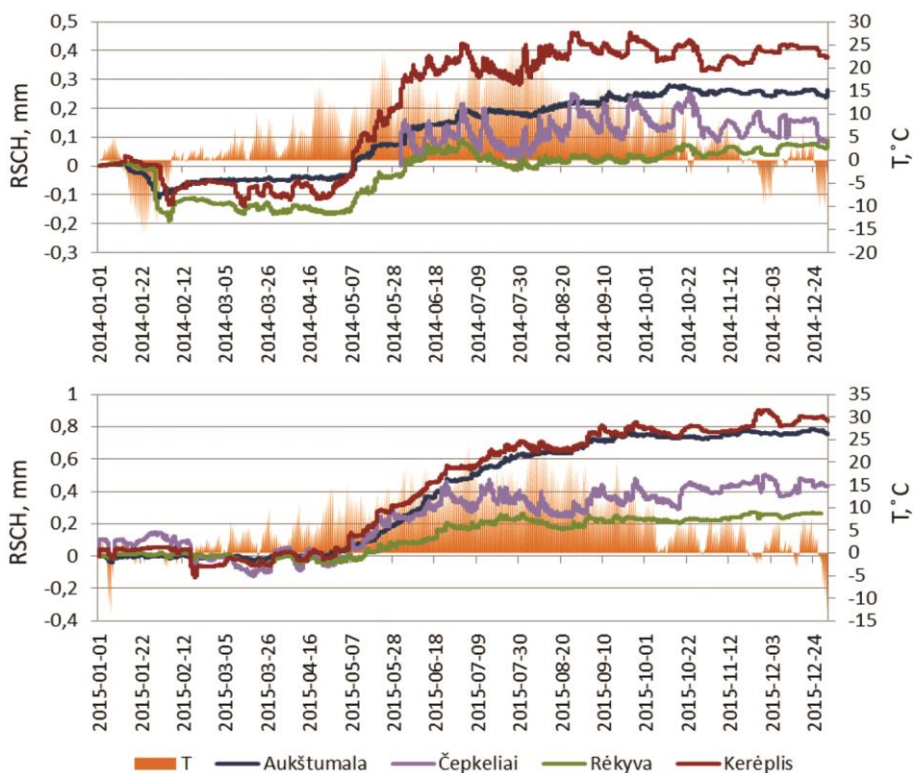
#### 3.1 Hidrometeorologinių sąlygų įtaka pariniams ir sezoniniams medžių kamienų radialiesiems pokyčiams

Medžiai per visą savo augimo laiką kiekvienų metų rievėse kaupia informaciją apie buvusias jų aplinkos sąlygas. Patikimai rekonstruoti buvusias gamtinės aplinkos sąlygas galima tik išsiaiškinus ryšį tarp trumpalaikių (parinių ir sezoninių) medžio kamieno radialiųjų pokyčių ir hidrometeorologinių sąlygų. Šiame skyriuje aptariama radialiųjų kamienų pokyčių priklausomybė nuo temperatūros ir gruntinio vandens lygio, kamienų pokyčių periodai, paros ciklai ir jų priklausomybė nuo hidrometeorologinių sąlygų.

##### 3.1.1 Radialiųjų kamienų pokyčių priklausomybė nuo temperatūros ir gruntinio vandens lygio

Metinis kamieno apimties kitimas vyksta dėl medžio augimo, prasidedančio pavasario pradžioje ir pasibaigiančio vėlyvą vasarą, bei kamieno apimties sumažėjimo žiemos mėnesiais. Laipsniškas kamieno apimties didėjimas pasireiškia dėl ląstelių plėtimosi ir dalijimosi pavasario-vasaros sezonais, atėjus žiemai dėl nepakankamo vandens pasisavinimo ir šalčio įtakos medžio ląstelės traukiasi ir kamieno apimtis mažėja (King et al., 2013). Dendrometrų duomenų eilės rodo (5 pav.), kad intensyviausias suminių teigiamų RSCH didėjimas vyksta nuo gegužės pradžios iki birželio pabaigos, vėliau augimo tempai mažėja. 2014 metais liepos mėnesį, 2015 metais rugpjūčio mėnesį matomas kamieno susitraukimas, kurį galėjo lemti drėgmės deficitas – ekstremaliai nukritęs GWT (6 pav.). Vegetacijos pradžioje gana aiški tiesioginė suminio teigiamo RSCH didėjimo priklausomybė nuo kylančios oro temperatūros, tuo tarpu GWT kitimas vegetacijos pradžioje priešingas – žemėjant GWT didėja suminiai teigiami RSCH (5 ir 6 pav.).

Vegetacijos periodas 2014–2015 m. prasidėjo gegužės pradžioje, vidutinei paros temperatūrai pakilus virš 7 °C (5 pav.). Panašu, kad tiriamuoju laikotarpiu svarbiausia yra didesnė nei 7 °C temperatūra, o jos pokyčiai tiriamuoju periodu didelės įtakos RSCH neturėjo. Šiuo laikotarpiu stebima GWT kitimo įtaka RSCH (6 pav.). GWT krentant kamieno skersmuo didėja, ir atvirkščiai, tačiau kai GWT nukrinta žemiau kaip 20 cm nuo durpės paviršiaus, priklausomybė pasikeičia – GWT krentant kamieno skersmuo mažėja, ir atvirkščiai.



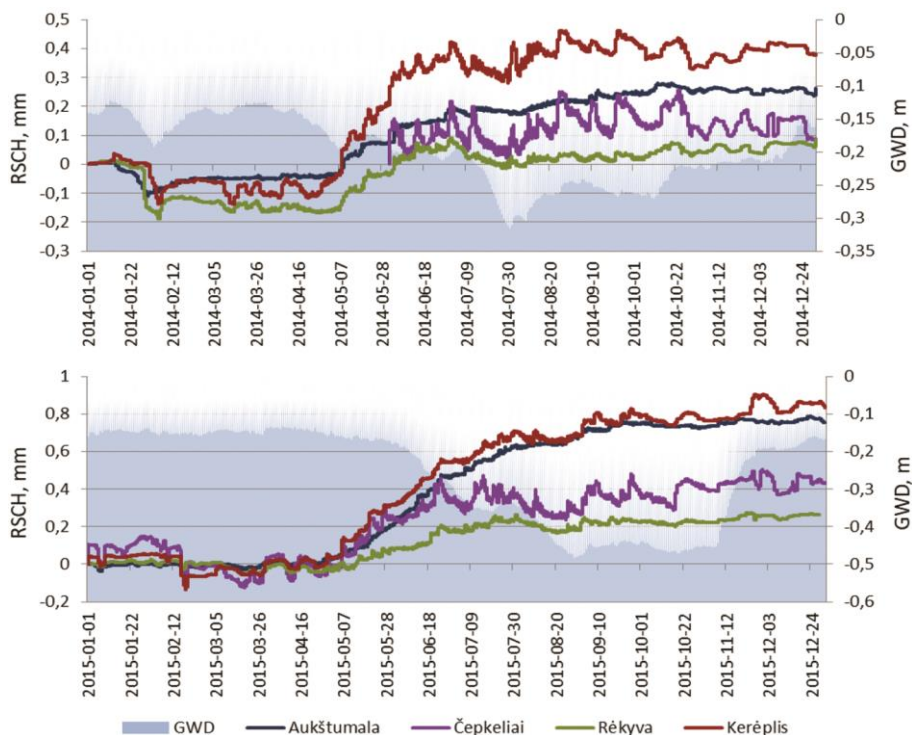
**5 pav.** 2014–2015 metų suminiai RSCH ir vidutinė keturių aukštapiškių paros temperatūra

Didelę įtaką medžių RSCH galėjo turėti 2014 metais santykinai ilgai trukusi žema prieš vegetacinio laikotarpio oro temperatūra. 2014 metų pradžioje ilgai trukę šalčiai galėjo lemti staigų (mažiau nei per mėnesį) suminį neigiamų RSCH padidėjimą. Visose aukštapiškėse suminis neigiamas RSCH padidėjo iki 0,2 mm (5 pav.). Visų medžių kamienų radialusis prieaugis 2014 metais buvo dvigubai ar net daugiau kartų mažesnis lyginant su 2015 metais. Didžiausias metinis prieaugis buvo Kerėplio aukštapiškės medžių (2014 m. ~0,4 mm, 2015 m. ~0,8 mm), toliau seka Aukštumala (2014 m. ~0,3 mm, 2015 m. ~0,8 mm), Čepkeliai (2014 m. ~0,1 mm, 2015 m. ~0,4 mm), Rėkyva (2014 m. ~0,1 mm, 2015 m. ~0,2 mm).

Skirtingą aukštapiškėse augančių pušų prieaugį gali lemti skirtingos augaviečių drėkinimo sąlygos. Didžiausią prieaugį Kerėplio aukštapiškėje galėjo formuoti išskirtinai žemas gruntinio vandens lygis. Kerėplio aukštapiškėje (2014–2016 metų duomenimis) gruntinio vandens lygis buvo žemiausias, lyginant su kitomis darbe tirtomis aukštapiškėmis. Priklausomai



nuo metų meteorologinių sąlygų, gruntinio vandens lygis Kerėplio aukštapelkėje kinta ir vegetacijos periodo metu gali nukristi žemiau nei 0,6 m nuo durpės paviršiaus. Remiantis ankstesniais moksliniais darbais (Eggelsmann, 1984; Ruseckas, Grigaliūnas, 2008; Haapalehto et al., 2011) nustatyta, kad aktyvių aukštapelkių bendrijoms ir šias bendrijas formuojantiems augalams optimalus gruntinio vandens lygis vegetacijos sezonu turi slūgsoti ne giliau kaip 30 cm gylyje.



**6 pav.** 2014–2015 metų suminiai RSCH ir GWD. Paveiksle pateiktas vidutinis trijų aukštapelkių (Aukštumalos, Kerėplio ir Rėkyvos) GWD. Čepkelių aukštapelkės GWT duomenys, dėl prietaiso gedimo, nefiksuoti

Didelį Aukštumalos aukštapelkės pušų metinių rėvių prieaugį gali lemti ankstesni durpių kasybos darbai ir vandens nutekėjimas iš aukštapelkės į durpių kasybos laukus. Nors 2006–2014 metais Aukštumaloje buvo įrengtos vandens sulaikymo priemonės (Jarašius, 2015), metinių rėvių tyrimai neparodo esminių pokyčių metinių rėvių pločiuose. Ankstesni Aukštumalos pelkės tyrimai rodė, kad neabejotinose sausinimo įtakos zonose augusių pušų radialusis prieaugis nuo 1978 m. padidėjo daugiau nei 4 kartus ir siekė 1–2 mm per metus. Tuo tarpu iki durpių kasybos darbų pradžios metinis

radialusis prieaugis nesiekė 0,5 mm per metus (Pakalnis et al., 2008, 2009). Siekiant įvertinti pakitusio gruntinio vandens lygio aukštapelkėje poveikį metinems medžių rievėms, reikia atsižvelgti į GWT įtakos pušų augimui vėlavimo galimybę. Kiti autoriai teigia, kad bendrųjų kaitos intensyvumą atkurtose pelkėse lemia ir dėl geografinės padėties susiformavę specifiniai oligotrofinių pelkių bruožai. Patvenktose pietinėse Suomijos oligotrofinėse pelkėse kiminų danga per dešimt metų padidėjo 20–50 % (Haapalehto et al., 2011). Išanalizavus 56-ių Didžiosios Britanijos oligotrofinių pelkių hidrologinio atkūrimo rezultatus nustatyta, kad atkurtos pelkės tipingą augalinę struktūrą su būdingais hidrocheminiais parametrais įgauna ne anksčiau kaip po devynių metų (Bellamy et al., 2012). Latvijos pelkėse reikšmingi kiminų dangos pokyčiai pastebėti praėjus ketveriems metams po tvenkimų (Priede, 2013). Ekstensyviai sausintose Kamanų valstybinio gamtinio rezervato pelkės dalyse vandens lygis pasiekė aktyvioms aukštapelkėms būdingas reikšmes praėjus ketveriems metams po tvenkimo (Ruseckas, Grigaliūnas, 2008). Tikėtina, kad tvenkimų poveikis Aukštumos pelkėje yra ilgalaikis, todėl reikalingi tolimesni stebėjimai. Pastebimas kiminų ir kitų aukštapelkinių durpojų skverbimasis į degradavusias Aukštumos pelkės buveines leidžia tikėtis, kad ilgainiui bendrųjų kaita vystysis oligotrofinių pelkių susidarymo kryptimi (Jarašius, 2015).

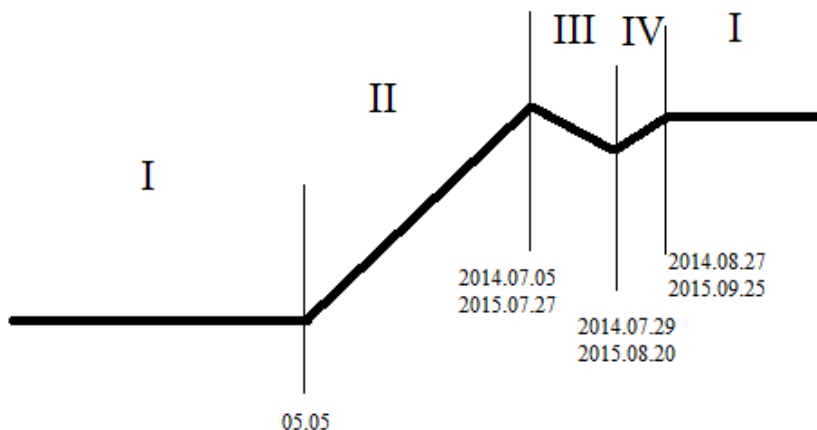
Čepkeliuose tirtos pušys auga natūralioje pelkės dalyje, todėl metinis pušų prieaugis yra artimas vidutiniam pelkių pušų prieaugiui (Moir et al., 2010; Pakalnis et al., 2009; Smilijanac et al., 2014). Rėkyvos aukštapelkės pušų prieaugį, taip pat artimą vidutiniam pelkių pušų prieaugiui, gali nulemti dėl patvenkto Rėkyvos ežero aukštas gruntinio vandens lygis.

### 3.1.2 Radialiujų kamienų pokyčių periodai

Hidrometeorologinių sąlygų įtaka medžių RSCH priklauso nuo metų laikotarpio, kada formuojasi atskiros metinės rievės dalys. Vykdam tyrimą, aukštapelkių medžių suminiai RSCH suskirstyti į keturis periodus (7 pav.; 4 lentelė):

- 1 – rudens pabaigos–žiemos–pavasario pradžios ramybės periodas, kai RSCH svyruoja apie nulį;
- 2 – pavasario pabaigos–vasaros pradžios augimo periodas, kai suminis teigiamas RSCH kiekvieną parą didėja iki vasaros maksimumo;
- 3 – vasaros teigiamų suminių RSCH mažėjimo periodas, kai per trumpą laiką vasaros pabaigoje fiksuojamas kamieno susitraukimas;

4 – vasaros pabaigos–rudens pradžios teigiamų suminių RSCH didėjimo periodas.



7 pav. Suminių RSCH periodų schema sudaryta pagal Rėkyvos, Kerėplio, Čepkelių ir Aukštumalos aukštapelkėse 2014–2015 metais augusias pušis

4 lentelė. 2013–2015 m. aukštapelkių medžių RSCH periodai

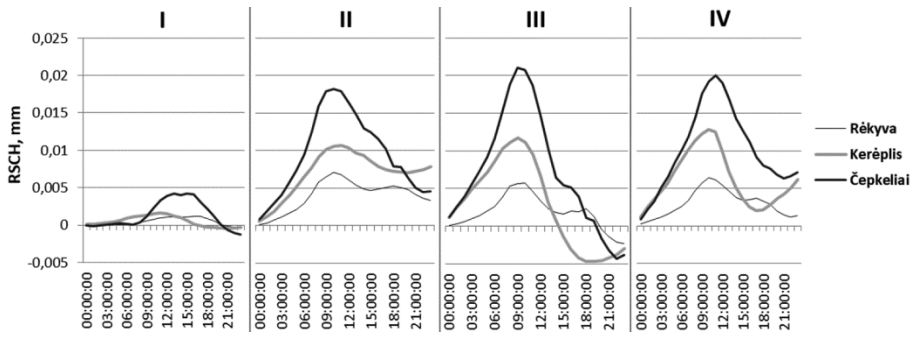
Periodas	Rėkyva	Kerėplis	Čepkeliai	Aukštumala
2013–2014 m.				
1	2013 10 17* –	2013 10 17* –	2014 04 17*	2013 10 17* –
	2014 05 05	2014 05 05	– 2014 05 07	2014 05 05
2	2014 05 05 –	2014 05 05 –	2014 05 07 –	2014 05 05 –
	2014 07 01	2014 07 01	2014 07 12	
3	2014 07 01 –	2014 07 01 –	2014 07 12 –	–
	2014 07 26	2014 07 29	2014 08 04	
4	2014 07 26 –	2014 07 29 –	2014 08 04 –	– 2014 10 20
	2014 08 30	2014 08 27	2014 08 27	
2014–2015 m.				
1	2014 08 30 –	2014 08 27 –	2014 08 27 –	2014 10 20 –
	2015 05 08	2015 05 05	2015 04 28	2015 04 28
2	2015 05 08 –	2015 05 05 –	2015 04 28 –	2015 04 28 –
	2015 07 31	2015 07 30	2015 07 23	
3	2015 07 31 –	2015 07 30 –	2015 07 23 –	–
	2015 08 20	2015 08 20	2015 08 20	
4	2015 08 20 –	2015 08 20 –	2015 08 20 –	– 2015 09 21
	2015 09 24	2015 09 09	2015 09 26	

\*Nuo matavimų pradžios

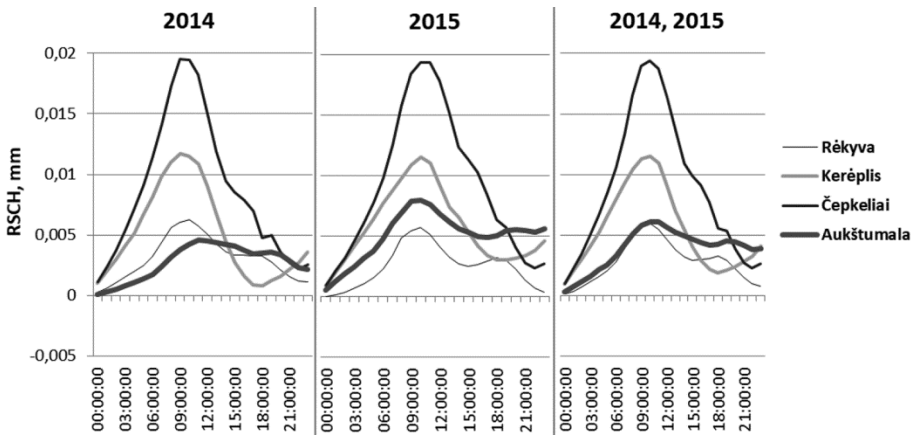
Lyginant su Turcotte'o ir kt. (2009) Portugalijos vakaruose atliktais tyrimais, Lietuvos aukštapelkėse aplinkos veiksnių įtaka vėluoja, skiriasi periodų trukmės. Aukštumos aukštapelkėje 2014 ir 2015 metais pastebėtas labai neįprastus vasaros kamieno susitraukimas (3 periodas). Vertinant Aukštumos RSCH darbe vegetacijos periodas neskirstomas į 2, 3, 4 periodus. Toks periodų nevienodumas gali būti nulemtas mažesnio Aukštumos pelkės atstumo nuo Baltijos jūros ir dėl to skirtingo nei kitose aukštapelkėse klimato: šiltesnių žiemų ir šaltesnių vegetacijos laikotarpių bei skirtingų skystųjų ir kietųjų kritulių kiekio (LHMT stebėjimų duomenys). Aukštumos aukštapelkė tik apie 15 km nutolusi nuo Baltijos jūros, tuo tarpu Rėkyvos ~140 km, Kerėplio ~250 km, Čepkelių ~270 km. Tai leistų daryti prielaidą, kad 3 periodas – teigiamų RSCH sumažėjimas vegetacijos laikotarpiu, randasi dėl ekstremalaus aukštapelkių GWT nukritimo (30 cm žemiau pelkės paviršiaus). 2014–2015 m. Aukštumos GWT 3-ojo periodo metu nebuvo nukritęs žemiau nei 30 cm nuo durpės paviršiaus (2015 metų pavyzdys pateiktas 10 pav.).

### 3.1.3 Radialinių kamienų pokyčių paros ciklai ir jų priklausomybė nuo hidrometeorologinių sąlygų

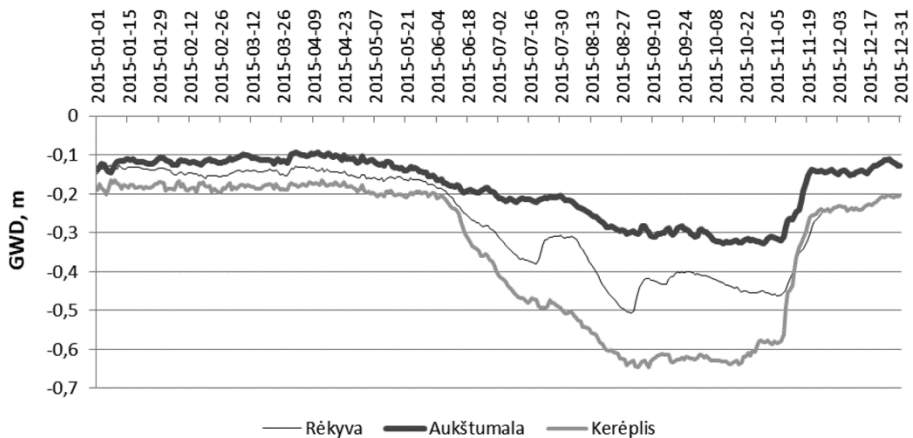
Per parą RSCH kinta. Matavimai rodo, kad visose aukštapelkėse vegetacijos metu nuo praeitos paros 22 val. iki sekančios paros 9 val. ryto medžių kamienai plečiasi ir pasiekia RSCH paros maksimumą. Vėliau prasideda lėtas kamieno traukimas, kuris vyksta maždaug iki 22 val. Tai nustatyta visose tirtose pelkėse, išskyrus Kerėplio aukštapelkę (8 ir 9 pav.). Dažniausiai paros RSCH parodo medžio kamieno audinių aprūpinimą vandeniu. Kiekvienas paros ciklo etapas labai priklauso ir nuo oro temperatūros. Kamienas plečiasi saulei kylant, kai daugiau vandens yra paimama iš dirvožemio nei prarandama dėl transpiracijos (Kozłowski et al., 1997; Kozłowski, Winget, 1964; Крамер, Козловский, 1983). Kai temperatūra pakyla ir dėl intensyvėjančios transpiracijos vandens absorbcija per šaknis nespėja patenkinti vandens poreikio, kamieno vandens atsargos mažėja, dėl to medžio ląstelės traukiasi ir kamienas plonėja. Saulei leidžiantis transpiracija lėtėja, o kamienas dėl jame kaupiamo vandens vėl plečiasi.



8 pav. RSCH paros ciklai 2013–2015 m. I, II, III, IV periodais



9 pav. RSCH paros ciklai 2014 ir 2015 m. vegetacijos laikotarpiu



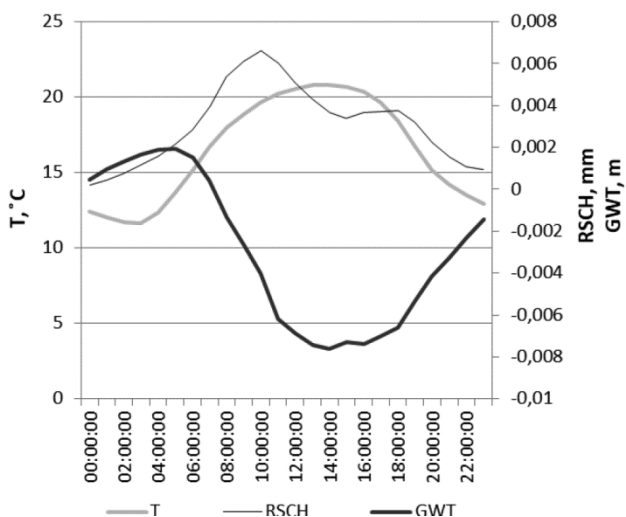
10 pav. GWD 2015 metais. Čepkelių aukštapelkės GWT duomenys, dėl prietaiso gedimo, nefiksuoti

Nors skirtingose aukštapelkėse pušų RSCH paros ciklai yra panašūs, tačiau, matyt, dėl individualių medžių savybių (amžiaus, šaknų sistemos, ir kt.) ir jų aplinkos sąlygų, šiek tiek gali skirtis. Visose aukštapelkėse ne vegetacijos metu gruntinio vandens lygis kinta nuo 0,1 m iki 0,2 m nuo durpės paviršiaus, o vegetacijos laikotarpiu kiekvienoje aukštapelkėje nukrinta skirtingai. Kaip pavyzdys 10 paveiksle pateikti 2015 metų gruntinio vandens gylio duomenys. Iš jų matyti, kad Kerėplio aukštapelkėje GWT vegetacijos metu nukrinta žemiausiai (daugiau nei iki 0,6 m), tuo tarpu Rėkyvoje ne žemiau kaip iki 0,5 m, Aukštumaloje tik iki apie 0,3 m nuo durpės paviršiaus. Skirtingas gruntinio vandens gylis aukštapelkėse gali būti susijęs su skirtingų augaviečių sąlygomis. Kerėplio aukštapelkė pasižymi tankiu bręstančiu *P. sylvestris* f. *uliginosa* ekologinės formos pušynu, todėl vegetacijos laikotarpiu čia transpiracija intensyviausia ir gruntinio vandens lygis nukrenta žemiausiai. Gruntinio vandens lygio matavimo gręžiniai Rėkyvoje įrengti kur kas mažesnio tankumo pušyne, todėl čia transpiracija mažesnė ir gruntinio vandens lygis vegetacijos metu yra aukštesnis nei Kerėplio aukštapelkėje. Aukštumaloje gręžinio aplinkoje yra tik maži ploteliai skurdžių pušaičių, taigi transpiracija dar mažesnė. Žemiausias gruntinio vandens lygio kritimas Kerėplio aukštapelkėje fiksuotas ir 2014 metais. Gal dėl to Kerėplio aukštapelkėje augančių medžių paros ciklai labiausiai išsiskiria iš medžių augančių kitose aukštapelkėse. Matyt dėl žemo GWT, čia medžių kamienų paros ciklai vegetacijos periodu panašiausi į mineraliniame grunte augančių pušų – panašėja į sinusoidę (King et al., 2013; Vieira et al., 2013). Tuo tarpu kitose aukštapelkėse apie 18 valandą pastebimas kiek mažesnis, antrasis kamieno išsiplėtimo pikas. Šiuo paros laiku dendrometrų temperatūros davikliai fiksavo temperatūros padidėjimą. Dėl šios priežasties darbe buvo įvertinta temperatūrinė paklaida (De Belder, 2015) ir nustatyta, kad temperatūros pokyčiai matavimo prietaisui įtakos neturėjo.

RSCH paros ciklo amplitudė didžiausia Kerėplio ir Čepkelių aukštapelkėse (8 ir 9 pav.). Taip gali būti dėl to, kad čia tirtos pušys yra jaunesnės (1 lentelė) ir iš kitų tirtų pušų išsiskiria didesniu santykinu tūriu balaninės medienos, kuria cirkuliuoja vanduo (Gjerdrum, 2003).

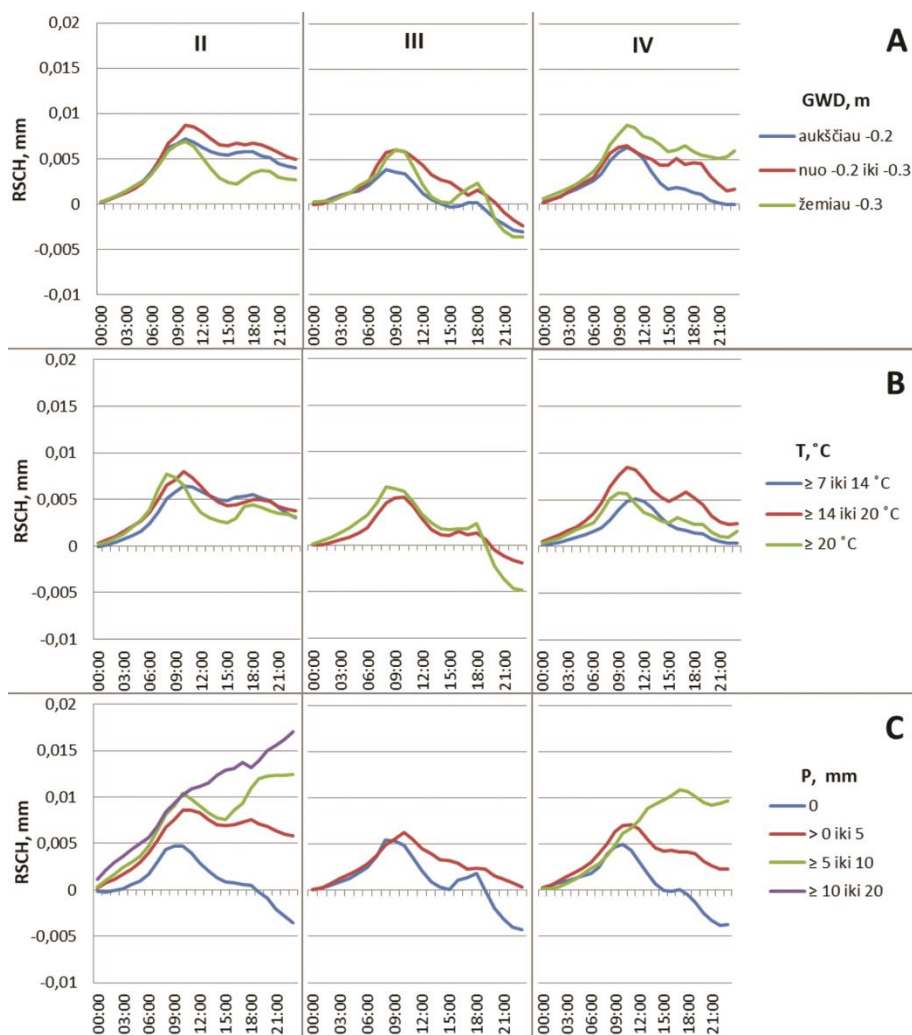
Detaliau analizuojama RSCH priklausomybė nuo hidrometeorologinių veiksnių Rėkyvos aukštapelkėje (11–13 pav.). Čia pušų kamieno plėtimasis vyko iki 10 valandos ryto, kol temperatūra dar nepasiekusi paros maksimumo (duotuoju atveju nebuvo pakilusi virš 20 °C), o GWT per parą nenukrenta daugiau kaip 4 mm (11 pav.). Tuo metu vandens absorbcija per šaknis didesnė nei transpiracija. Temperatūrai toliau kylant ir kartu krentant

GWT absorbcija per šaknis nebespėja tenkinti transpiracijos poreikio ir kamienas plonėja, kol 15 val. pasiekiamas pirmasis kamieno paros ciklo minimumas. Autorės nuomone, po 15 valandos intensyviai vykstant garavimui visoje aukštapelkės medžių aplinkoje, ore susidaro papildomas drėgmės kiekis, kuris nulemia kamieno plėtimąsi iki 18–19 val. vakaro. Saulei nusileidus transpiracija sumažėja (Kozłowski et al., 1997; Kozłowski, Winget, 1964; Крамер, Козловский, 1983), tačiau vandens atsargos akrotelme dar minimalios (11 pav.), todėl toliau tęsiasi kamieno plonėjimas. Apie 23–24 valandą dėl vandens garų kondensacijos pelkėje vandens atsargos akrotelme papildomos, spartėja vandens absorbcija per šaknis ir kamienas plečiasi, prasideda naujas paros ciklas. Rėkyvos aukštapelkėje vegetacijos periodo metu teigiamas radialusis kamieno pokytis per parą vidutiniškai padidėja apie 0,001 mm. Tuo tarpu vidutinis 2014 ir 2015 metų vegetacijos periodo paros RSCH Čepkelių aukštapelkėje ~0,003 mm, Aukštumaloje ir Kerėplyje ~0,004 mm.



**11 pav.** 2014 ir 2015 m. suminių RSCH, GWT ir temperatūros vegetacijos periodo paros ciklai Rėkyvos aukštapelkėje. Temperatūros duomenys pagal Rėkyvos MS

12 paveiksle matyti, kad vegetacijos metu trečiajame periode visais atvejais nustatytas kamieno skersmens sumažėjimas. Manoma, kad taip yra dėl to, jog šiuo laikotarpiu labai nukrenta pelkės GWT ir sumažėja drėgmės kiekis akrotelme.



**12 pav.** Vegetacijos periodo RSCH paros ciklą (II, III, IV periodai) priklausomybę nuo vidutinio paros gruntinio vandens gylio (A), vidutinės paros oro temperatūros (B) ir paros kritulių kiekio (C). 2014 ir 2015 m. Rėkyvos duomenys

12 paveikslo A dalyje parodyta RSCH paros ciklą kaita priklausomai nuo gruntinio vandens gylio. Čia 2 ir 3 periodų metu kamieno skersmuo didžiausias, kai GWT nuo durpės paviršiaus yra vidutiniame gylyje (0,2–0,3 m žemiau durpės paviršiaus), tuo tarpu 4 periodo metu kamieno skersmuo tuo didesnis, kuomet žemesnis GWT. Matyt taip yra dėl to, kad 4 periodo metu kritulių iškrenta daugiau nei kitais dviem periodais ir kylantis



GWT perteklinio vandens augavietėse sukuria nepalankias sąlygas medžio augimui.

Vertinant RSCH pagal temperatūrą (12 paveikslas B) matome, kad 2 periodas yra palankiausias medžio kamieno plėtimuisi, čia teigiamas RSCH per parą padidėja iki 0,005 mm. Visais periodais teigiamo RSCH didėjimui palankiausia oro temperatūra nuo 14 °C iki 20 °C.

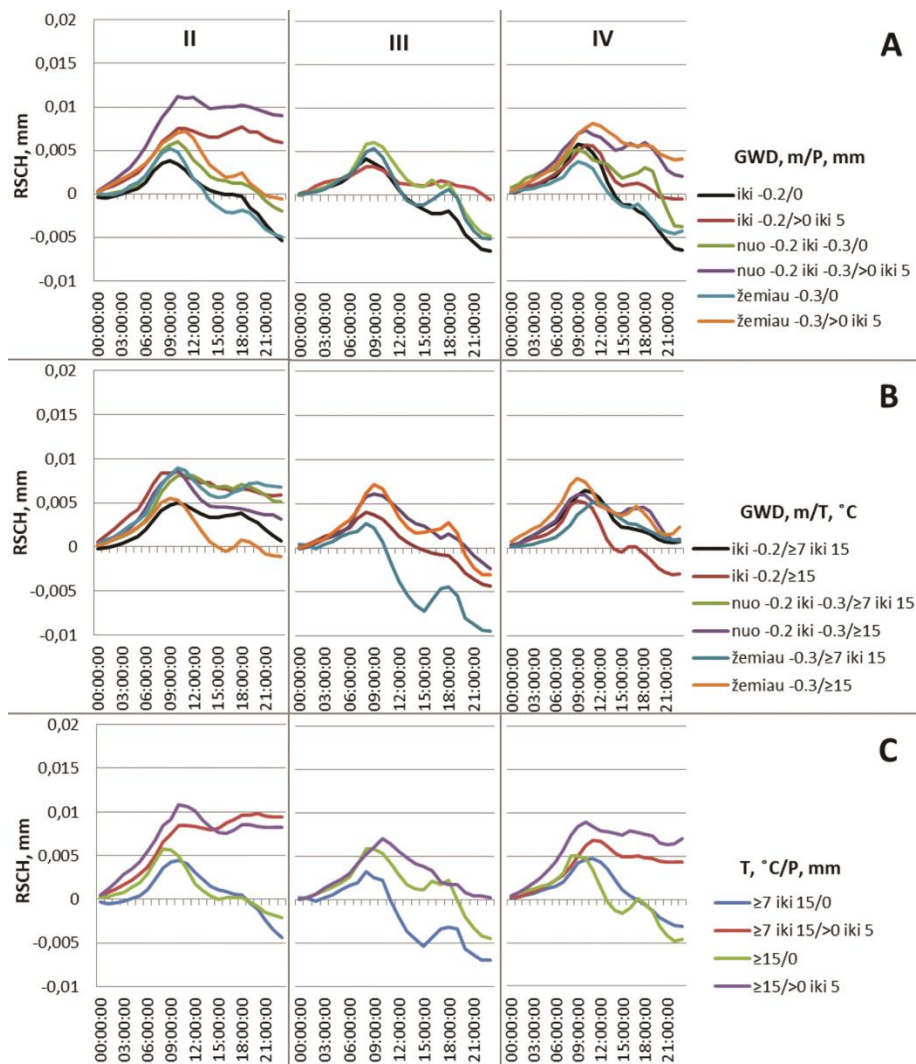
12 paveikslo C dalyje pavaizduota RSCH priklausomybė nuo kritulių kiekio. RSCH paros ciklas matomas tik tuo atveju, kai kritulių ne daugiau kaip 5 mm, nes daugėjant kritulių pasireiškia kamieno brinkimas, „paslepiantis“ RSCH paros ciklą. Didžiausias kamieno skersmens sumažėjimas nustatytas tomis paromis, kai kritulių visai nebuvo.

2 periodo metu didžiausią įtaką RSCH daro krituliai (13 pav. A, C). Jie sukuria palankias sąlygas medžio kamieno plėtimuisi. GWT įtaka aukštapelkės pušims – nevienareikšmė. Ji labai priklauso nuo temperatūros. Esant žemesnei temperatūrai (7–15 °C), palankesnės sąlygos kamieno plėtimuisi yra žemas ir vidutinis (žemiau 0,2 m nuo durpės paviršiaus) vandens lygis. Dėl žemesnės temperatūros ne taip intensyviai vykdoma transpiracija ir todėl kamienas sparčiau plečiasi. Kai GWT kyla (aukščiau 0,2 m nuo durpės paviršiaus), palankesnė tampa aukštesnė temperatūra – daugiau kaip 15 °C (13 pav. B). Aukštas gruntinio vandens lygis kuria nepalankias sąlygas medžio augimui, o pakilusi temperatūra suaktyvindama transpiraciją reguliuoja vandens balansą ir sudaro palankesnes sąlygas medžių augimui.

Įsibėgėjus vegetacijai ir prasidėjus 3 periodui palankiausios sąlygos kamieno plėtimuisi yra aukšta temperatūra (>15 °C) ir krituliai. GWT didelės įtakos medžio kamieno pasikeitimams neturėjo. Daugeliu atvejų šio periodo metu kamieno skersmuo mažėja. Paromis, kurių sąlygos palankios (aukšta temperatūra ir krituliai), kamieno skersmuo išlieka nepakitęs. Tačiau šiuo vegetacijos laikotarpiu trūksta duomenų norint išsiaiškinti žemos temperatūros, GWT ir medžių kamieno skersmens pokyčių ryšį.

4 periodo metu kamieno skersmuo labiausiai padidėja paromis su krituliais, esant žemam ir vidutiniam GWT (<0,2 m nuo durpės paviršiaus) ir daugiau nei 15 °C temperatūrai. Paskutiniojo vegetacijos periodo metu, priešingai nei pirmojo, vyrauja labai žemas GWT (<0,4 metrų nuo durpės paviršiaus) ir aukšta temperatūra. Šiame periode yra žemiausias GWT, tačiau dėl sumažėjusios nakties oro temperatūros didėja kondensato kiekis akrotelme. Jis gali kompensuoti vandens trūkumą dėl žemo gruntinio vandens lygio. Kondensatas ir išskrintantis net ir nedidelis kritulių kiekis

patenkina pušų augimui reikalingą vandens poreikį, o dienomis, kadangi oro temperatūra dar gana aukšta, susidaro palankios sąlygos pušų augimui.



**13 pav.** 2014 ir 2015 m. vegetacijos periodų RSCH paros ciklų priklausomybė nuo vidutinio paros gruntinio vandens gylio ir paros kritulių kiekio (A), vidutinio paros gruntinio vandens gylio ir vidutinės paros oro temperatūros (B), vidutinės paros oro temperatūros ir paros kritulių kiekio (C) Rėkyvos aukštapelkėje

Krituliai visų periodų metu kuria palankias sąlygas medžio kamieno plėtimuisi. Kai kritulių nėra, palankiausias medžio kamieno plėtimuisi yra

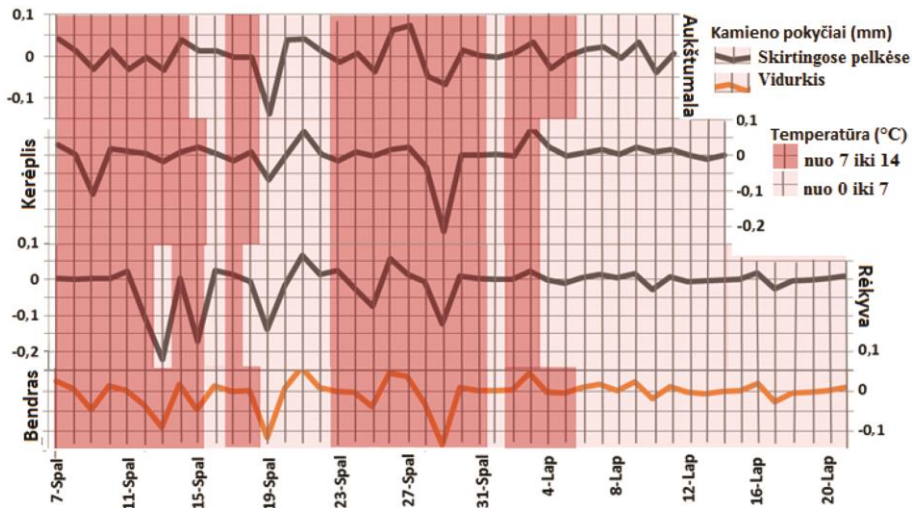
vidutinis GWT (0,2–0,3 m nuo durpės paviršiaus). Didelę kritulių įtaką medžio kamieno kaitai nustatė ir kiti autoriai. Tai parodė ir trijų metų tyrimai taigoje, matuojant balzaminio kėnio (*Abies balsamea* (L.) Mill.) kasdieninius radialiuosius pokyčius (Deslauriers et al., 2003). Dendrometrais matuotų įvairių medžių rūšių kasdienių radialiųjų kamienų pokyčių panašumai Etiopijoje ir Ekvadore taip pat priklausė nuo kritulių kaitos (Bräuning et al., 2009; Krepkowski et al., 2011). Kasdieniniai kedrinės pušies (*Pinus cembra* L.) kamienų pokyčiai Alpių ekotone taip pat teigiamai koreliavo su santykinės oro drėgmės ir kritulių pokyčiais (Gruber et al., 2009).

Statistiškai reikšmingi skirtumai ( $p < 0,005$ ) tarp duomenų grupių gauti lyginant skirtingo kritulių kiekio RSCH grupes visais vegetacijos periodais (2, 3 ir 4 periodai). Statistiškai reikšmingi skirtumai tarp RSCH duomenų grupių vegetacijos periodo metu taip pat nustatyti esant vidutiniam (nuo –0,2 iki –0,3 m), lyginant su aukštu ir žemu, gruntinio vandens gyliui nuo durpės paviršiaus. Esant šiam gruntiniam vandens gyliui nustatyti didžiausi teigiami RSCH. Reikšmingi skirtumai tarp RSCH duomenų grupių esant skirtingai temperatūrai nustatyti tik 2-ojo periodo metu.

Atlikus regresinę analizę nustatytas teigiamas statistiškai reikšmingas ( $p < 0,005$ ) kritulių poveikis paros RSCH, t. y. didesnis kritulių kiekis statistiškai reikšmingai prognozuoja didesnę kamieno apimtį. Vertinant parinių radialiųjų kamieno pokyčių priklausomybę nuo temperatūros, nustatytas teigiamas statistiškai reikšmingas ( $p < 0,005$ ) temperatūros atsakas paros RSCH 2-ojo periodo metu, t. y. kylanti oro temperatūra statistiškai reikšmingai prognozuoja didesnę kamieno apimtį.

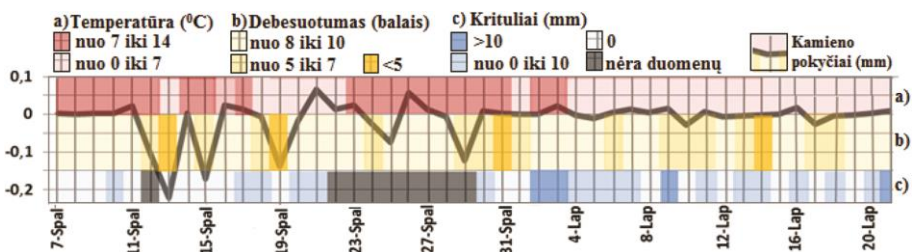
#### 3.1.4 Ramybės būsenos giliosios fazės nustatymas

Panaudojus didelės raiškos dendrometrus tirtose pelkėse pavyko nustatyti ramybės būsenos giliosios fazės pradžią. Didžiausią įtaką medžio ramybės būsenos fazės pasikeitimui turi temperatūra. Matyti, kad mažesnio kontinentalumo sąlygomis, arčiau jūros, ši būseną keliomis paromis vėluoja. Čia pateikti aukštapelkėse augančių pušų kamienų apimties pokyčių duomenys, surinkti 2013 m. rugsėjo–lapkričio mėnesiais (14–17 pav.). Tyrimams pasirinktas ramybės būsenos pradžios periodas leidžia pagilinti supratimą apie meteorologinių sąlygų poveikį medžio fiziologijai ir augimui bei kamieno apimties pasikeitimams. Autorės nuomone, šio laikotarpio meteorologinės sąlygos didesnę įtaką turi ankstyvajam kitų metų priaugio formavimuisi.



**14 pav.** *Pinus sylvestris* kamieno apimties pokyčiai ir vidutinė paros temperatūra Aukštumalos, Kerėplio ir Rėkyvos aukštapelkėse. 2013 m. ramybės būsėnos pradėios periodas

Visą 2013 metų rugėėjo–lapkriėio mėnesių laikotarpį vidutinė oro temperatūra buvo teigiama. Žemiausia paros temperatūra ( $T < 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) fiksuota nuo lapkriėio 11 d. Nuo lapkriėio 5 d., temperatūrai nukritus žemiau  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , prasidėjo gilioji aukštapelkės pušų ramybės būsena (14 pav.), t.y. medžio kamieno apimties svyravimų amplitudė sumažėjo. Tačiau tuo laikotarpiu Aukštumalos dendrometrų duomenys nerodo aiškios šios fazės pradėios (14 pav.). Po lapkriėio 5 dienos vidutinė paros temperatūra Aukštumaloje svyruoja apie  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , tuo tarpu Rėkyvos ir Kerėplio aukštapelkėse jau buvo apie  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Toks ramybės sezono fazių nevienodumas gali būti nulemtas vėluojanėio (atsižvelgiant į kitas aukštapelkes) šaltesnių orų laikotarpio (LHMT stebėjimų duomenys).



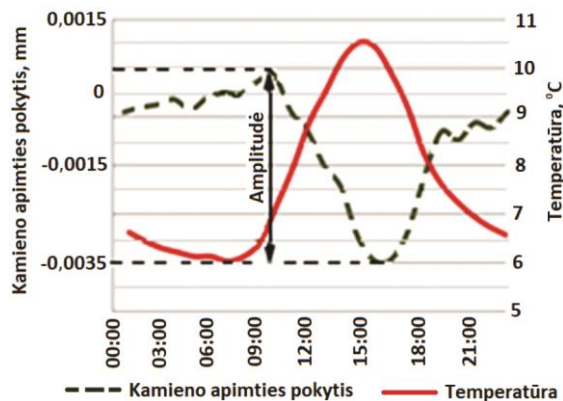
**15 pav.** *Pinus sylvestris* kamieno apimties pokyčiai Rėkyvos aukštapelkėje, vidutinė paros temperatūra (raudonai), kritulių kiekis (mėlynai) ir debesuotumas (geltonai). 2013 m. ramybės būsėnos pradėios periodas

Ramybės būsenos pradžios periodo metu didžiausias kamieno apimties sumažėjimas nustatytas tomis paromis, kai nebuvo kritulių (15 pav.). Tai tik patvirtina anksčiau išsakytą mintį, kad kamieno apimties paros pokyčiai geriausiai parodo kamieno audinių aprūpinimą vandeniu.

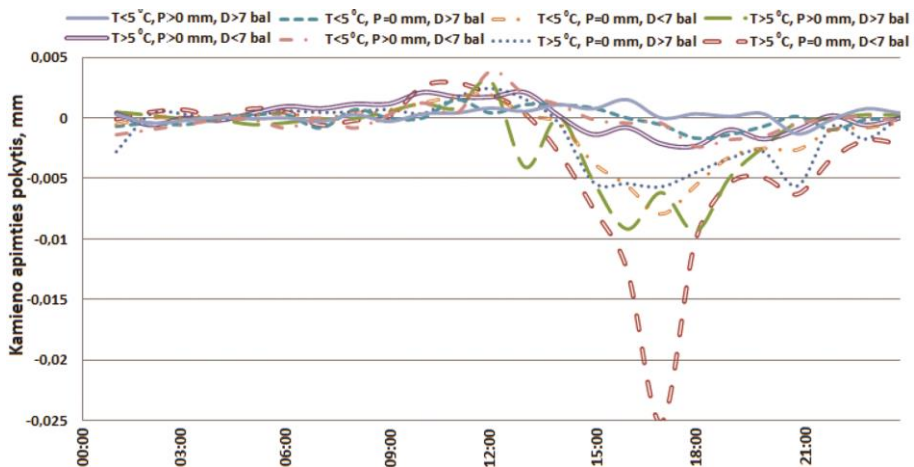
Kamieno apimties kaitą taip pat lemia debesuotumas, tai, tikėtina, susiję su kamieno audiniuose sulaikomu vandeniu (King et al., 2013). Kamieno apimtis sumažėja esant mažam ir labai mažam debesuotumui (nuo 0 iki 7 balų) ir nesant kritulių. Išanalizavus duomenis matyti, kad teigiamas paros kamieno pokytis buvo didelio debesuotumo (8–10 balų) dienomis, kai buvo kritulių ir vidutinė paros temperatūra siekė  $>4$  °C. Maksimalūs šio laikotarpio paros kamieno apimties pasikeitimai nustatyti vidutinei paros temperatūrai viršijus 8 °C.

Ramybės būsenos pradžios periodui ištirti buvo sudaryti ir išanalizuoti kamieno apimties pokyčių paros ciklai (16, 17 pav.). Rugsėjo–lapkričio mėnesiais tirtose pelkėse maksimali matuotų pušų kamieno apimtis būdavo stebima apie 9.00 val., vėliau apimtis mažėdavo, kol 16.00 val. pasiekdavo minimumą, tuomet vėl prasidėdavo lėtas kamieno plėtimasis, kuris tęsdavosi iki kitos paros 9.00 val. (16 pav.). Grafike matyti, kad paros temperatūros kitimas yra priešingas kamieno apimties paros ciklui. Tikėtina, kad tai lėmė šilčiausiu paros metu padidėjanti transpiracija. Kamieno plėtimasis prasideda saulei leidžiantis ir baigiasi ateinantį rytą, tuo metu transpiracija sumažėja – vandens yra įsisavinama daugiau nei prarandama dėl transpiracijos. Panašiai šiuos procesus aiškina ir kiti autoriai (Kozłowski, Winget, 1964; Herzog et al., 1995; Kozłowski et al., 1997).

Atlikus dendrometrų duomenų analizę nustatyta, kad tiriamuoju laikotarpiu dienomis su krituliais, esant aukštam debesuotumui (daugiau nei 7 balai) ir vidutinei paros temperatūrai  $<5$  °C medžio kamieno kaitos per parą amplitudė yra mažiausia (17 pav). Tikėtina, kad tokios sąlygos lemia dėl pastovaus drėkinimo beveik nekintančią kamieno drėgmę (išbrinkimą), bei sulėtėjusią transpiraciją ir mažą vandens netektį medžio ląstelėse. Tokiomis meteorologinėmis sąlygomis pasižyminčiomis paromis medžio kamieno apimtis per parą padidėjo daugiausiai ( $\sim 0,0005$  mm). Penkis kartus mažesnis medžio kamieno apimties padidėjimas nustatytas paromis kai debesuotumas mažesnis nei 7 balai, o temperatūra ir krituliai yra tokie patys kaip aukščiau minėtu atveju (17 pav.). Tokiomis meteorologinėmis sąlygomis transpiracija, tikėtina, daug intensyvesnė. Kitomis meteorologinėmis sąlygomis buvo nustatytas medžio kamieno apimties mažėjimas.



**16 pav.** 2013 m. Rėkyvos, Aukštumalos ir Kerėplio aukštapelkių pušų rambės būsenos pradžios periodo vidutinis kamienų apimties pokyčių paros ciklas ir vidutinės oro temperatūros kaita



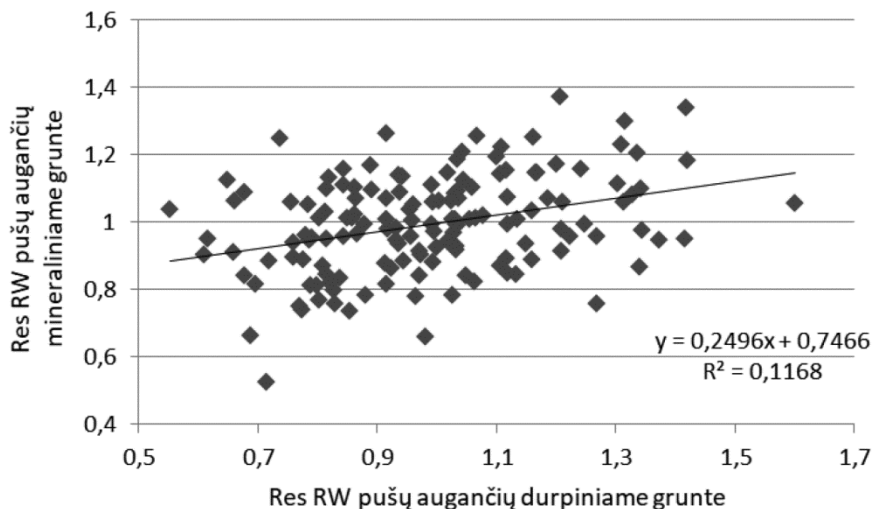
**17 pav.** Rėkyvos aukštapelkėje augančių pušų kamieno apimties pokyčių paros ciklai esant skirtingoms klimatinėms sąlygoms. *T* – temperatūra, *P* – kritulių kiekis, *D* – debesuotumas. 2013 m. rambės būsenos pradžios periodas

Didžiausi neigiami kamieno apimties paros pokyčiai rugsėjo–lapkričio mėn. laikotarpiu nustatyti kai debesuotumas buvo mažas, kritulių nebuvo, o oro temperatūra buvo  $>5$  °C. Tokiomis meteorologinėmis sąlygomis pasižyminčiomis paromis kamieno kaitos amplitudė yra didžiausia (17 pav.), o kamieno apimtis sumažėja apie 0,0025 mm. Tai, tikėtina, lemia padidėjusi transpiracija ir medžio kamieno džiūvimas giedromis dienomis bei naktį,

atvėsus orui sulėtėjęs vandens patekimas į medžio ląsteles (Tamkevičiūtė ir kt., 2014).

### 3.2 Medžių kamienų radialieji pokyčiai skirtingomis drėkinimo sąlygomis

Kerėplio šlapynių komplekse vidutinis metinis aukštapelkėje augančių pušų priaugis 1866–2012 metais buvo 0,6 mm. Šalia pelkės mineraliniame grunte augančių pušų – 1,1 mm. Koreliacija tarp Raw chronologijos duomenų imčių yra neigiama, stipri  $r = -0,35$  ( $p < 0,00001$ ), tačiau Stjudento  $t$  testas neparodė medžių augančių skirtinguose gruntuose priaugio duomenų sekų panašumų tarp Raw chronologijos duomenų porų. Koreliacija tarp Res chronologijos duomenų, lyginant su kitų aukštapelkių duomenimis (18 pav.; 5 lentelė), buvo stipriausia ( $r = 0,34$ ;  $p < 0,0001$ ).



**18 pav.** Kerėplio aukštapelkėje ir mineraliniame grunte augančių pušų Res chronologijų ryšio grafikas

Nuo 1952 iki 2000 metų didesnę metinių rėvių priaugį matome aukštapelkėje nei mineraliniame grunte (19 pav.). Vidutinis aukštapelkės pušų priaugis per šį laikotarpį buvo ~1 mm, o mineraliniame grunte, greta Kerėplio aukštapelkės, ~0,75 mm. Maždaug nuo trečiojo XX a. dešimtmečio mineraliniame grunte augančių pušų priaugis labai sumažėja ir toks išsilaiko beveik iki XXI a. pradžios. Tai gali būti susiję su kritulių, o tuo pačiu ir maisto medžiagų, kiekio sumažėjimu šiuo laikotarpiu. Tuo tarpu durpėje augančių pušų priaugis sparčiai padidėja penktąjį XX a. dešimtmetį

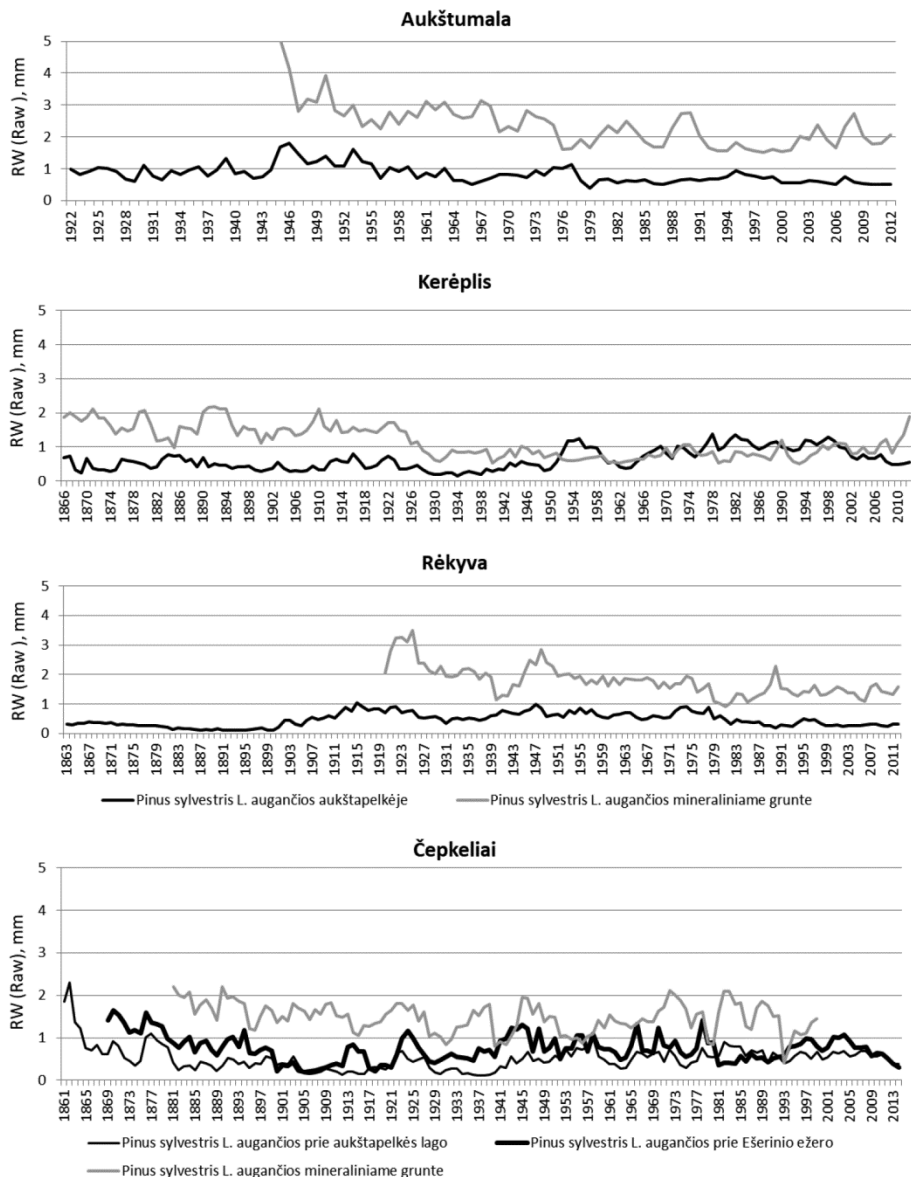
ir beveik nekinta iki paskutinio XX a. dešimtmečio (19 pav.). Tai gali būti sietina su pelkės pasausėjimu durpyno eksploatacijos laikotarpiu. Jau 1950 m. žemėlapiuose vakarinėje Kerėplio dalyje matomas drenažas (Topografinis žemėlapis..., 1950). Paskutiniais dešimtmečiais situacija keičiasi – durpėse augančių pušų prieaugis pradeda mažėti. Manoma, kad aukštapelkės pušų rivių pločio sumažėjimas paskutiniais dešimtmečiais galėjo būti nulemtas didėjančio kritulių kiekio ir atsistačiusio natūralaus augavietės vandens režimo.

Aukštumalos šlapynių komplekse vidutinis metinis aukštapelkėje augančių pušų prieaugis 1922–2012 metais buvo 0,8 mm. Tuo tarpu mineraliniame grunte šalia aukštapelkės augančios pušys (1945–2012 m.) vidutiniškai per metus suformuoja 2,4 mm pločio rievę. Koreliacija tarp mėginių imtų aukštapelkėje ir mineraliniame grunte stipri  $r = 0,65$  ( $p < 0,00001$ ), tačiau Stjudento  $t$  testas neparodė medžių augančių skirtinguose gruntuose prieaugio duomenų sekų panašumų tarp Raw chronologijos duomenų porų. Koreliacija tarp Res chronologijos duomenų silpna ( $r = 0,26$ ;  $p < 0,05$ ). Nustatyta, kad paskutinį trisdešimtmetį tiek aukštapelkėje, tiek mineraliniame grunte augantys medžiai formuoja siauresnes metines rieves: aukštapelkėje ~0,6 mm, mineraliniame grunte ~2 mm (19 pav.). Didesnį Aukštumalos pušų prieaugį, mūsų tyrimų vietoje (centrinė neeksploatuojama pelkės dalis), 1942–1980 m. galėjo lemti augavietės nusausinimas XX a. pradžioje. Vėliau po 1980 m., pagal GTC Klimato ir vandens tyrimų laboratorijos matavimus, atsistatė beveik natūralus augavietės vandens režimas. Aukštumalos durpių kasybos karjero įtakos zonoje augančių medžių prieaugio kitimas minimas ir R. Pakalnio bei kitų autorių (2007) studijoje.

Rėkyvos šlapynių komplekse vidutinis pušų rivių metinis prieaugis 1863–2012 m. buvo 0,5 mm. Šalia pelkės mineraliniame grunte augančių pušų 1920–2012 metais – 1,8 mm. Koreliacija tarp Raw chronologijos duomenų imčių stipri  $r = 0,52$  ( $p < 0,00001$ ), tačiau Stjudento  $t$  testas neparodė medžių augančių skirtinguose gruntuose prieaugio duomenų sekų panašumų tarp Raw chronologijos duomenų porų. Koreliacija tarp Res chronologijos duomenų nepatikima (5 lentelė). Labiausiai Rėkyvos pušų metinių rivių pločio kaitoje išsiskiria 1863–1900 metų laikotarpis, kai aukštapelkės pušys formavo tik apie 0,2 mm pločio rieves (19 pav.). Neatmestina galimybė, kad tam įtakos turėjo natūraliai aukštas pelkės vandens lygis. Maždaug XX a. pradžioje prasidėjo Rėkyvos ežero vandens lygio reguliavimo, apyežerio pelkės sausavimo darbai (Rėkyvos ežero būklės



įvertinimas ir jo aplinkos optimizavimo plano parengimas, 2008), kurie galėjo lemti metinio rievių pločio didėjimą po 1900-ųjų.



**19 pav.** Aukštapelkių durpėse ir šalia aukštapelkių mineraliniame grunte augančių pušų metinių rievių pločio kaita. Grafikuose pateikti Raw chronologijos duomenys (mm) kai medžių chronologinių sekų tais pačiais metais ne mažiau nei dešimt

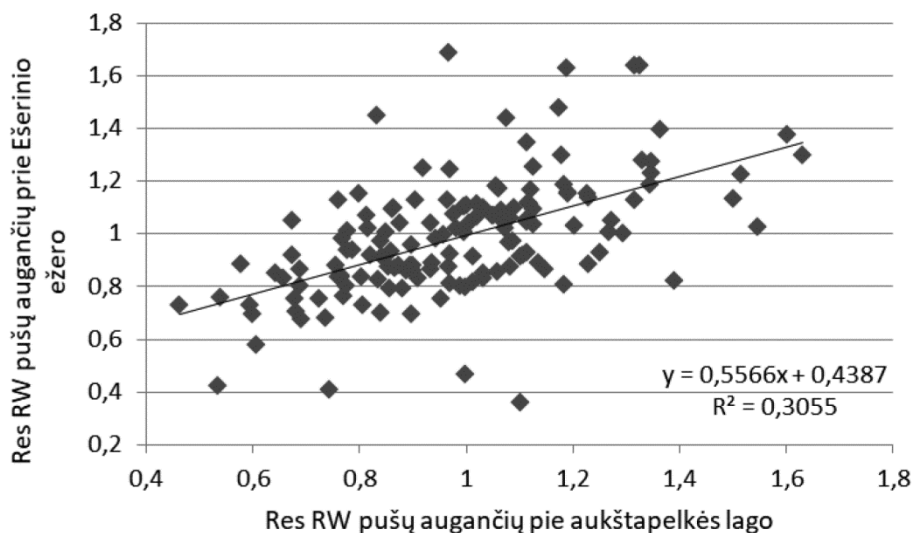
**5 lentelė.** Koreliacija tarp aukštapelkių durpėse ir šalia aukštapelkių mineraliniame grunte augančių pušų RW

Koreliuojamos poros	Laikotarpis, m.	Raw		Res	
		r	p	r	p
Aukštumos mineraliniame ir durpiniame grunte augančių pušų RW	1945–2012	0,656	<0,00001	0,261	<0,05
Kerėplio mineraliniame ir durpiniame grunte augančių pušų RW	1866–2012	-0,353	<0,00001	0,342	<0,0001
Rėkyvos mineraliniame ir durpiniame grunte augančių pušų RW	1920–2012	0,521	<0,00001	0,200	>0,05
Čepkelių mineraliniame ir durpiniame grunte augančių pušų RW	1881–1999	0,049	>0,05	0,299	<0,001
Čepkelių mineraliniame grunte ir prie aukštapelkės lago augančių pušų RW	1881–1999	0,090	>0,05	0,296	<0,001
Čepkelių mineraliniame grunte ir prie Ešerinio ežero augančių pušų RW	1881–1999	0,032	>0,05	0,227	<0,05
Čepkeliuose prie Ešerinio ežero ir prie aukštapelkės lago augančių pušų RW	1869–2014	0,518	<0,00001	0,553	<0,00001
Čepkelių ir Aukštumos durpiniame grunte augančių pušų RW	1922–2012	-0,127	>0,05	0,068	>0,05
Čepkelių ir Kerėplio durpiniame grunte augančių pušų RW	1922–2012	0,608	<0,00001	0,544	<0,00001
Čepkelių ir Rėkyvos durpiniame grunte augančių pušų RW	1922–2012	0,000	>0,05	0,243	<0,05
Aukštumos ir Kerėplio durpiniame grunte augančių pušų RW	1922–2012	-0,203	>0,05	0,228	<0,05
Aukštumos ir Rėkyvos durpiniame grunte augančių pušų RW	1922–2012	0,618	<0,00001	0,327	<0,01
Rėkyvos ir Kerėplio durpiniame grunte augančių pušų RW	1922–2012	-0,144	>0,05	0,361	<0,001
Čepkelių ir Aukštumos mineraliniame grunte augančių pušų RW	1945–1999	0,383	<0,01	0,502	<0,0001
Čepkelių ir Kerėplio mineraliniame grunte augančių pušų RW	1928–1999	0,572	<0,00001	0,659	<0,00001
Čepkelių ir Rėkyvos mineraliniame grunte augančių pušų RW	1928–1999	0,169	>0,05	0,439	<0,001
Aukštumos ir Kerėplio mineraliniame grunte augančių pušų RW	1945–2012	-0,051	>0,05	0,466	<0,0001
Aukštumos ir Rėkyvos mineraliniame grunte augančių pušų RW	1945–2012	0,727	<0,00001	0,545	<0,00001
Rėkyvos ir Kerėplio mineraliniame grunte augančių pušų RW	1928–2012	0,060	>0,05	0,611	<0,00001

\*Skaičiavimams naudojami duomenys kai medžių chronologijų sekų tais pačiais metais ne mažiau nei dešimt

Paskutinį trisdešimtmetį vėl fiksuojamas metinių rėvių pločio sumažėjimas (~0,3 mm). Tai gali būti sietina su nereguliuojamo slenksčio įrengimu dirbtinėje Rėkyvos ežero ištakoje. Įrengus šį slenksį didelės pelkės dalies vandens režimas tapo panašus į natūralų (Rėkyvos ežero būklės įvertinimas ir jo aplinkos optimizavimo plano parengimas, 2008).

Čepkeliuose 1880–2014 m. prie aukštapelkės lago (vakarinė pelkės dalis) augančių pušų vidutinis medžių priaugis buvo 0,5 mm. Augančių rytinėje pelkės dalyje prie Ešerinio ežero (vienoje aukščiausių pelkės vietų) – 0,7 mm. Šalia pelkės mineraliniame grunte augančios pušys vidutiniškai per metus užaugino 1,5 mm pločio rieves. Tiek vakarinėje, tiek rytinėje aukštapelkės dalyse pušų augimo tendencijos panašios (20 pav.). Koreliacija tarp mėginių imtų prie Ešerinio ežero ir vakarinėje aukštapelkės dalyje yra stipri, patikima ( $r = 0,55$ ;  $p < 0,00001$ ).



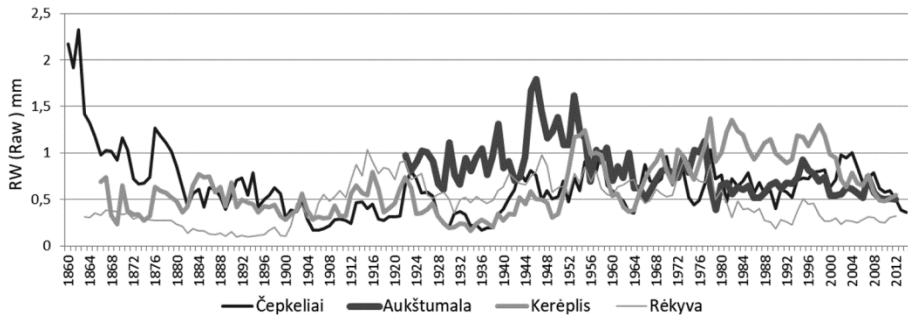
**20 pav.** Čepkelių aukštapelkėje prie Ešerinio ežero ir prie aukštapelkės lago augančių pušų Res chronologijų ryšio grafikas

Mineralinio grunto medžių metinių rėvių su aukštapelkės durpėse augančių medžių metinėmis rėvėmis koreliacija nepatikima (Raw) arba silpna (Res) (5 lentelė). Panašu, kad Čepkelių aukštapelkėje durpiniame grunte ir šalia aukštapelkės mineraliniame grunte augančių medžių augimo sąlygos labai skiriasi. Lyginant šalia Ešerinio ežero augančias pušis su augančiomis vakarinėje aukštapelkės dalyje, galima išskirti tris periodus, kai prie Ešerinio ežero augantys medžiai formavo neįprastai siauras rieves (čia buvo daug „iškrentančių“ rėvių): 1899–1909 metų laikotarpis; 1917–1922

metų laikotarpis; 1981–1991 metų laikotarpis. Tai galėjo nulėmti vietinės hidrologinės sąlygos. Pavyzdžiui, paskutinysis periodas buvo lietingas ir šiltas (kritulių kiekis ir temperatūra, pagal Varėnos MS duomenis, aukštesni už normą) – tai galėjo nulėmti aukštą Ešerinio ežero ir jo apyežerio vandens lygį. 1970–1990 m. laikotarpiu pelkės paviršius buvo labai suslūgęs (Taminskas et al., 2018) – tai taip pat galėjo padaryti įtaką neįprastai siauram metinių rėvių pločiui 1981–1991 m. Galbūt dėl to Ešerinio ežero vanduo vis labiau užliedavo jo apyežeryje augusias pušis. Ypač nepalankūs periodai medžių augimui abiejose aukštapelkės dalyse buvo 1905–1912 m. ir 1929–1939 m. Mažesnių rėvių formavimas matomas ir paskutinį dešimtmetį (19 pav.).

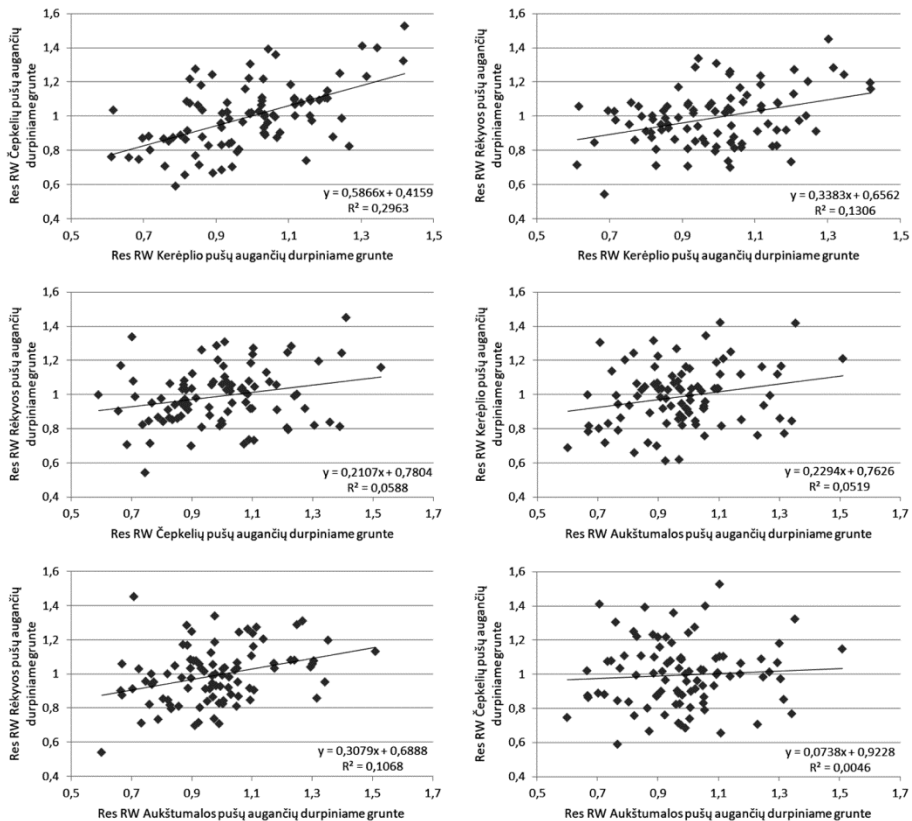
Daugeliu atvejų didžiausi patikimi koreliacijos koeficientai nustatyti tarp Raw medžių metinių rėvių chronologijų (5 lentelė), tačiau Stjudento *t* testas neparodė medžių prieaugio duomenų sekų panašumų tarp jokių Raw chronologijos duomenų porų. Vertinant Res chronologijų skirtingame grunte augančių pušų metinių rėvių pločio indeksus, aukščiausias patikimas koreliacijos koeficientas ( $r = 0,34$ ;  $p < 0,00001$ ), kaip ir buvo tikėtasi, nustatytas tarp Kerėplio aukštapelkėje ir šalia aukštapelkės mineraliniame grunte augančių pušų metinių rėvių (5 lentelė; 18 pav.). Šioje aukštapelkėje augančių pušų panašumas į mineraliniame dirvožemyje augančias pušis pastebėtas ir analizuojant dendrometrų duomenis, t. y. vertinant parinius kamienų apimties ciklus.

Tirtose aukštapelkėse augančių pušų rėvių pločio kovariacija, išskyrus aukščiau aptartus individualius atvejus, gana stipri (21 pav.). Įvertinus Stjudento *t* testo medžių prieaugio duomenų sekų panašumus skirtingose aukštapelkėse, nustatyti panašūs kamienų prieaugių kitimai tarp visų aukštapelkių duomenų porų (97–65 % panašumas tarp empirinių duomenų vidurkių). Tai parodo, kad pastaruosius 150 metų šiose aukštapelkėse augimo sąlygos, kurias, tikėtina, labiausiai lėmė pelkių hidrologinis režimas, galėjo būti panašios. Pavyzdžiui, santykinai sausos sąlygos, užregistruotos nuo XX a. 7-ojo dešimtmečio antros pusės, gali paaiškinti stiprų šio laikotarpio radialųjų medžių augimą visose tirtose aukštapelkėse. Per šį laikotarpį Estijos šlapynių kompleksuose taip pat buvo nustatytas didesnis metinis medžių prieaugis ir medžių išplitimas durpynuose (Smiljanić et al., 2014). 7-ame dešimtmetyje hidrologinės sąlygos Baltijos šalių aukštapelkėse interpretuojamos kaip sausos esant žemiems GWT (Charman et al., 2004; Smiljanić et al., 2014). Didžiausi metinių rėvių pločio pokyčiai, atspindintys hidrologinių sąlygų pasikeitimą, nustatyti 1942–1980 metais Aukštumaloje, 1952–2000 m. Kerėplyje, bei 1900–1980 m. Rėkyvoje (21 pav.).



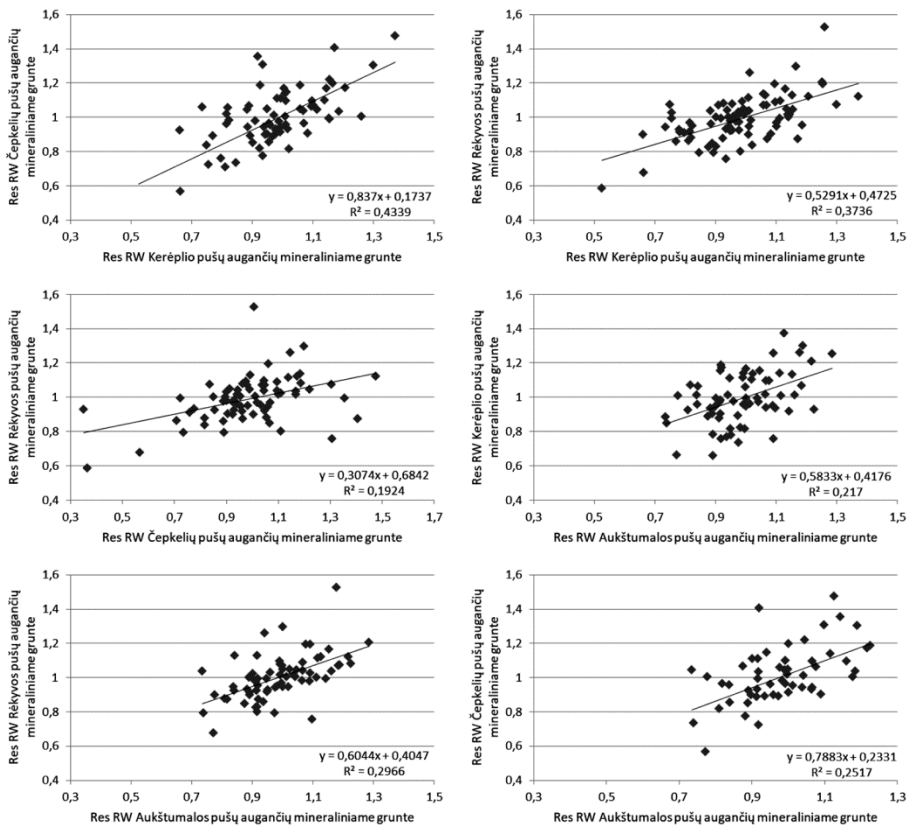
**21 pav.** Pušų metinių rėvių pločio kaita Aukštumalos, Kerėplio, Rėkyvos ir Čepkelių aukštapelkėse

Įvertinus koreliacijos koeficientus, ryšį tarp duomenų porų (5 lentelė; 22 pav.) ir Stjudento t testo medžių prieaugio duomenų sekų panašumus



**22 pav.** Res chronologijų ryšių grafikai tarp skirtingų 1922–2012 metų laikotarpiu aukštapelkėse augusių medžių rėvių duomenų sekų (Čepkeliai-Kerėplis; Rėkyva-Kerėplis; Rėkyva-Čepkeliai; Kerėplis-Aukštumala; Rėkyva-Aukštumala; Čepkeliai-Aukštumala)

skirtingose aukštapelkėse 1922–2012 metų laikotarpiu, nustatyti panašūs kamienų priaugių kitimai tarp šių porų: Čepkelių ir Kerėplio ( $r = 0,54$ ;  $p < 0,00001$ ); Rėkyvos ir Kerėplio ( $r = 0,36$ ;  $p < 0,001$ ); Rėkyvos ir Čepkelių ( $r = 0,24$ ;  $p < 0,05$ ). Mažesnis panašumas tarp duomenų sekų (60–70 % panašumas tarp empirinių duomenų vidurkių) ir (arba) mažesni koreliacijos koeficientai nustatyti tarp šių medžių priaugio skirtingose aukštapelkėse duomenų porų: Aukštumos ir Kerėplio ( $r = 0,23$ ;  $p < 0,05$ ); Aukštumos ir Rėkyvos ( $r = 0,33$ ;  $p < 0,01$ ). Statistiškai reikšmingo ryšio tarp Aukštumos ir Čepkelių aukštapelkių pušų metinių rėvių chronologijų nenustatyta (5 lentelė). Kur kas aukštesni koreliacijos koeficientai nustatyti tarp visų mineraliniame grunte augančių pušų metinių rėvių pločių indeksų (5 lentelė; 23 pav.).



**23 pav.** Res chronologijų ryšių grafikai tarp skirtingų mineraliniame grunte augusių medžių rėvių duomenų sekų (Čepkeliai-Kerėplis; Rėkyva-Kerėplis; Rėkyva-Čepkeliai; Kerėplis-Aukštumala; Rėkyva-Aukštumala; Čepkeliai-Aukštumala)

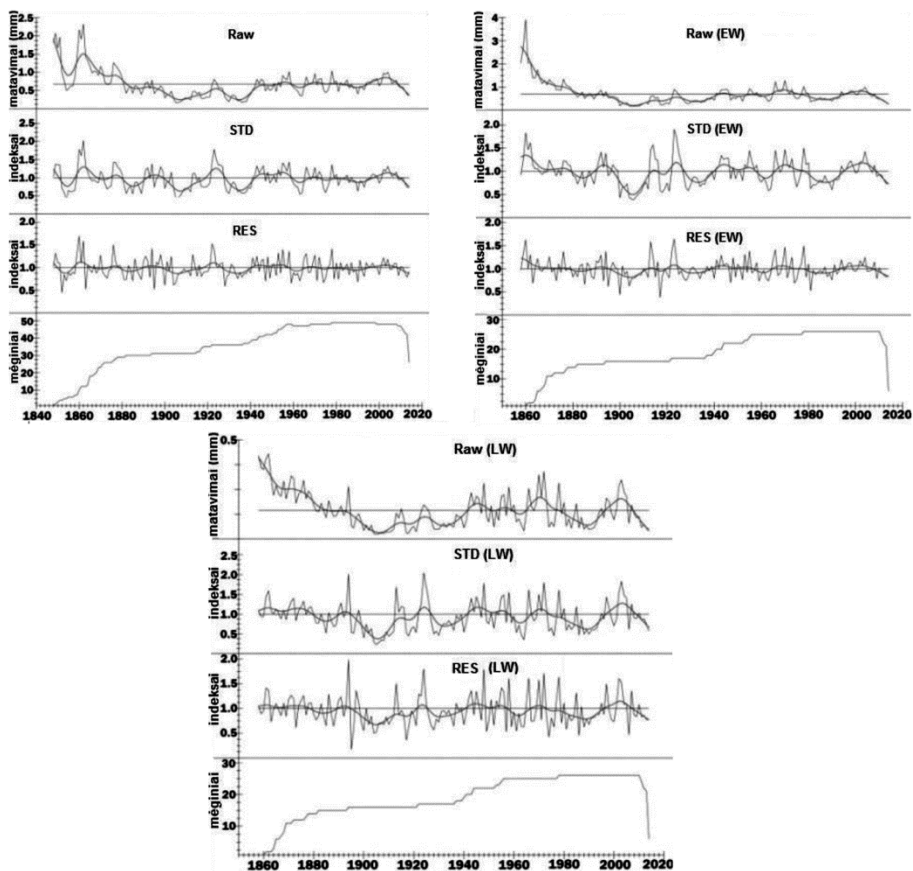
Remiantis meteorologinių stočių temperatūrų ir kritulių duomenimis, per paskutinįjį šimtmetį stebimas klimato pasikeitimas. Klimatas tampa vis šiltesnis ir sausesnis, ypač nuo 1950-ųjų. Paskutiniaisiais dešimtmečiais Vilniaus MS stebima teigiamos temperatūros tendencija. Tai labai gerai koreliuoja su medynų išplitimu Lietuvos aukštapelkėse ir, ypatingai, su intensyviu medynų išsigalėjimu Aukštumalos pelkėje nuo 1970 m. (Edvardsson et al., 2015a). Dabartinis pušų išsigalėjimas aukštapelkėse gali dar labiau paspartinti pušų išplitimą, per aeracijos ir pagreitėjusio durpių skaidymo procesus nulemdamas padidintą evapotranspiraciją ir pagerėjusias maistmedžiagių sąlygas pelkėse (Moir et al., 2010). Nors šiltėjantis ir sausėjantis klimatas daro įtaką pušų paplitimui aukštapelkėse, stiprus ryšys tarp aukštapelkių ekosistemų pokyčių ir specifinės ontogenezės nulemia silpną ryšį tarp medžių rėvių pločio ir meteorologinių veiksnių konkrečiais metais. Skirtingomis savybėmis pasižyminčiose aukštapelkėse augančios pušys į klimatinius pasikeitimus gali sureaguoti per skirtingą laiko tarpą. Medžių prieaugis aukštapelkėse priklauso nuo individualių aukštapelkės savybių: specifinės vietovės morfogenezės, gruntinio vandens lygio, durpių sluoksnio storio bei jo infiltracinių savybių, medžių šaknų sistemos išsivystymo ir kitų (Läänelaid, 1988; Linderholm et al., 2002; Edvardsson et al., 2016). Jei skirtingose Lietuvos vietose mineraliniuose gruntuose esančiose augavietėse medžių prieaugio reikšmės reikšmingai koreliavo tarpusavyje, tai pelkėse reikšmingi ryšiai tarp tyrimo vietų fiksuoti ne visais atvejais.

### 3.3 Meteorologinių sąlygų įtaka metiniam medžių prieaugiui

Tarp meteorologinių stočių, esančių arti tirtų aukštapelkių, ilgiausia stebėjimų seka yra Varėnos meteorologinėje stotyje. Todėl detalesniam meteorologinių sąlygų poveikio metiniam pušų prieaugiui nagrinėjimui pasirinkta Čepkelių aukštapelkė. Remiantis 4–7 formulėmis nustatyta, kad maždaug 69 % visų kritulių Čepkelių aukštapelkėje prarandama dėl evapotranspiracijos. Didžioji dalis (~82 %) kritulių evapotranspiracijos metu išgaruoja vegetacijos laikotarpiu, kuris prasideda gegužės mėnesį ir trunka iki rugsėjo pabaigos. Vidutinė metinė potenciali evapotranspiracija Čepkelių aukštapelkėje yra 469 mm.

Čepkeliuose buvo paimti 96-ių durpėje augančių medžių mėginiai. Pašalinus rėvių sekas, atsiradusias dėl asinchroninio augimo, sinchronizuoti 50-ies medžių mėginiai (24 pav.). Pašalintas mėginių skaičius (48 %) yra panašus į kitų autorių dendrochronologiniuose pelkėse augančių pušų

tyrimuose pašalintą mėginių skaičių (Linderholm et al., 2002; Dauskane et al., 2011; Moir, 2012). Daugiau kaip 5 medžių chronologijos buvo 162 metų (nuo 1853 iki 2014 m.). Raw, STD, RES chronologijų EPS reikšmės buvo didesnės už 0,85 kritinę patikimumo ribą. Iš 50 datuotų medžių 26-iems buvo išmatuota EW ir LW.



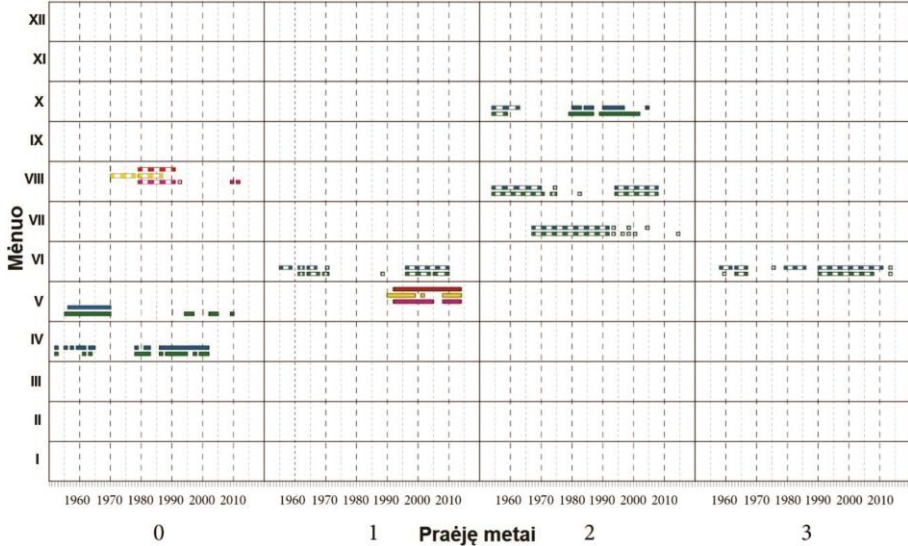
24 pav. Raw, STD ir RES metinio prieaugio bei ankstyvosios (EW) ir vėlyvosios (LW) medienos rievių pločio chronologijos

Lietuvoje atliktais tyrimais nustatyta, kad pušys teigiamai reaguoja į vidutines žiemos ir pavasario temperatūras (Karpavičius, Žeimavičius, 2004; Vitas, Erlickytė, 2008). Kuo šiltesnės žiemos ir pavasariai, tuo palankesnės sąlygos EW formavimuisi. Lenkijoje atlikti tyrimai taip pat parodė, kad paprastoji pušis pasižymėjo dideliu jautrumu žiemos ir pavasario temperatūroms (Linderholm et al., 2003). Skandinavijoje atliktos paprastosios pušies dendrochronologiniai tyrimai fiksuoja teigiamus medžių radialiojo



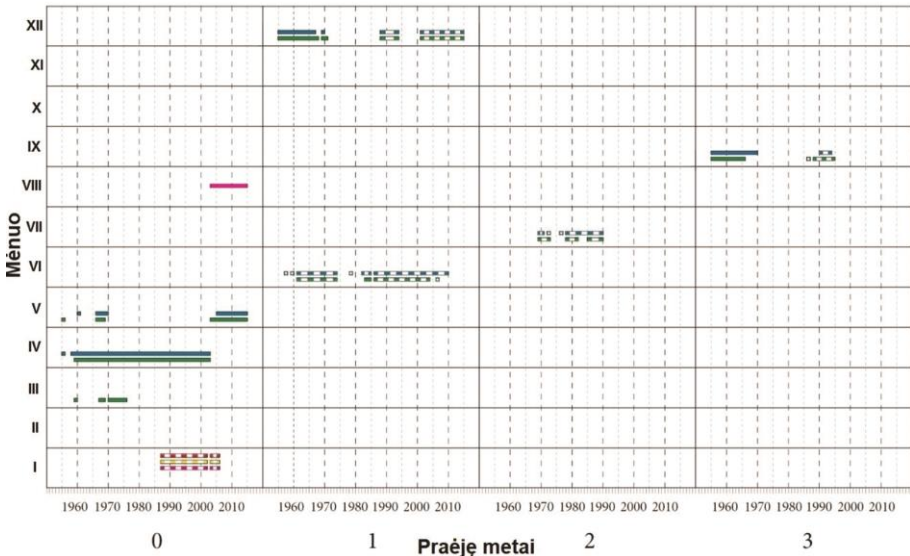


RES EW



26 pav. Patikimos koreliacijos reikšmės tarp Čepkelių aukštapelkės pušų RES EW RW ir tų pačių ar praėjusių metų aplinkos kintamųjų:  $T_{max}$  (raudona),  $T_{min}$  (geltona),  $T_{vid}$  (purpurinė),  $P$  (mėlyna) ir  $P-PET$  (žalia). Vienspalvis ir dryžuotas žymėjimas reiškia teigiamą ir neigiamą koreliaciją

RES LW



27 pav. Patikimos koreliacijos reikšmės tarp Čepkelių aukštapelkės pušų RES LW RW ir tų pačių ar praėjusių metų aplinkos kintamųjų:  $T_{max}$  (raudona),  $T_{min}$  (geltona),  $T_{vid}$  (purpurinė),  $P$  (mėlyna) ir  $P-PET$  (žalia). Vienspalvis ir dryžuotas žymėjimas reiškia teigiamą ir neigiamą koreliaciją

nuomone, skirtingą temperatūros įtaką metinių rievų pločiui galėjo lemti šių laikotarpių krituliai. 1970–1994 m. laikotarpiu vidutinis rugpjūčio mėnesio kritulių kiekis buvo beveik dvigubai mažesnis nei 2003–2014 m. Kitų mėnesių temperatūros įtaka aukštapelkės pušų augimui tiriamuoju laikotarpiu nebuvo reikšminga.

Čepkeliuose atlikti tyrimai parodė, kad aukštapelkės pušų metinėms rievėms teigiamą įtaką daro tų pačių metų balandžio ir gegužės P ir P-PET. Taip gali būti dėl to, jog jau nuo pavasario vidurio GWT krenta ir paviršine šaknų sistema pasižymintios pušys, po ilgai trukusio aukšto GWT laikotarpio, jautriau reaguoja į GWT pokyčius. Tai ypač pasireiškia besikeičiančio klimato sąlygomis, kada žiemos metu nebesusidaro didelės sniego atsargos. Iškritę pavasario krituliai pakelia GWT, kartu atnešdami papildomą maisto medžiagų kiekį. Geriausiai rezultatai matomi Res LW (27 pav.). Iki 2002 m. didžiausią poveikį metinių rievų susidarymui turi balandžio mėnesio P-PET, beveik dešimtmetį nuo 1967 iki 1976 metų didelės įtakos medžių formavimuisi turėjo ir kovo mėnuo, o štai 2003–2014 metų laikotarpiu P-PET įtaka rievėms daroma nebe balandį, o mėnesiu vėliau – gegužę. Panašu, kad to priežastis gali būti klimato kaita, kuri lemia šiltesnes žiemas ir padidėjusį kritulių kiekį šaltuoju metų laikotarpiu. Įdomu, kad 1967–1976 m. laikotarpis, kada medžių rievų formavimuisi didesnę įtaką turėjo ir kovo mėnesio P-PET, pasižymėjo žemu GWT pelkėje, tuo tarpu laikotarpis po 2003 metų pasižymėjo santykinai aukštu GWT (27 pav.). Kitų autorių tyrimais taip pat nustatyta, kad spygliuočių augimas teigiamai reaguoja į pavasario kritulius (Karpavičius, Žeimavičius, 2004; Bogino et al., 2009; Vaganov et al., 1999). Stipri gegužės mėnesio kritulių įtaka užfiksuota ir Abakano regione atliktuose tyrimuose. Čia didžiausia patikima įtaka metinėms rievėms pasireiškia gegužės ir birželio mėnesiais (Shah et al., 2015).

Neigiamą įtaką medienos formavimui daro praeitų metų birželio mėnesio P ir P-PET skirtingose metinių rievų chronologijose (darbe pateikiami tik RES) apimantis visą tyrimų laikotarpį. Prieš dvejus metus buvę vasaros mėnesių P ir P-PET taip pat daro neigiamą įtaką rievų formavimuisi. Prieš trejus metus vasaros mėnesių P ir P-PET taip pat neigiamai veikia medienos formavimąsi, tik čia rugpjūčio P ir P-PET pakeičia rugsėjo P ir P-PET. Taigi, rievės formavimuisi vasaros mėnesių krituliai turėjo neigiamą įtaką, kuri paprastai pasireiškė ateinančiais metais ir atsiliepė medžio formavimuisi sekancius trejus metus. Vertinant tų pačių metų kritulių įtaką valandiniams RSCH, buvo nustatytas teigiamas kritulių poveikis medžio kamieno apimties plėtimuisi (detaliau žr. 3.1.3. *Radialiujų kamienų pokyčių paros ciklai ir jų*

*priklausomybė nuo hidrometeorologinių sąlygų*). Tai tiesioginis kritulių poveikis dėl kamieno išbrinkimo jam sušlapus. Vertinant ilgalaikį kritulių poveikį medžių metinėms rievėms, reikėtų atsižvelgti į tai, kad krituliai daro įtaką gruntinio vandens lygio kilimui ir taip netiesiogiai, per gruntinio vandens lygį, aukšto gruntinio vandens lygio augavietėse kuria nepalankias sąlygas medžių augimui. Kritulių įtaka, priklausomai nuo aukštapelkės individualių savybių, gruntinio vandens lygiui gali pasireikšti po kelių ar net keliolikos metų, o gruntinio vandens lygio įtaka medžio metinei rievei taip pat gali vėluoti (detaliau žr. 3.4.2. *Metinių medžių rivių priklausomybė nuo gruntinio vandens lygio*).

Išskirtinai, tiek teigiamai, tiek neigiamai, metinių pušų priaugį skirtingais laikotarpiais lėmė trejų metų prieš rugsėjo mėnesio, dviejų metų prieš spalio mėnesio ir praeitų metų gruodžio mėnesio P ir P-PET (25–27 pav.; 6 lentelė). Tokia skirtinga kritulių įtaka metinėms rievėms galėjo būti dėl pasikeitusio GWT tam tikrais metų periodais.

**6 lentelė.** *Laikotarpiai su skirtinga RW priklausomybe nuo P ir P-PET, vidutinio metinio GWT tendencija ir jų patikimumas*

Periodas	Praėję metai ir mėnuo (kai P ir P-PET turėjo įtaką RW)	P ir P-PET koreliacijos su RW ženklas	GWT tendencija	Koreliacijos koeficientai ir patikimumas
1955–1970	1, gruodis	+	-	r= 0,695; p< 0,001
1989–2013	1, gruodis	-	+	r= 0,611; p< 0,001
1954–1960	2, spalio	-	+	r= 0,874; p< 0,01
1980–2000	2, spalio	+	-	r= 0,753; p< 0,00001
1955–1969	3, rugsėjis	+	-	r= 0,658; p< 0,001
1970–2003	3, rugsėjis	-	+	r= 0,372; p< 0,01

Dažnai mokslininkai nesutaria dėl kritulių poveikio metinėms rievėms. Skirtingose augavietėse tos pačios rūšies medžiai skirtingai (neigiamai arba teigiamai) reaguoja į kritulių poveikį (Karpavičius, Žeimavičius, 2004). Frittsas 1976 metais savo darbe teigia, kad drėgnose augavietėse augančių pušų reakcija į kritulius, ypač į vasaros kritulius, yra neigiama (Fritts, 1976). Tačiau kitų autorių išvados priešingos – kritulių poveikis drėgnose

augavietėse augančių pušų radialiajam prieaugiui yra teigiamas, nors paprastai yra statistiškai nepatikimas (Linderholm, 2001). Tokį reiškinį galima paaiškinti hidrologinių sąlygų augavietėse skirtumu. Esant aukštam GWT, papildomas kritulių kiekis stabdo aukštapelkėse augančių pušų metinių rėvių prieaugį. Tuo tarpu esant žemesniam GWT, papildomas kritulių kiekis veikia atvirkščiai. 6 lentelėje pateiktas laikotarpių su skirtinga P ir P-PET priklausomybe metinėms medžių rėvėms GWT tendencija. P ir P-PET, priklausomai nuo GWT mažėjimo ar didėjimo tendencijos, atitinkamai teigiamai arba neigiamai paveikia metinės rėvės formavimąsi. 1980–2000 m., kai P ir P-PET įtaka metinei rėvei buvo teigiama, neigiamas GWT tendencijos patikimumas buvo didžiausias iš visų tirtų periodų ( $p < 0,00001$ ). Sausas 1980–2000 metų laikotarpis minimas ir kituose šaltiniuose (Taminskas et al., 2007).

### 3.4 Aukštapelkės gruntinio vandens lygio svyravimų rekonstrukcija naudojant kelis metodus

Siekiant pratęsti gruntinio vandens lygio svyravimų seriją, buvo taikoma dviejų etapų modeliavimo procedūra: i) GWT instrumentinių matavimų serijų pratęsimas 1935–2014 m. laikotarpiui, pagrįstas P-PET; (ii) GWT svyravimų rekonstrukcija 1870–2014 m. laikotarpiui, remiantis paprastosios pušies RW serijomis. Tyrimo metu naudojant hidrologinius ir dendrochronologinius tyrimų metodus buvo aiškinamasi klimato ir vandens režimo kaita aukštapelkėse bei jų aplinkoje, įvertinama hidrometeorologinių sąlygų įtaka medžių augimui.

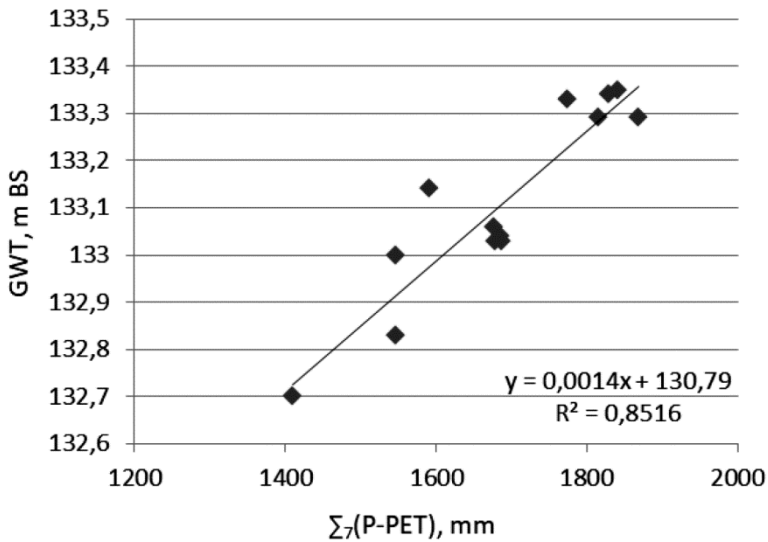
#### 3.4.1 Gruntinio vandens lygio rekonstrukcija pagal kritulių kiekio ir potencialios evapotranspiracijos skirtumą

Darbe siekta nustatyti, kelerių metų P-PET sumos geriausiai koreliuoja su vandens lygiu skirtinguose Čepkelių aukštapelkės grėžiniuose (7 lentelė). Didžiausia patikima koreliacijos reikšmė ( $r = 0,92$ ;  $p < 0,00001$ ) nustatyta tarp vidutinio metinio GWT 4-A grėžinyje, esančio netoli pelkės lago, ir septynerių metų P-PET sumos. GWT instrumentinių matavimų ir septynerių metų P-PET sumų ryšio grafikas pateiktas 28 paveiksle.

Modeliuojamo gruntinio vandens lygio (MGWT) tiesinė priklausomybė išreikšta lygtimi:

$$MGWT = 0,0014 \sum_{i=1}^7 (P - PET) + 130,79 \quad (8)$$

Ši lygtis buvo naudojama siekiant rekonstruoti gruntinio vandens lygio svyravimų seriją prie pelkės lago (4-A gręžinys) laikotarpiu kai matavimų *in situ* nebuvo. Pagal šią lygtį rekonstruotas 1935–2002 metų GWT laikotarpis. Remiantis atliktomis rekonstrukcijomis, gruntinio vandens lygis svyravo nuo 133,3 m BS iki 132,1 m BS. Tai reiškia, kad drėgnuoju laikotarpiu gruntinio vandens lygis prie aukštapelkės lago buvo 20 cm aukščiau durpės paviršiaus, t. y. 4-A gręžinio aplinka buvo užtvindyta. Labai sausais metais gruntinio vandens lygis 4-A gręžinyje nukrisdavo 100 cm žemiau durpės paviršiaus.



**28 pav.** GWT instrumentinių matavimų (4-A gręžinys) ir septynerių metų P-PET sumų ( $\Sigma_7$ ) Čepkelių aukštapelkėje (2002–2014 m.) ryšio grafikas

Tyrimai parodė, kad P-PET ryšiai su GWT priklauso nuo vietos, kurioje GWT buvo matuotas. Didžiausias patikimas koreliacijos su metiniu GWT koeficientas buvo nustatytas arčiausiai aukštapelkės lago esančiame gręžinyje. Tai gali būti dėl to, kad lago vandens išteklių labiau atspindi drėgmės sąlygas visoje pelkėje, o kitose pelkės dalyse GWT daugiau priklausomi nuo pelkės mikroreljefo.

**7 lentelė.** Koreliacijos reikšmės tarp GWT Čepkelių aukštapelkės gręžiniuose (4-G, 4-A, 5-A, 6-A, 3-A) ir P-PET metinių sumų (2002–2014 m.). Analizuotos P-PET sumos nuo vienerių iki dešimties metų

	$\sum (P - PET)$	$\sum_{i=1}^2 (P - PET)$	$\sum_{i=1}^3 (P - PET)$	$\sum_{i=1}^4 (P - PET)$	$\sum_{i=1}^5 (P - PET)$
<b>4-A</b>	0,14	0,25	0,56	0,78*	0,76*
<b>4-G</b>	0,12	0,19	0,51	0,72*	0,68
<b>5-A</b>	0,17	0,29	0,54	0,74*	0,63
<b>6-A</b>	0,22	0,32	0,53	0,70*	0,50
<b>3-A</b>	0,19	0,27	0,48	0,71*	0,58
	$\sum_{i=1}^6 (P - PET)$	$\sum_{i=1}^7 (P - PET)$	$\sum_{i=1}^8 (P - PET)$	$\sum_{i=1}^9 (P - PET)$	$\sum_{i=1}^{10} (P - PET)$
<b>4-A</b>	0,73*	0,92****	0,90***	0,87**	0,86**
<b>4-G</b>	0,61	0,82**	0,82**	0,76*	0,74*
<b>5-A</b>	0,69*	0,88***	0,83**	0,79*	0,78*
<b>6-A</b>	0,58	0,79*	0,76*	0,68*	0,60
<b>3-A</b>	0,64	0,84**	0,80**	0,75*	0,68

Patikimos koreliacijų reikšmės pažymėtos atitinkamai:

\* ( $p \leq 0.01$ );

\*\* ( $p \leq 0.001$ );

\*\*\* ( $p \leq 0.0001$ );

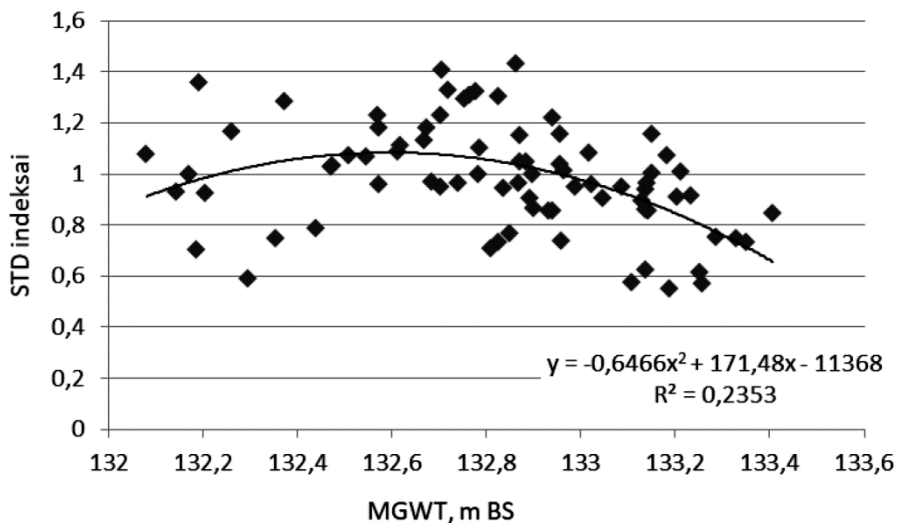
\*\*\*\* ( $p \leq 0.00001$ ).

Mažiausi koreliacijos koeficientai tarp vidutinio metinio GWT ir septynerių metų P-PET sumų buvo nustatyti toliausiai nuo pelkės pakraščio šlaite esančiame 6-A gręžinyje. Einant toliau į pelkę (3-A gręžinys), mažėja nuolydis ir vandens apykaitos greitis, matyt, dėl to šio gręžinio GWT geriau atspindi metinį P-PET kiekį. Čia koreliacijos koeficientas tarp aukščiau minėtų kintamųjų vėl padidėja. Mažesni koreliacijos koeficientai ir tarp metinio GWT, išmatuoto pelkės pakraštyje smėlio kopoje esančiame 4-G gręžinyje, ir P-PET (7 lentelė).

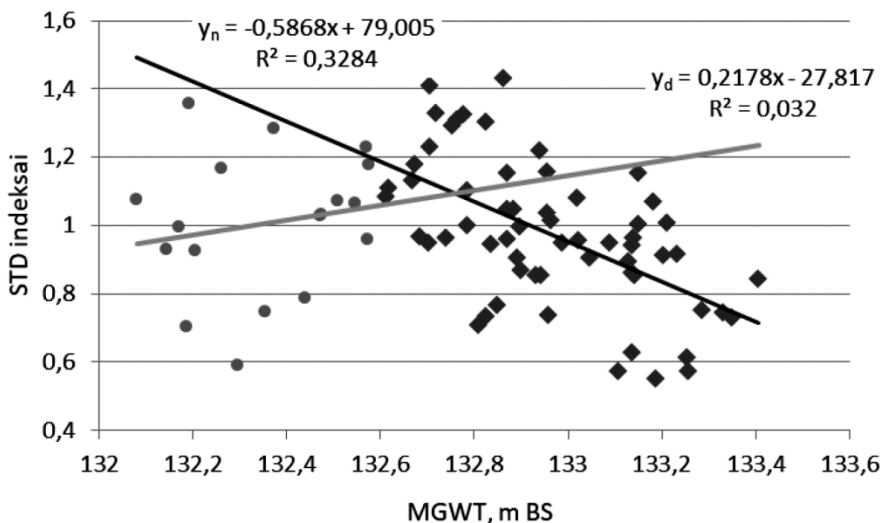
### 3.4.2 Metinių medžių rėvių priklausomybė nuo gruntinio vandens lygio

Analizuojant ryšius tarp modeliuojamo gruntinio vandens lygio, apskaičiuoto pagal septynerių metų P-PET sumas (MGWT), ir metinių medžių rėvių pločio (STD chronologijos indeksu) buvo gauta netiesinė priklausomybė (29 pav.). Grafike matyti du intervalai, pagal kuriuos MGWT kintamieji suskirstyti į esančius žemiau už 132,6 m BS (50 cm žemiau pelkės

paviršiaus) ir esančius aukščiau. Tai riba charakterizuojanti skirtingas metinių medžių rėvių pločio ir MGWT priklausomybes (30 pav.).



**29 pav.** Čepkelių aukštapelkėje augančių pušų metinių rėvių pločio (su dviejų metų poslinkiu) ir vidutinio metinio MGWT (4-A grėžinys) ryšio grafikas. 1935–2014 metų laikotarpis.



**30 pav.** Tiesinė metinių medžių rėvių pločio priklausomybė nuo vidutinio metinio MGWT skirtinguose intervaluose pagal MGWT svyravimus. Juoda spalva žymi neigiamą RW priklausomybę, kai MGWT aukščiau už 132,6 m BS ( $y_n$ ), pilka – teigiamą priklausomybę ekstremaliai sausais metais ( $y_d$ )



Neigiama tiesinė priklausomybė (30 pav.) nustatyta tarp metinių medžių rievėlių pločio ir MGWT, kai gruntinio vandens lygis yra ne žemiau kaip 50 cm gylyje nuo pelkės paviršiaus, o gruntinio vandens lygiui nukritus žemiau šio lygio, patikimos tiesinės priklausomybės nėra.

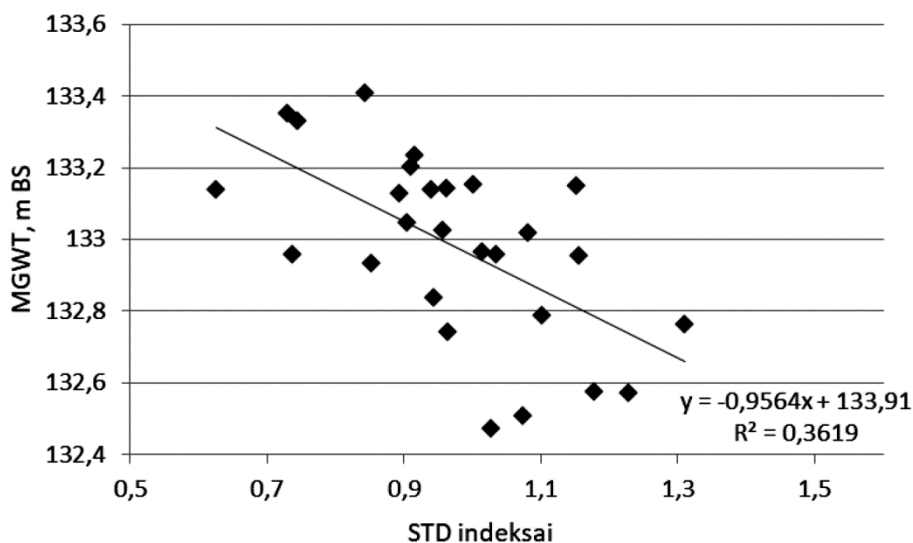
Didžiausias patikimas koreliacijos koeficientas ( $r = -0,604$ ,  $p < 0,00001$ ) nustatytas tarp MGWT ir STD chronologijos indeksų su dviejų metų poslinkiu, kai MGWT aukščiau už 132,6 m BS. Nustatytas uždelstas GWT kitimo poveikis metinėms medžių rievėms parodo, kad GWT įtaka metinėms aukštapelkių pušų rievėms gali pasireikšti po 2 metų (8 lentelė). 8 lentelėje pateikti duomenys apskaičiuoti neįtraukiant 1965–1985 m. periodo, kai MGWT nukrenta žemiau 132,6 m BS.

**8 lentelė.** Koreliacijos koeficientai tarp MGWT ir RW atsižvelgiant į metų poslinkį pagal RW

Metų poslinkis pagal RW	r	p
0	-0,227	> 0,05
-1	-0,417	< 0,001
-2	-0,604	< 0,00001
-3	-0,573	< 0,00001
-4	-0,457	< 0,001
-5	-0,318	< 0,05

### 3.4.3 Gruntinio vandens lygio rekonstrukcija pagal metines medžių rieves

Stipri tiesinė priklausomybė buvo nustatyta tarp MGWT ir STD chronologijos, išskyrus labai sausą periodą (vandens lygis žemiau 132,6 m BS), kuris buvo nuo 1965 iki 1985 m. Naudojant segmentuotą regresinę analizę sukurtas tiesinės regresijos modelis, o sudaryto modelio patikimumo įvertinimui naudoti kalibracijos (1986–2012 m.) ir patikros (1935–1964 m.) laikotarpiai (pagal Gordon, 1982). Kalibruojamo periodo laikotarpiu nustatytas ryšys tarp MGWT ir STD chronologijos indeksų (31 pav.). Kalibruojamo periodo koreliacijos tarp MGWT ir STD chronologijos indeksų koeficientas su dviejų metų poslinkiu yra  $r = -0,602$ ,  $p < 0,001$ .



**31 pav.** MGWT (4-A gręžinys) ir STD chronologijos indeksų Čepkelių aukštapelkėje (1986–2012 m.) ryšio grafikas

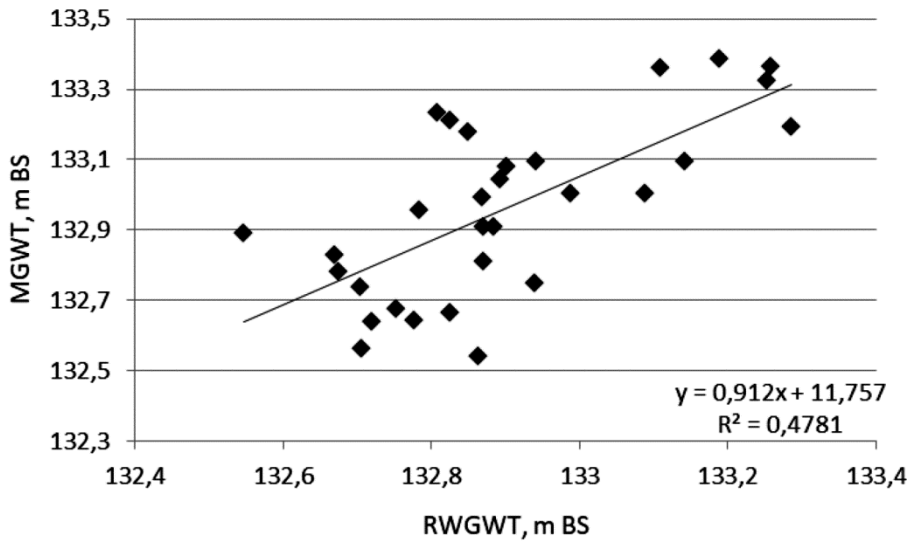
Pagal nustatytą ryšį sukurta tiesinės regresijos lygtis:

$$RWGWT_t = -0,9564STD_{t+2} + 133,91; \quad (9)$$

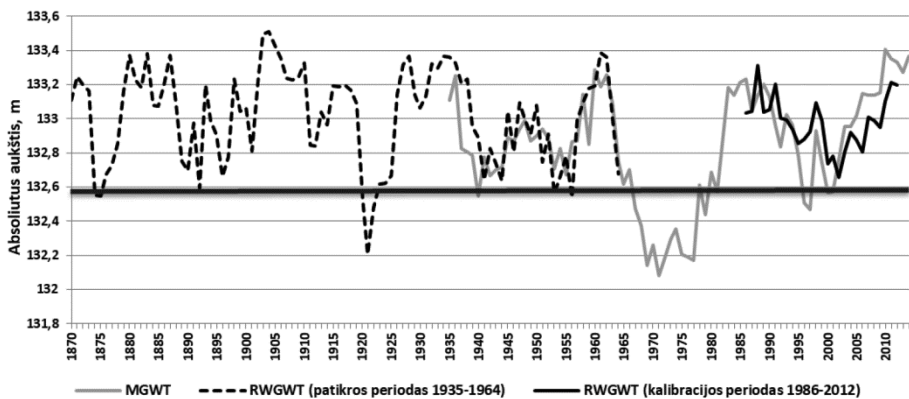
čia  $RWGWT_t$  yra rekonstruotas GWT pagal RW (STD chronologija) tam tikrais metais ( $t$ );  $STD_{t+2}$  yra metinių rievų pločio STD indeksas po dvejų metų ( $t+2$ ).

Pagal šią lygtį buvo rekonstruotas gruntinio vandens lygis 1935–1964 metų laikotarpiui ir atlikta šio laikotarpio patikra. Patikros laikotarpio koreliacijos koeficientas tarp modeliuojamo gruntinio vandens lygio, apskaičiuoto pagal septynerių metų P-PET sumas (MGWT), ir pagal medžių metines rieves rekonstruoto gruntinio vandens lygio (RWGWT) 4-A gręžinyje 1935–1964 metų laikotarpiu yra 0,691 ( $p < 0,0001$ ). Patikros laikotarpio MGWT ir RWGWT ryšio grafikas pateiktas 32 paveiksle.

Atlikus modelio patikrą ir nustačius patikimą koreliacijos koeficientą patikros laikotarpiu, gruntinio vandens lygis, pagal sukurta tiesinės regresijos lygtį ( $RWGWT_t = -0,9564 STD_{t+2} + 133,91$ ), rekonstruotas 1870–1935 metų laikotarpiui (33 pav.).



32 pav. MGWT ir RWGWT (4-A gręžinys) Čepkelių aukštapelkėje (1935–1964 m.) ryšio grafikas



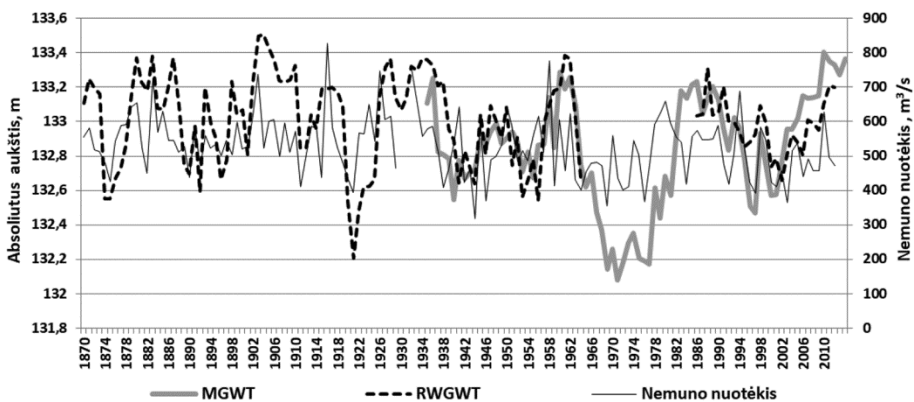
33 pav. Vidutinis metinis gruntinio vandens lygis Čepkelių aukštapelkėje 4-A gręžinyje MGWT (pilka kreivė) ir pratęsta gruntinio vandens lygio rekonstrukcija RWGWT (punktyrinė kreivė). Juoda kreivė paveiksle pavaizduotas RWGWT kalibruojamu laikotarpiu. Juoda tiesė žymi GWT ribą, iki kurios tarp GWT ir RW nustatytas ryšys

Rekonstruotas Čepkelių pelkės GWT 1935–2014 metų laikotarpiu atitinka iš literatūros šaltinių žinomas sausus ir šlapius metus bei sausus ar šlapius kelių metų laikotarpius. Žinoma, kad Čepkelių rezervate 1974–1977 m. laikotarpiu apie 3 m gylio Lygučio ežerėlis, esantis prie Lynežerio kaimo, kasmet išdžiūdavo. Tuo laikotarpiu taip pat buvo išdžiūvę žemiau šio

ežerėlio esantys žemapelkių „liežuviai“. Nuo 1978 m. prasidėjo ryškus vandeningas laikotarpis, vėl prisipildė Lygučio ežeras ir žemiau esančios žemapelkės, atsinaujino nuotėkis iš Žaliojo ežero (Balevičius ir kt., 1984).

Remiantis rekonstrukcijomis 1870–1873 m., 1879–1888 m., 1902–1910 m., 1915–1919 m., 1926–1939 m., 1947–1950 m., 1957–1963 m., 1983–1990 m. laikotarpiams ir laikotarpiui nuo 2005 m., nustatyti aukšto gruntinio vandens lygiai ( $\geq 133,0$  m BS, arba iki 0,1 m žemiau durpės paviršiaus). Žemi gruntinio vandens lygiai ( $\leq 132,8$  m BS, arba žemiau kaip 0,3 m nuo durpės paviršiaus) nustatyti 1874–1878 m., 1889–1897 m., 1920–1926 m., 1940–1946 m., 1952–1956 m. ir 1995–2003 m. Reikėtų atkreipti dėmesį į tai, kad remiantis aukštapelkėje augančių pušų rivių serijomis, negalima nustatyti gruntinio vandens lygio, kai šis nukrenta žemiau kaip 132,6 m BS, arba 0,5 m žemiau durpės paviršiaus. Norint ekstremaliai sausais metais rekonstruoti GWT pagal RW svarbu naudoti papildomą indikatorių, kuris padėtų nustatyti ekstremaliai sausus (kai GWT nukrenta žemiau 50 cm nuo pelkės paviršiaus) apie 10 metų trukusius periodus. Šiais laikotarpiais RW metodo naudojimas GWT rekonstrukcijai gali būti netinkamas.

Norint patikrinti Čepkelių aukštapelkės gruntinio vandens hidrologines rekonstrukcijas, rekonstruotas aukštapelkės GWT buvo palygintas su vidutiniais metiniais nuotėkio duomenimis Smalininkų vandens matavimo stotyje (34 pav.).



**34 pav.** Vidutinis metinis MGWT 4-A grėžinyje (pilka kreivė), pratęsta GWT rekonstrukcija pagal RWGWT (punktyrinė kreivė) ir Nemuno nuotėkis (juoda kreivė)

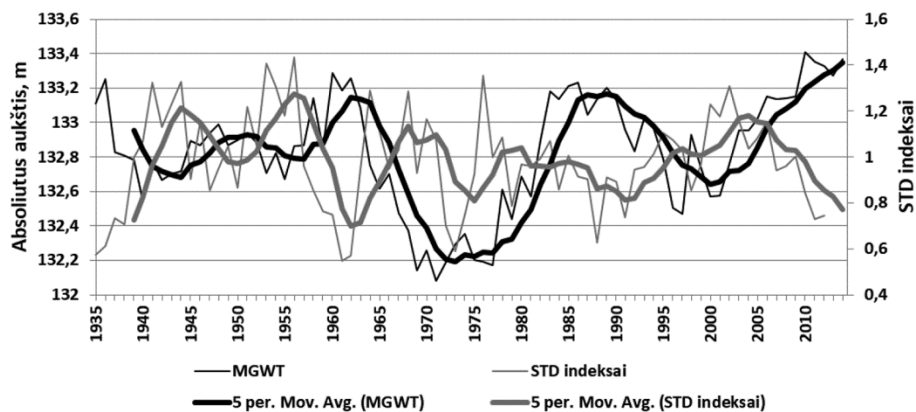
Rekonstruoti ilgalaikiai GWT Čepkelių aukštapelkėje patikimai koreliuoja su Nemuno upės nuotėkiu ( $r = 0,39$ ,  $p < 0,00001$ , 1870–2014 m.). Rekonstruotas GWT pagal Čepkelių aukštapelkės pušų metines rieves atitinka bendrą hidrologinę būklę Nemuno baseine. Ši darba rodo, kad aukštapelkės pušų metinės rievės yra tinkamas indikatorius GWT nustatyti, o išskirtinai sausi ilgi laikotarpiai, kai priklausomybė tarp RW ir GWT išnyksta, gali būti traktuojami labiau kaip išimtiniai atvejai.

### 3.5 Gruntinio vandens lygio įtaka metiniam pušų prieaugiui

Medžių augimas aukštapelkėse labiausiai priklauso nuo gruntinio vandens lygio svyravimų, kurie savo ruožtu labiausiai priklauso nuo kritulių ir temperatūros, lemiančios garavimo ir transpiracijos intensyvumą. Klimato įtaka vandens lygiui gali pasireikšti ne iš karto, o po kelių ar keliolikos metų (Kilian et al., 1995; Linderholm et al., 2002; Edvardsson, Hansson, 2015). Vėluojantis klimato veiksnių pasireiškimas GWT gali lemti vėluojantį hidrometeorologinių veiksnių atsaką aukštapelkės medžių augimui (Vaganov, Kachaev, 1992). Kaip rodo šio darbo rezultatai, stipriausi ryšiai buvo nustatyti tarp metinio gruntinio vandens lygio, rekonstruoto pagal septynerių metų P-PET sumas, ir STD chronologijos. Rekonstruoto gruntinio vandens lygio ir STD chronologijos indeksų tendencijos sinchronizuojasi, kai STD chronologijos kreivė yra perstumta, atsižvelgiant į rekonstruotą gruntinį vandens lygį, dvejus metus atgal (35 pav.). Tai parodo uždelsimą tarp kritulių ir vandens atsargų aukštapelkėje, kurie matomi aukštapelkių pušų metinėse rievėse. Panašų GWT įtakos pasireiškimo vėlavimą nustatė Linderholmas ir kt. (2002), Edvardssonas ir kt. (2015b), Läänelaidas ir kt. (2014) bei Edvardssonas ir Hanssonas (2015).

Vėlavimą gali lemti keleto procesų kombinacija su skirtinga medžio reakcijos atsako trukme, pavyzdžiui, laipsniškas šaknų formavimosi slopinimas ar irimas vandens prisotintoje aplinkoje, arba maistinių medžiagų prieinamumas durpiniame grunte, labai priklausantis nuo mikrobu aktyvumo ar mikorizės grybų veiklos (Kozłowski, 1997; Pallardy, 2008), kurių kiekvienas priklauso nuo GWT svyravimų (Dimitrov et al., 2010). Fiziologinis aukštapelkėse augančių pušų prisitaikymas prie aukšto gruntinio vandens lygio ir maisto medžiagų trūkumo, pavyzdžiui, angliavandenių saugojimo sistema, taip pat gali daryti įtaką lėtesnei reakcijai į aplinkos pokyčius (Kozłowski, 1997). Kitų autorių studijose nustatyta, kad dalį maisto medžiagų (daugiausiai azotą) medžiai kaupia tam tikruose „sandėliuose“, kad galėtų panaudoti jas naujų audinių statybai sekančiais

metais (nustatyta, kad nuo 40 % iki 50 % azoto paimama iš senų augalo audinių (Sleiny, 1973)), bet eksperimentų su aukštapelkių pušimis vis dar trūksta (Edvardson et al., 2014). Kaip maistmedžiagių pasiskirstymas ir srautai veikia augalo-grunto sistemoje aplinkos streso sąlygomis, mokslinių tyrimų reikalaujantis klausimas, kurį vis dar reikia spręsti.



**35 pav.** Vidutinis metinis MGWT (4-A gręžinys) ir metinių medžių rėvių pločio STD indeksai. RW kreivė paslinkta atgal per dvejus metus

Nustatyta, kad medžių augimui palankios aplinkos sąlygos susidaro gruntinio vandens lygiui krentant iki tam tikros ribos, ir atvirkščiai, nepalankios sąlygos susidaro gruntinio vandens lygiui kylant (36 pav.). Kitaip tariant, aukštapelkės pušų metinių rėvių siaurėjimo laikotarpiai atitinka aukšto gruntinio vandens lygio laikotarpius (kai RW kreivė yra paslinkta per dvejus metus atgal): 1935–1939 m., 1945–1950 m., 1958–1963 m., 1983–1994 m. ir nuo 2004 m. Priešingai, aukštapelkės pušų metinių rėvių plėtėjimo laikotarpiai atitinka žemo gruntinio vandens lygio laikotarpius: 1939–1945 m., 1953–1956 m. ir 1995–2003 m. Per šiuos laikotarpius sąlyginai sausos sąlygos nulėmė spartesnę medžių augimą. Vienintelė išimtis yra 1965–1985 m. laikotarpis, kai gruntinio vandens lygis nukrenta žemiau 132,6 m BS. Šiuo laikotarpiu aukštapelkės pušų metinių rėvių plėtėjimas nestebimas.

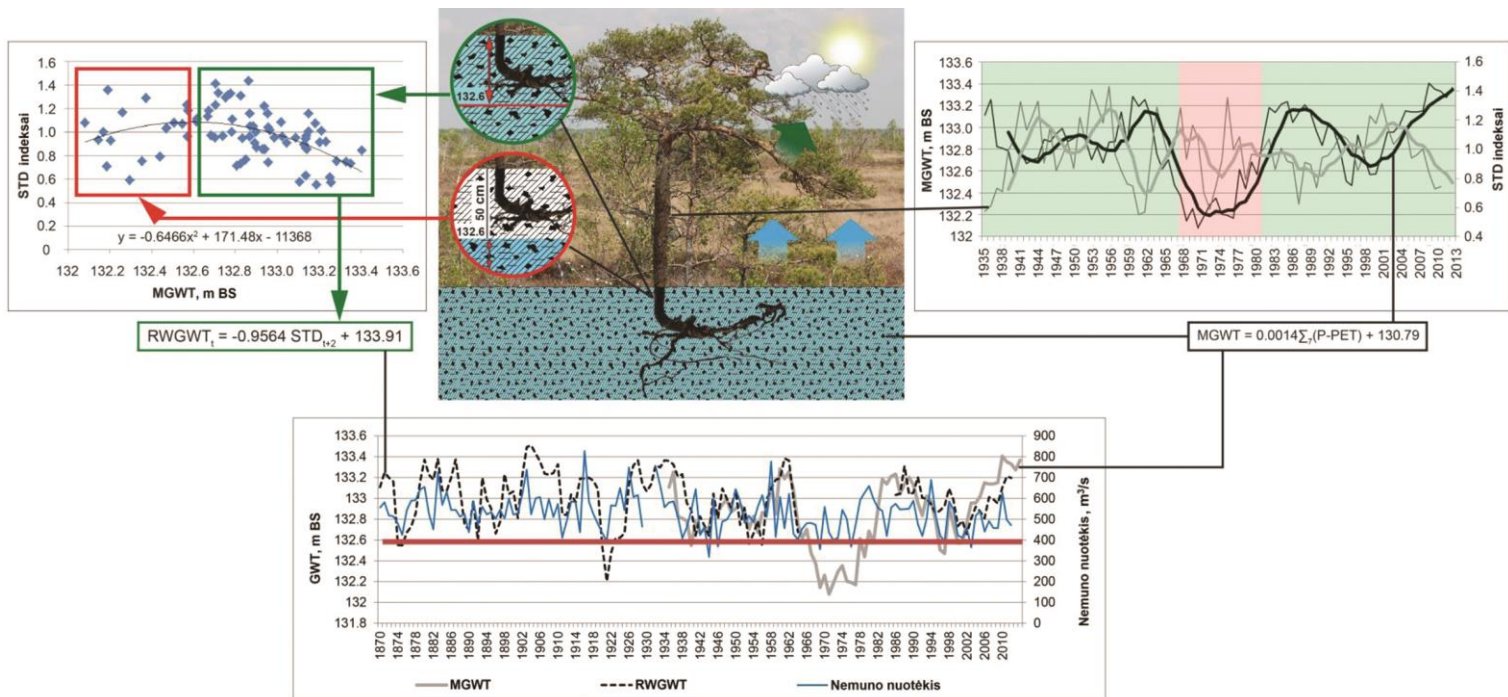
Netiesinis silpnas teigiamas ryšys nustatytas tarp metinių medžių rėvių ir GWT 1965–1985 metais, kai GWT Čepkelių pelkėje nukrisdavo žemiau 132,6 m. 1978 metais GWT pradėjo kilti, tačiau ilgai trukusio sauso periodo įtaka metinėms rėvėms dar išliko. Autorės nuomone, taip yra dėl to, kad esant ypač žemam GWT medžių šaknys nebepasiekia vandens ir ima formuoti siauresnes metines rėves. Kai GWT nukrenta, pradeda džiūti ir

suslūgti paviršinis durpių sluoksnis, kuriame aukštapelkių medžiai yra įsitvirtinę didžiąja dalimi savo šaknų, o tai lemia sausros stresą (Braekke, 1983; Dang, Lieffers, 1989; Pepin et al., 2002). Taip pat darytina išvada, kad tokiais laikotarpiais RW labiau priklauso nuo kitų medžių augimą ribojančių aplinkos veiksnių. Tačiau šiai hipotezei patvirtinti reikalingi detalesni tyrimai.

Įprastai, kuo aukštesnis gruntinio vandens lygis, tuo siauresnės metinės rievės. Vandens prisotintas durpinis gruntas sukuria nepalankias sąlygas medžių augimui dėl daugelio fizinių, cheminių ir biologinių procesų (Kozłowski, 1997). Aukštas gruntinio vandens lygis apriboja medžių šaknų augimą, nukreipdamas jas link viršutinio aerobinio durpės sluoksnio ir galiausiai sumažina šaknų vystymąsi (Coutts, 1982; Kozłowski, 1997). Be to jis apriboja medžiams reikalingą maistinių medžiagų kiekį jau ir taip maisto medžiagų skurdžioje aplinkoje (Ohlson, 1995), o tai sutrikdo augalo augimą. Mažas deguonies kiekis dirvožemyje lemia deguonies trūkumą viršutinėse augalo dalyse ir vėliau slopina augalo augimą (Boggie, 1977).

Metinių rievinių formavimąsi nulemia ne vien tik prieš dvejus metus buvęs konkrečių metų GWT, bet ir ankstesnių metų GWT, ypač jeigu panašūs GWT išsilaiko ilgesnį laiko tarpą, o paskui labiau negu įprastai sumažėja arba padidėja. Pavyzdžiui, 35 paveiksle matyti, kad po ekstremaliai sauso periodo (1965–1985) pakilęs GWT neturėjo tokios didelės neigiamos įtakos metinių rievinių formavimuisi kaip GWT pakilimas po ilgai trukusio periodo su vidutiniu gruntiniu vandens lygiu (po 1940–1960 m.). Per ilgai trukusius šlapius arba sausus periodus medis iš dalies fiziologiškai prisitaiko augti esamomis sąlygomis, todėl nauji vandens lygio pokyčiai darys skirtingą įtaką medžių augimui.

Taigi, galima daryti prielaidą, kad augimą ribojantis gruntinio vandens lygis skirstytinas į tris horizontus: viršutinį, vidurinį ir apatinį. GWT esant viršutiniame horizonte, aukštapelkėse augančios pušys kenčia nuo hipoksijos, jų augimas sulėtėja. Palankiausios augimo sąlygos kai GWT yra viduriniame horizonte, maždaug 10–50 cm gylyje nuo durpės paviršiaus. Kai GWT nukrenta į apatinį horizontą, vėl prasideda streso būseną. GWT nukritus į apatinį horizontą, esant palankioms meteorologinėms sąlygoms, medžių šaknų sistema gali gauti tik kritulių ir kondensacinį vandenį. Autorės nuomone, durpės porose susikaupiantis kondensacinis arba kritulių vanduo (porinis vanduo) kartais gali kompensuoti gruntinio vandens stygių.



**36 pav.** Gruntinio vandens lygio ir medžių metinių rėvių Čepkelių aukštapelkėje ryšio grafikas. Kairėje – RW priklausomybė nuo vidutinio metinio MGWT skirtingais intervalais pagal MGWT svyravimus. Mėlyna spalva rodo neigiamą RW priklausomybę, kai MGWT virš 132,6 m BS, o raudona spalva žymi laikotarpį, kai MGWT nukrenta žemiau 132,6 m BS (ryšio tarp RW ir MGWT nebėra).

Dešinėje – Čepkelių aukštapelkės vidutinis metinis MGWT (4-A grėžinys) ir aukštapelkės pušų STD RW (RW chronologija, atsižvelgiant į MGWT, per dvejus metus paslinkta atgal). Apačioje – vidutinis metinis MGWT, pratęsta GWT rekonstrukcija pagal RW (RWGWT) ir Nemuno nuotėkis



Medžių augimo kaita aukštapelkėse gali atspindėti visus praeities gruntinio vandens lygio svyravimus tol, kol GWT bus pagrindinis faktorius darantis įtaką medžių augimui. Autorės nuomone, esant labai sausiems laikotarpiais, kai GWT nukrenta į apatinį horizontą, augimas tampa priklausomas nuo kitų augimą lemiančių veiksnių, dėl ko prarandamas tiesinis ryšys tarp RW ir GWT. Norint tai išsiaiškinti reikalingi papildomi tyrimai. Detalesni tyrimai taip pat reikalingi aiškinantis, kokios priežastys lemia hidrometeorologinių veiksnių atsako metinėms medžių rievėms vėlavimą. Dėl aukštapelkių ekosistemos hidrologinio funkcionavimo vėlavimo ir grįžtamųjų ryšių, žinių apie tikslų klimato ir aplinkos sąlygų poveikį radialiesiems kamieno pokyčiams vis dar trūksta. Aukštapelkių raidos dėsningumai ir savitumas plačiau atsiskleistų tęsiant dendrochronologinius hidrologinių procesų tyrimus ir įvertinant kompleksinę klimato įtaką aukštapelkių medžiams. Pavyzdžiui, pirminį tiesioginį klimato poveikį augimui jungiant su daugiamečiu integruotu atsaku į nuo regioninio klimato priklausančius vandens lygio svyravimus.

## IŠVADOS

Aukštapelkėse pušų radialusis augimas prasidėdavo vidutinei paros temperatūrai viršijus 7 °C. Temperatūrai nukritus žemiau 7 °C prasidėdavo ramybės būseną. Radialų kamieno kitimą vegetacijos laikotarpiu gruntinio vandens lygis veikė labiau nei oro temperatūra. Didelę įtaką medžių prieaugiui daro ir prieš vegetacinio laikotarpio meteorologinės sąlygos. Esant žemai oro temperatūrai, aukštapelkių pušų kamieno plėtimuisi, palankesnis yra žemas gruntinio vandens lygis. Esant aukštai temperatūrai palankesniu tampa aukštas gruntinio vandens lygis.

Aukštapelkėse augančių pušų metinių rėvių pločio kovariacija parodo, kad pastaruosius 150 metų pušų augimo sąlygos, išskyrus individualius atvejus, buvo panašios. Didžiausias vidutis metinių rėvių prieaugis 1922–2012 m. fiksuotas Aukštumalos aukštapelkėje, toliau seka Kerėplio, Čepkelių ir Rėkyvos aukštapelkės. Skirtingą aukštapelkių pušų prieaugį galėjo lemti skirtingos augaviečių hidrologinės sąlygos.

Reikšminga koreliacija nustatyta tarp visų tirtų skirtingose Lietuvos vietose šalia aukštapelkių mineraliniame grunte augančių pušų metinių rėvių pločių. Reikšmingi ryšiai tarp skirtingose aukštapelkėse augančių pušų metinių rėvių pločių fiksuoti ne visais atvejais. Skirtingomis savybėmis pasižyminčiose aukštapelkėse augančios pušys į hidrometeorologinius pasikeitimus gali sureaguoti per skirtingą laiko tarpą.

Medžių prieaugis aukštapelkėse labiausiai priklauso nuo gruntinio vandens lygio. Nustatytas uždelstas gruntinio vandens lygio poveikis pušų metinėms rėvėms. Stipriausias ryšys rastas tarp vidutinio metinio vandens lygio ir septynerių metų P-PET sumų, bei pagal P-PET rekonstruoto MGWT ir RW (STD) su dvejų metų vėlavimu.

Nustatyta gruntinio vandens lygio riba, iki kurios tarp gruntinio vandens lygio ir RW yra tiesinė neigiama priklausomybė. GWT nukritus žemiau šios ribos RW formavimasis gali labiau priklausyti nuo kitų, augimą ribojančių, aplinkos veiksnių. Nepaisant šių išimčių, aukštapelkės pušų RW yra tinkamas indikatorius GWT nustatyti. Remiantis Čepkelių aukštapelkės pušų RW chronologija, rekonstruota šios aukštapelkės gruntinio vandens lygio kaita atitinka Nemuno upės nuotėkio kaitą. Atsižvelgiant į tai, kad subfosilinės pušų liekanos dideliais kiekiais randamos durpėse, naujai sukurti ryšiai gali būti naudojami nustatant gruntinio vandens lygio pokyčius Holoceno laikotarpiu.

## LITERATŪROS SĄRAŠAS

- Abolin R.I., 1915. Marsh forms of *Pinus sylvestris* L. Proceedings of the Botanical Museum of the Academy of Sciences, 14.
- Auchmoody L.R., 1976. Accuracy of band dendrometers. U.S.D.A. Forest Service Research Note NE-221. Forest Service, US Department of Agriculture, Upper Darby, Pennsylvania, USA.
- Baillie M.G.L., 1982. Tree-Ring Dating and Archaeology. Chicago: The University of Chicago Press, 274 p.
- Balevičius K., Giniūnas K., Jankevičienė R., Prūsaitė J., Šešelgis K., Tamošaitis J., 1984. Čepkelių raisto vandeningumo kitimas remiantis dendrochronologiniais duomenimis. Čepkelių rezervatas. Vilnius, 44–45.
- Bednarz Z., 1984. The Comparison of Dendroclimatological Reconstructions of Summer Temperatures from the Alps and Tatra Mountains from 1741–1965. *Dendrochronologia*, 2: 63–72.
- Bellamy P.E., Stephen L., Maclean I.S., Grant M.C., 2012. Response of blanket bog vegetation to drain-blocking. *Applied vegetation science*, 15: 129–135.
- Biondi F., Waikul K., 2004. DENDROCLIM2002: AC++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers & Geosciences*, 30: 303–311.
- Bitvinskas T., 1986. Dendrochronology in the Lithuanian SSR. Dendrochronology around the Baltic. A collection of papers read at the meeting held in Joensuu, Finland, 27–30. August, 1986. *Annales Academiae scientiarum Fennica. (Geologica-Geographica). Series A. III*: 109–117.
- Bitvinskas T., 1998. Development and Trends of Dendrochronology in Lithuania. Proceedings of the International Conference „Eurodendro 98: Dendrochronology and Environmental Trends”. Kaunas: Vytauto Didžiojo universitetas, 77–83.
- Blasing T.J., Duvick D.N., 1984. Reconstruction of precipitation history in North American corn belt using tree rings. *Nature*, 307(5947): 143–145.
- Blasing T.J., Fritts H.C., 1973. Past Climate of Alaska and Northwestern Canada as Reconstructed from Tree Rings. *Climate of the Arctic*, 48–58.
- Blasing T.J., Stahle D.W., Duvick D.N., 1988. Tree ring – based reconstruction of annual precipitation in the South – Central United States from 1750 to 1980. *Water Resources Research*, 24(1): 163–171.
- Boggie R., 1972. Effect of water-table height on root development of *Pinus contorta* on deep peat in Scotland. *Oikos*, 23: 304–312.

- Boggie R., 1977. Water-table depth and oxygen content of deep peat in relation to root growth of *Pinus contorta*. *Plant Soil*, 48(2): 447–54.
- Bogino S., Nieto M. J.F., Bravo F., 2009. Climate effect on radial growth of *Pinus sylvestris* L. at its southern and western distribution limits. *Silva Fennica*, 43(4): 609–623.
- Boswijk G., 2003. The buried forest of Thorne Moors. *Thorne and Hatfield Moors Papers*, 6: 52–65.
- Boswijk G., Whitehouse N.J., 2002. *Pinus* and *Prostomis*: a dendrochronological and palaeontomological study of a mid-Holocene woodland in eastern England. *The Holocene*, 12: 585–596.
- Braekke F.H., 1983. Water table levels at different drainage intensities on deep peat in northern Norway. *Forest Ecology and Management*, 5(3):169–92.
- Bräuning A., Volland-Voigt F., Burchardt I., Ganzhi O., Nauss T., Peters T., 2009. Climatic control of radial growth of *Cedrela Montana* in a humid mountain rainforest in Southern Ecuador. *Erdkunde*, 63: 337–345. <http://dx.doi.org/10.3112/erdkunde.2009.04.04>
- Bumblauskis T., 1983. Rytų žemaičių plynaukštės takoskyrinio kraštovaizdžio optimizavimas– metodinė medžiaga. Lietuvos TSR Mokslų Akademijos Botanikos Institutas, 158 p.
- Cedro A., 2001. Dependence of radial growth of *Pinus sylvestris* L. from western Pomerania on the rainfall and temperature conditions. *Geochronometria*, 20: 69–74.
- Chambers F.M., Barber K.E., Maddy D., Brew J., 1997. A 5500-year proxy-climate and vegetation record from blanket mire at Talla Moss, Borders, Scotland. *The Holocene*, 7(4): 391–399. <https://doi.org/10.1177/095968369700700402>
- Charman D.J., Brown A.D., Hendon D., Karofeld E., 2004. Testing the relationship between Holocene peatland palaeoclimate reconstructions and instrumental data at two European sites. *Quaternary Science Reviews*, 23(1–2):137–43.
- Cleaveland M.K., Stahle D.W., 1989. Tree-ring analysis of surplus and deficit runoff in the White River, Arkansas. *Water Resources Research*, 25(6): 1391–1401.
- Cook E.R., 1985. A time-series analysis approach to tree-ring standardization (Doctoral dissertation). The University of Arizona. <http://ltr.arizona.edu/sites/ltr.arizona.edu/files/bibliodocs/CookER-Dissertation.pdf>

- Cook E.R., Kairiukstis L.A., 1990. *Methods of Dendrochronology, Applications in the Environmental Sciences*. Kluwer Academic Publishers, International Institute for Applied Systems Analysis, London. <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-015-7879-0>.
- Cook E.R., Krusic P.J., 2006. ARSTAN\_41: A Tree-Ring Standardization Program Based on Detrending and Autoregressive Time Series Modeling, with Interactive Graphics. Tree-Ring Laboratory, Lamont Doherty Earth Observatory of Columbia University, New York.
- Cook E.R., Peters K., 1981. The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. *Tree-ring Bulletin*, 41: 45–53.
- Cook E.R., Peters K., 1997. Calculating unbiased tree-ring indices for the study of climatic and environmental change. *The Holocene*, 7: 361–370.
- Corona E., 1986. *Dendrochronologia: Principi e applicazioni*. Atti del seminario tenuto a Verona nei giorni 14 e 15 novembre 1984. Verona: Istituti italiano di dendrochronologia, 103 p.
- Coutts M.P., 1982. The tolerance of tree roots to waterlogging. *New Phytologist*, 90(3): 467–76.
- Dagys J., 1980. *Augalų ekologija*. Vilnius, 239 p.
- Dang Q.L., Lieffers V.J., 1989. Climate and annual ring growth of black spruce in some Alberta peatlands. *Canadian Journal of Botany*, 67(6):1885–9.
- Dauskane I., Brūmelis G., Elferts D., 2011. Effect of climate on extreme radial growth of Scots pine growing on bogs in Latvia. *Estonian Journal of Ecology*, 60(3): 236–48.
- De Belder A., 2015. Comparison of different dendrometers and LVDT-sensors in laboratory and field conditions. *Magistro baigiamasis darbas*. Gento universitetas, Belgija.
- Deslauriers A., Morin H., Urbinati C., Carrer M., 2003. Daily weather response of balsam fir (*Abies balsamea* (L.) Mill.) stem radius increment from dendrometer analysis in the boreal forests of Quebec (Canada). *Trees - Structure and Function*, 17: 477–484.
- Deslauriers A., Rossi S., Anfodillo T., 2007. Dendrometer and intra-annual tree growth: What kind of information can be inferred? *Dendrochronologia*, 25(2): 113–124. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2007.05.003>
- Dimitrov D.D., Grant R.F., Lafleur P.M., Humphreys E.R., 2010. Modeling the effects of hydrology on ecosystem respiration at Mer Bleue bog, J. *Geophys. Res.*, 115, G04043.

- Douglass A.E., 1914. A method of estimating rainfall by the growth of trees. *The Climatic Factor*. Carnegie Institute of Washington Publications, 192: 101–122.
- Douglass A.E., 1921. Dating our prehistoric ruins. *Natural History*, 21(1): 27–30.
- Drew D.M., Downes G.M., 2009. The use of precision dendrometers in research on daily stem size and wood propriety variation: a review. *Dendrochronologia*, 27: 159–172.
- Eckstein D., 1986. Temperature fluctuations in Western Europe during the last 1000 years as derived from tree rings and other proxy indicators. Papers presented at the workshop in Bulgaria, Albena „Regional Resource Management” (Ed L. Kairiūkštis). Laxenburg: International Institute for Applied Systems Analysis, 33–45.
- Eckstein J., Leuschner H.H., Bauerochse A., 2008. Dendroecological studies on subfossil pine and oak from “Totes Moor” near Hannover (Lower Saxony, Germany). In: Elferts D., Brumelis G., Gärtner H., Helle G., Schleser G., editors. *Proceedings of the DENDROSYMPOSIUM 2007. Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology*. Riga, Latvia, 6: 70–7.
- Eckstein J., Leuschner H.H., Bauerochse A., Sass-Klaassen U., 2009. Subfossil bog-pine horizons document climate and ecosystem changes during the Mid-Holocene. *Dendrochronologia*, 27(2):129–46.
- Eckstein J., Leuschner H.H., Giesecke T., Shumilovskikh L., Bauerochse A., 2010. Dendroecological investigations at Venner Moor (northwest Germany) document climate-driven woodland dynamics and mire development in the period 2450–2050 BC. *The Holocene*, 20(2): 231–44.
- Edvardsson J., Corona C., Mažeika J., Pukienė R., Stoffel M., 2016a. Recent advances in long-term climate and moisture reconstructions from the Baltic region: Exploring the potential for a new multi-millennial tree-ring chronology. *Quat. Sci. Rev.*, 131: 118–126. doi:10.1016/j.quascirev.2015.11.005
- Edvardsson J., Hansson A., 2015. Multiannual hydrological responses in Scots pine radial growth within raised bogs in southern Sweden. *Silva Fennica*, 49: 1–14. doi:10.14214/sf.1354
- Edvardsson J., Linderson H., Rundgren M., Hammarlund D., 2012. Holocene peatland development and hydrological variability inferred from bog-pine dendrochronology and peat stratigraphy— a case study from southern Sweden. *Journal of Quaternary Science*, 27(6): 553–63.

- Edvardsson J., Poska A., Van der Putten N., Rundgren M., Linderson H., Hammarlund D., 2014. Late-Holocene expansion of a South Swedish peatland and its impact on marginal ecosystems: Evidence from dendrochronology, peat stratigraphy and palaeobotanical data. *The Holocene* 24, 466–476.
- Edvardsson J., Rimkus E., Corona C., Šimanauskienė R., Kazys J., Stoffel M., 2015b. Exploring the impact of regional climate and local hydrology on *Pinus sylvestris* L. growth variability – A comparison between pine populations growing at peat soils and mineral soils in Lithuania. *Plant and Soil*, 392: 345–356. doi:10.1007/s11104-015-2466-9
- Edvardsson J., Stoffel M., Corona C., Bragazza L., Leuschner H.H., Charman D.J., Helama S., 2016. Subfossil peatland trees as proxies for palaeohydrology and climate reconstruction during the Holocene. *Earth-Science Reviews*, 163: 118–140.
- Edvardsson J., Šimanauskienė R., Taminskas J., Baužienė I., Stoffel M., 2015a. Increased tree establishment in Lithuanian peat bogs - Insights from field and remotely sensed approaches. *Science of the Total Environment*, 505: 113–120.
- Eggelsmann R.F., 1984. Annual ground water course in peatlands with different using (vegetation). *Proceedings: 7th International Peat Congress. Dublin, Ireland 18–23 June 1984: 134–147.*
- Eronen M., Zetterberg P., Huttunen P., 1986. Climatic fluctuations in Norden as derived from tree rings and other proxy data. *Papers presented at the NASA Workshop on „Regional Resource Management“, September 30 – October 4, 1985, Albena, Bulgaria, 75–110.*
- Eschbach W., Nogler P., Schär P., Schweingruber F.H., 1995. New developments in x-ray densitometry. *Dendrochronologia*, 13: 155-169.
- Frankl R., Schmeidl H., 2000. Vegetation change in a south German raised bog: ecosystem engineering by plant species, vegetation switch or ecosystem level feedback mechanisms? *Flora*, 195: 267–276.
- Freeman C., Lock M.A., Reynolds B., 1993. Fluxes of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O from a Welsh peatland following simulation of water table draw-down: potential feedback to climatic change. *Biogeochemistry*, 19(1): 51–60. doi:10.1007/BF00000574.
- Friedman J.H., 1984. *A Variable Span Smoother*, Department of Statistics Technical Report LCS 5, Stanford University, Stanford.
- Fritts H.C., 1976. *Tree Rings and Climate*. Academic Press, London, 567 p.

- Gažovič M., Kutzbach L., Schreiber P., Wille C., Wilmking M., 2010. Diurnal dynamics of CH<sub>4</sub> from a boreal peatland during snowmelt. *Tellus B* 62(3): 133–9. doi:10.1111/j.1600-0889.2010.00455.x.
- Gjerdrum P., 2003. Heartwood in relation to age and growth rate in *Pinus sylvestris* L. in Scandinavia. *Forestry* 76(4): 413–424. doi.org/10.1093/forestry/76.4.413.
- Gordon G.A., 1982. Verification of dendroclimatic reconstructions. In: *Climate from Tree Rings*. Cambridge University Press, London, New York, New Rochelle, Melbourne, Sydney, 58–61.
- Gorham E., 1991. Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming. *Ecological Applications*, 1(2): 182–95. doi:10.2307/1941811.
- Gruber A., Zimmermann J., Wieser G., Oberhuber W., 2009. Effects of climate variables on intra-annual stem radial increment in *Pinus cembra* (L.) along the alpine treeline ecotone. *Annals of Forest Science*, 66(5): 503–513. <http://dx.doi.org/10.1051/forest/2009038>
- Gunnarson B. E., 1999. A 200-Year Tree-Ring Chronology of Pine from a Raised Bog in Sweden: Implication for Climate Change? *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 81: 421–430. doi:10.1111/1468-0459.00071
- Gunnarson B. E., 2008. Temporal distribution pattern of subfossil pines in central Sweden: perspective on Holocene humidity fluctuations. *The Holocene*, 18(4): 569–577. <https://doi.org/10.1177/0959683608089211>
- Haapalehto T.O., Vasander H., Jauhiainen S., Tahvanainen T., Kotiaho J.S., 2011. The effect of peatland restoration on water-table depth, elemental concentrations, and vegetation: 10 years of changes. *Restoration Ecology*, 19: 587–598.
- Herzog K.M., Hasler R., Thum R., 1995. Diurnal changes in the radius of a sub-Alpine Norway spruce stem their relation to the sap flow and their use to estimate transpiration. *Trees - Structure and Function*, 10: 94–101.
- Huber B., 1941. Aufbau einer mitteleuropäischen Jahrring-Chronologie. *Mitteilungen der Akademie der Deutschen Forstwissenschaft*, 1: 110–125.
- Huges M.K., Brown P.M., 1992. Drought frequency in central California since 101 B.C. recorded in giant sequoia tree rings. *Proceedings of the International Dendrochronological symposium, Ystad – 1990*. Lund, 90–93.



- Jacoby G.C., Cook E.R., 1981. Past temperature variations inferred from a 400 year tree-ring chronology from Yukon territory, Canada. *Arctic and Alpine Research*, 13(4): 409–418.
- Jacoby G.C., Cook E.R., Ulan L.O., 1985. Reconstructed summer degree days in Central Alaska and Northwestern Canada since 1524. *Quaternary Research*, 23: 18–26.
- Jacoby G.C., Ivanciu I.S., Ular L.D., 1988. A 263-year record of summer temperature for Northern Quebec reconstructed from tree-ring data and evidence of a major climatic shift in the early 1800's. *Palaeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 64: 69–78.
- Jarašius L., 2015. Aukštapelkių augalų bendrijų ekologinio atkūrimo galimybės degradavusioje Aukštumalos pelkės dalyje ir išeksploatuotame durpyne. *Daktaro disertacija. Vilniaus universitetas*, 145 p.
- Kairiūkštis L., 1973. Mišrių eglynų formavimas ir kirtimai. *Vilnius: Mintis*, 358 p.
- Karpavičius J., Yadav R.R., Kairaitis J., 1996. Radial Growth Responce of Pine (*Pinus sylvestris* L.) and Spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) to Climate and Geohydrological factors. *Paleobotanist*, 45: 148–151.
- Karpavičius J., Žeimavičius K., 2004. Vakarinės tujos (*Thuja occidentalis* L.) ir vietinių medžių rūšių radialiojo prieaugio kaitos panašumai ir skirtumai. *Ekologija*, 3: 17–22.
- Kažys J., Rimkus E., Taminskas J., Butkutė S., 2015. Hydrothermal effect on groundwater level fluctuations: case studies of Čepkeliai and Rėkyva peatbogs, Lithuania. *Geologija. Geografija*, 1(3):116–129.
- Kienast F., 1985. Dendroökologische Untersuchungen an Höhenprofilen aus verschiedenen Klimabereichen. *Inaugural-Dissertation. Universität Zürich*, 129 s.
- Kilian M.R., Van der Plicht J., Van Geel B., 1995. Dating raised bogs: New aspects of AMS 14C wiggle matching, a reservoir effect and climatic change. *Quaternary Science Reviews*, 14(10): 959–66.
- King G., Fonti P., Nievergelt D., Büntgen U., Frank D., 2013. Climatic drivers of hourly to yearly tree radius variations along a 6 °C natural warming gradient. *Agricultural and Forest Meteorology*, 168: 36–46. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.08.002>
- Kozłowski T.T., 1997. Responses of woody plants to flooding and salinity. *Tree Physiology*, 1:1–29.
- Kozłowski T.T., Kramer P.J., Pallardy S.G., 1997. *Physiology of Woody Plants*. Academic Press.

- Kozłowski T.T., Winget C.H., 1964. Diurnal and seasonal variation in radius of tree stems. *Ecology*, 45: 149–155.
- Krepkowski J., Bräuning A., Gebrekirstos A., Strobl S., 2011. Cambial growth dynamics and climatic control of different tree life forms in tropical mountain forest in Ethiopia. *Trees - Structure and Function*, 25: 59–70.
- Lafleur P.M., Roulet N.T., Admiral S.W., 2001. Annual cycle of CO<sub>2</sub> exchange at a bog peatland. *Journal of Geophysical Research*, 106(D3): 3071–3081. doi:10.1029/2000JD900588.
- Lageard J. G. A., Chambers F. M., Thomas P. A., 1999. Climatic significance of the marginalization of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) c. 2500 BC at White Moss, south Cheshire, UK. *Holocene*, 9: 321–331. <https://doi.org/10.1191/095968399674220353>
- Läänelaid A., 1979. Studying mire transgression with methods of dendrochronology. *Bolota I bolotnye jagodniki*, 15. *Acta of Darwin State Reserve*, 15: 38–43.
- Läänelaid A., 1982. Radial increment of bog pines and climatic changes. In: *Peatland Ecosystems. Estonian Contributions to the International Biological Programme*, No 9. Tallin, 134–147.
- Läänelaid A., 1988. Multi-year increment trends of Scotch pines as an indicator of bog dynamics. Zobel M. (Ed.). *Dynamics and ecology of wetlands and lakes in Estonia*. Academy of sciences of Estonian SSR. Estonian Republican Committee of the International Programme (Man and the Biosphere). Tallinn: Tartu State University, Institute of Zoology and Botany.
- Läänelaid A., 1994. A dendrochronological study of decline of pine stands in South Estonia. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Biology*, 43: 89–98.
- Läänelaid A., Sohar K., Kull A., 2014. Kuivenduse mõju ulatus Tellissaare rabas määndide jämeduskasvu järgi [Detecting drainage effect in Tellissaare Bog on the basis of pine radial increment]. Tammiksaar E., Pae T., Mander Ü. (Ed.). *95 Years of Estonian Geography: Selected Studies*. Tartu: Tartu Ülikooli Kirjastus. *Publicationes Instituti Geographici Universitatis Tartuensis*, 111: 219–229. ISSN 1406-3069.
- Leuschner H.H., Sass-Klaassen U., Jansma E., Baillie M.G.L., Spurk M., 2002. Subfossil European bog oaks: population dynamics and long-term growth depressions as indicators of changes in the Holocene hydro-regime and climate. *The Holocene*, 12(6): 695–706. doi: 10.1191/0959683602hl584rp.

- Liese W., 1978. Bruno Huber: The Pioneer of European Dendrochronology. *Dendrochronology in Europe* (Ed J. Fletcher). British Archaeological Reports International Series, 51: 1–10.
- Lietuvos durpynų kadastras, 1995. Lietuvos respublikos aplinkos apsaugos ministerija. Kraštotvarkos departamentas, 1281 p.
- Linderholm H.W., 2001. Climatic influence on Scots pine growth on dry and wet soils in the central Scandinavian mountains, interpreted from tree-ring width. *Silva Fenn*, 35(4): 415–24.
- Linderholm H.W., Leine M., 2004. An assessment of twentieth century tree-cover changes on a southern Swedish peatland combining dendrochronology and aerial photograph analysis. *Wetlands*, 24(2): 357–63.
- Linderholm H.W., Moberg A., Grudd H., 2002. Peatland pines as climate indicators? A regional comparison of the climatic influence on Scots pine growth in Sweden. *Canadian Journal of Forest Research*, 32(8): 1400–10.
- Linderholm H.W., Solberg B.O., Lindholm M., 2003. Tree-ring records from central Fennoscandia: the relationship between tree growth and climate along a west-east transect. *The Holocene*, 13: 887–895.
- Linkevičienė R., Šimanauskienė R., Taminskas J., 2008. Analysis of woody vegetation structure in the heterogenous mires (the case study of Amalvas mire). Boltižiar, M. (Ed.). *Implementation of Landscape Ecology in New and Changing Conditions. Proceedings of the 14th International Symposium on Problems of Landscape Ecological Research*, 4–7 October 2006, Stará Lesná, High Tatra Mts., Slovak Republic. Institute of Landscape Ecology of the Slovak Academy of Sciences, Bratislava, branch Nitra, 510 p. ISBN 978-80-89325-03-0.
- MacDonald S.E., Yin F., 1999. Factors influencing size inequality in peatland black spruce and tamarack: evidence from post-drainage release growth. *Journal of Ecology*, 87(3):404–12.
- Mannerkoski H., 1985. Effect of water table fluctuation on the ecology of peat soil. *Publications from the Department of Peatland Forestry. University of Helsinki*, 7: 1–190.
- Matthews E., Fung I., 1987. Methane emission from natural wetlands: global distribution, area, and environmental characteristics of sources. *Global Biogeochemical Cycles*, 1(1): 61–86. doi:10.1029/GB001i001p00061.
- Mauquoy D., Yeloff D., 2007. Raised peat bog development and possible responses to environmental changes during the mid- to late-Holocene. Can the palaeoecological record be used to predict the nature and

- response of raised peat bogs to future climate change? *Biodiversity and Conservation*, 17: 2139–2151.
- Mažeika J., Guobytė R., Kibirkštis G., Petrošius R., Skuratovič Ž., Taminskas J., 2009. The use carbon-14 and tritium for peat and water dynamics characterization: case of Čepkeliai peatland, Southeastern Lithuania. 2009 *Geochronometria*, 34:41–48.
- McNally A., Doyle G.J., 1984. A study of subfossil pine layers in a raised bog complex in the Irish Midlands – II. Serial relationships and floristics. *Proceedings of the Royal Irish Academy*, 84B(7): 71–81.
- McNally A., Doyle G.J., 1984a. A study of subfossil pine layers in a raised bog complex in the Irish Midlands – I. Palaeowoodland extent and dynamics. *Proceedings of the Royal Irish Academy*, 84B(6): 57–70.
- McVean D.N., 1963. Growth and mineral nutrition of Scots pine seedlings on some common peat types. *J. Ecol.*, 51: 657–670.
- Meko D.M., Hughes M.K., Stockton C., 1991. Climate change and climate variability: The paleo record, in *Managing Water Resources in the West under Conditions of Climate Uncertainty*. National Academy Press, 71–100.
- Mitsch W.J., Bernal B., Nahlik A.M., Mander Ü., Zhang L., Anderson C.J., 2013. Wetlands, carbon, and climate change. *Landscape Ecol.*, 28(4): 583–97. doi:10.1007/s10980-012-9758-8.
- Moir A., 2012. Development of a Neolithic pine tree-ring chronology for northern Scotland. *Journal of Quaternary Science* 27(5):503–8.
- Moir A.K., Leroy S.A.G., Brown D., Collins P.E.F., 2010. Dendrochronological evidence for a lower watertable on peatland around 3200–3000 BC from subfossil pine in northern Scotland. *The Holocene*, 20(6): 931–42.
- Moore T.R., Knowles R., 1989. The influence of water table levels on methane and carbon dioxide emissions from peatland soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 69(1): 33–8. doi:10.4141/cjss89-004.
- Munaut A. V., Casparie W. A., 1971. Étude dendrochronologique des *Pinus sylvestris* L. subfossiles provenant de la tourbière d’Emmen (Drenthe, Pays-Bas). *Rev. Palaeobot. Palynol.*, 2: 201–226.
- Munaut A.V., 1966. Recherches dendrochronologiques sur *Pinus sylvestris*. II. Première applications des méthodes dendrochronologiques à l’étude de pins sylvestres sub-fossiles (Terneuzen, Pays-Bas). *Agricultura (Belg.)*, 14(3): 361–389.
- Nekrošienė R., 2013. Meteorologinių sąlygų dendrochronologinė indikacija Klaipėdos mieste. *Miestų želdynų formavimas*, 1(10): 198–207.

- Ohlson M., 1995. Growth and nutrient characteristics in bog and fen populations of Scots pine (*Pinus sylvestris*). *Plant Soil*, 172(2): 235–45.
- Pakalnis R., 1987. Rėkyvos ežero ir pelkinio komplekso optimizacija (Optimization of Rėkyva Lake and wetland complex). Vilnius, Lietuva: Botanikos institutas.
- Pakalnis R., Avižienė D., Sendžikaitė J., 2007. Pelkių apsaugos priemonės eksploatuojamų durpynų aplinkoje (Necessity of hydrological protection measures in the peatbog Exploitation). 10-osios jaunujų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ Aplinkos apsaugos inžinerijos sekcijos medžiaga, Vilniaus Gedimino technikos universitetas.
- Pakalnis R., Sendžikaitė J., Avižienė D., 2008. Experimental preparation of raised bog rehabilitation in the process of peat-cutting. In: Proceedings of the conference “Peat in horticulture and the rehabilitation of peatlands after peat extraction: which issues for tomorrow?”, 121–129.
- Pakalnis R., Sendžikaitė J., Jarašius L., Avižienė D., 2009. Sustainable development perspectives in Aukštumala Telmological Nature Reserve. In: Grasserbauer M., Sakalauskas L., Zavadskas E.K. (eds), Knowledge-based technologies and OR methodologies for strategic decisions of sustainable development. The 5th International Vilnius Conference and EURO-Mini Conference (KORS-2009). Vilnius, 456–460.
- Pallardy S.G., 2008. *Physiology of woody plants*, 3rd ed. Elsevier / Academic Press. 454 p.
- Pellerin S., Lavoie C., 2003. Reconstructing the recent dynamics of mires using a multitechnique approach. *J. Ecol.*, 91(6): 1008–1021.
- Pepin S., Plamondon A.P., Britel A., 2002. Water relations of black spruce trees on a peatland during wet and dry years. *Wetlands*, 22(2): 225–33.
- Povilaitis A., Taminskas J., Gulbinas Z., Linkevičienė R., Pileckas M., 2011. *Lithuanian Wetlands and Their Water Protective Importance*. Vilnius, 326 p.
- Priede A., 2013. Impact of restoration measures on the raised bog habitats in Rožu, Aklais and Aizkraukle mire. In Pakalne M., Srazdina L. (eds), *Raised bog management for the biological diversity conservation in Latvia*. Riga, 192–197.
- Pukienė R., 1997. Pušynų augimo dinamika Užpelkių Tyrelio aukštapelkėje subatlančio periodu. Daktaro disertacija. Vilnius: Botanikos institutas, 136 p.
- Pukienė R., 2001. Natural changes in bog vegetation reconstructed by sub-fossil tree remnant analysis. *Biologia*, 2: 111–113.
- Ramanauskas V., 1973. *Dendrologija*. Vilnius, 319 p.

- Rėkyvos ežero būklės įvertinimas ir jo aplinkos optimizavimo plano parengimas, 2008. Taminskas J. (vad.) Baigiamoji ataskaita, Geologijos ir geografijos institutas, Vilnius
- Richter K., 1988. Dendrochronologische und dendroklimatologische Untersuchungen an Kiefern (*Pinus* sp.) in Spanien. Ph. D. Dissertation. Universität Hamburg, 296 s.
- Richter K., Eckstein D., Holmes R.L., 1991. The dendrochronological signal of pine trees (*Pinus* spp.) in Spain. *Tree-Ring Bulletin*, 51: 1–13.
- Rigling A., Waldner P.O., Forster T., Bräker O.U., Pouttu A., 2001. Ecological Interpretation of Tree-Ring Width and intraannual density fluctuations in *Pinus sylvestris* on dry sites in the central Alps and Siberia. *Canadian Journal of Forest Research*, 31 (1): 18–31.
- Rinn F., 2003. TSAP-Win user reference manual. Heidelberg: Rinntech.
- Ruseckas J., Grigaliūnas V., 2008. Effect of drain-blocking and meteorological factors on groundwater table fluctuations in Kamanos mire. *Journal of environmental engineering and landscape management*, 16(4): 168–177.
- Saarnio S., Morero M., Shurpali N.J., Tuittila E.S., Mäkilä M., Alm J., 2007. Annual CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> fluxes of pristine boreal mires as a background for the lifecycle analyses of peat energy. *Boreal Environment Research*, 12: 101–113.
- Sagerfors J., Lindroth A., Grelle A., Klemedtsson L., Weslien P., Nilsson M., 2008. Annual CO<sub>2</sub> exchange between a nutrient-poor, minerotrophic, boreal mire and the atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 113: G01001. doi:10.1029/2006JG000306.
- Salm J.O., Kimmel K., Uri V., Mander Ü., 2009. Global warming potential of drained and undrained peatlands in Estonia: A synthesis. *Wetlands*, 29(4): 1081–1092. doi:10.1672/08-206.1.
- Schweingruber F.H., 1985. Dendro-ecological zones in the coniferous forests of Europe. *Dendrochronologia*, 3: 67–75
- Schweingruber F.H., 1988. *Tree Rings: Basics and Applications of Dendrochronology*. Reidel: Dordrecht, 276 p.
- Schweingruber F.H., 1993. *Jahrringe und Umwelt dendroökologie*. Vologda: Lis., 474 s.
- Schweingruber F.H., 1996. *Tree Rings and Environment. Dendroecology*. Berne, Stuttgart, Vienna: Haupt, 609 p.
- Shah S.K., Touchan R., Babushkina E., Shishov V.V., Meko D.M., Abramenko O.V., Belokopytova L.V., Hordo M., Jevšenak J., Kędziora W., Kostyakova T.V., Moskwa A., Oleksiak Z., Omurova G.,

- Ovchinnikov S., Sadehpour M., Saikia A., Zsewastynowicz Ł., Sidenko T., Strantsov A., Tamkevičiūtė M., Tomusiak R., Tychkov, I., 2015. August to July Precipitation from Tree Rings in the Forest-Steppe Zone of Central Siberia (Russia). *Tree-Ring Res.*, 71: 37–44. doi:10.3959/1536-1098-71.1.37
- Sheil D., 2003. Growth assessment in tropical trees: large daily diameter fluctuations and their concealment by dendrometer bands. *Canadian Journal of Forest Research*, 33(10): 2027–2035.
- Shiyatov S.G., 1988. The Development and State of Dendrochronology in the USSR. *Tree-Ring Bulletin*, 48: 31–35
- Sinkevičius S., 2001. *Pelkiu ekosistemos dabarties biosferoje*. Vilnius: Vilniaus universiteto leidykla, 281 p.
- Sleinyš R., 1973. Paprastosios pušies (*Pinus Silvestris* L.) mineralinio maitinimosi ekologija ir diagnostika. Lietuvos miškų ūkio mokslinio tyrimo instituto mokslo darbai, XIV tomas.
- Smiljanić M., Seo J., Läänelaid A., Maaten-Theunissen M.V., Stajić B., Wilmking, M., 2014. Peatland pines as a proxy for water table fluctuations: Disentangling tree growth, hydrology and possible human influence. *Science of The Total Environment*, 500(501): 52–63.
- Stahle D.W., Cleaveland M.K., 1988. Texas drought history reconstructed and analyzed from 1698 to 1980. *Journal of Climate*, 1: 59–74.
- Stahle D.W., Cleaveland M.K., Cervený R.S., 1991. Tree-ring reconstructed sunshine duration over central USA. *International Journal of Climatology*, 11: 285–295.
- Stahle D.W., Cleaveland M.K., Hehr J.G., 1988. North Carolina climate changes reconstructed from tree-rings: A. D. 372 to 1985. *Science*, 140: 1517–1519.
- Stallings W.S., 1937. Some Early Papers on Tree-Rings. *Tree-Ring Bulletin*, 3(4): 27-29.
- Stančikaitė M., Gedminienė L., Edvardsson J., Stoffel M., Corona C., Gryguc G., Uogintas D., Zinkutė R., Skuratovič Ž., Taraškevičius R., 2017. Holocene vegetation and hydroclimatic dynamics in SE Lithuania – Implications from a multi-proxy study of the Čepkeliai bog. *Quaternary international*. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.08.039>
- Stockton C.W., 1975. Long-term streamflow records, reconstructed from tree-rings. *Papers of the laboratory of Tree-Ring Research*, No5, University of Arizona, Tucson.

- Stockton C.W., Fritts H.C., 1973. Long-term reconstruction of water level of lake Athabasca by analysis of tree-rings. *Water Resources Bulletin*, 9: 1006–1027.
- Stockton C.W., Meko D.M., 1975. A long-term history of drought occurrence in Western United States as inferred from tree-rings. *Weatherwise*, 28(6): 244–249.
- Stoffel M., Corona C. 2014. Dendroecological dating of geomorphic disturbance in trees. *Tree Ring Research*, 70: 3–20.
- Stravinskienė V., 2002. Klimato veiksnių ir antropogeninių aplinkos pokyčių dendrochronologinė indikacija. Kaunas: Lututė, 172 p.
- Stravinskienė V., 2003. Klimato veiksnių poveikis paprastosios pušies (*Pinus sylvestris* L.) augimui AB „Akmenės cementas“ aplinkoje. *Ekologija*, 3: 34–39.
- Studhalter R.A., 1956. Early history of crossdating. *Tree-Ring Bulletin*, 21.
- Svedov O., 1892. Derevo, kak letopis zasuh (Tree as chronicles for dry periods). *Meteorologičeskij vestnik*, 5: 163–178.
- Šimanauskienė R., Taminskas J., Linkevičienė R., 2008. Anthropogenic and climate change influence towards the wetland ecosystem (the case study of Rekyva wetland). *Environmental engineering: the 7th international conference: selected papers: May 22-23, 2008. Vilnius, Lithuania*, 1: 394–400.
- Taminskas J., Linkevičienė R., Mažeika J., Kibirkštis G., 2007. The Impact of Global Climate Change for Hydrometeorological Conditions of Čepkeliai Peatland: The Elements of Vertical Water Cycle. *Annales Geographicae*, 40(2): 50–60.
- Taminskas J., Linkevičienė R., Šimanauskienė R., Jukna L., Kibirkštis G., Tamkevičiūtė M., 2018. Climate change and water table fluctuation: implications for raised bog surface variability. *Geomorphology*, 304: 40–49.
- Taminskas J., Mažeikis A., Linkevičienė R., 2011. Reconstruction of Bog Lake Water Level Fluctuations Using Method of Simple Modelling: A Case Study on Lake Rekyva. *Mokslas - Lietuvos ateitis*, 1(4). doi: 10.3846/mla.2009.4.03.
- Taminskas J., Pileckas M., Šimanauskienė R., Linkevičienė R., 2012. Wetland classification and inventory in Lithuania. *Baltica*, 25: 33–44.
- Tamkevičiūtė M., Edvardsson J., Pukienė R., Taminskas J., Stoffel M., Corona C., Kibirkštis G., 2018. Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) based reconstruction of 130 years of water table fluctuations in a peatland and



- its relevance for moisture variability assessments. *Journal of Hydrology*, 558: 509–519.
- Tamkevičiūtė M., Taminskas J., Šmatas V., Pukienė R., 2014. Meteorologinių sąlygų poveikis didelės raiškos dendrometrais išmatuotam *Pinus sylvestris* kamieno apimties pokyčiui vegetacijos periodo pabaigoje. *Science - Future of Lithuania*, 6 (4): 392–399. ISSN 2029-2341.
- Tardif J., Flannigan M.D., Bergeron Y., 2001. An analysis of the daily radial activity of 7 boreal tree species, northwestern Quebec. *Environ Monit Assess*, 67: 141–160.
- Tarybos Direktyva dėl natūralių buveinių ir laukinės faunos bei floros apsaugos. 92/43/EEB, 1992 m. gegužės 21 d. Oficialusis leidinys L 206, 22/07/1992: 0007–0050. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/?uri=celex%3A31992L0043>
- Thorntwaite C.W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review*, 38: 55–94.
- Topografinis žemėlapis M 1:25 000. 1950 m. rekognoskuotė, lapas C-35-50-B-a.
- Turcotte A., Morin H., Krause C., Deslauriers A., Thibeault-Martel M., 2009. The timing of spring rehydration and its relation with the onset of wood formation in black spruce. *Agric. Forest Meteorol*, 149: 1403–1409.
- Turetsky M.R., Kotowska A., Bubier J., Dise N.B., Crill P., Hornibrook E.R., Minkinen K., Moore T.R., Myers-Smith I.H., Nykanen H., Olefeldt D., Rinne J., Saarnio S., Shurpali N., Tuittila E.S., Waddington J.M., White J.R., Wickland K.P., Wilking M., 2014. A synthesis of methane emissions from 71 northern, temperate, and subtropical wetlands. *Global Change Biology*, 20(7): 2183–97. doi:10.1111/gcb.12580.
- Turunen J., Tomppo E., Tolonen K., Reinikainen A., 2002. Estimating carbon accumulation rate of undrained mires in Finland – application to boreal and subarctic regions. *The Holocene*, 12: 69–80.
- Vaganov E.A., Hughe M.K., Kirilyanov A.V., Schweingruber F.H., Silkin P.P., 1999. Influence of snowfall and melt timing on tree growth in subarctic Eurasia. *Nature*, 400: 149–151.
- Vaganov E.A., Kachaev A.V., 1992. Dendroclimatic analysis of the growth of pine in forest-bog phytocenoses of Tomsk Oblast. *Lesovedenie*, 6(1): 3–10.

- Valatka S., Oskolokaitė I., 2010. Lietuvos durpynų ekonominis vertinimas. Aplinkos apsaugos politikos centras, 123 p.
- Vicente-Serrano S.M., Begueria S., Lopez-Moreno J.I., 2010. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, 23(7): 1696–1718.
- Vieira J., Rossi S., Campelo F., Freitas H., Nabais C., 2013. Seasonal and daily cycles of stem radial variation of *Pinus pinaster* in a drought-prone environment. *Agric. For. Meteorol.*, 180. 173–181. doi:10.1016/j.agrformet.2013.06.009
- Vitas A., 2002. Klimato veiksnių įtaka paprastosios eglės (*Picea abies* (L.) Karsten) radialiajam prieaugiui. Daktaro disertacija. Kaunas: Vytauto Didžiojo universitetas. 122 p.
- Vitas A., 2011. Seasonal growth variations of pine, spruce, and birch recorded by band dendrometers on NE Lithuania. *Baltic Forestry*, 17(2): 197–204.
- Vitas A., Erlickytė R., 2008. Influence of droughts to the radial growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Ekologia (Bratislava)*, 27(4): 367–378.
- Weber C.A., 1902. Über die Vegetation und Entstehung des Hochmoors von Augstumal im Memeldelta mit vergleichenden Ausblicken auf andere Hochmoore der Erde. Eine formationsbiologisch-historische und geologische Studie. Berlin, Verlagsbuchhandlung Paul Parey.
- Weber C.A., 2016. Apie Aukštumalos aukštapelkės Nemuno deltoje augaliją ir vystymąsi lyginant su kitomis Žemės aukštapelkėmis. Monografija. Kaunas: Lututė, 239 p.
- Wigley T.M., Briffa K.R., Jones P.D., 1984. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(2): 201–13.
- Zinkutė R., Baužienė I., Dilys K., Taminskas J., Taraškevičius R., 2015. Recent Lithuanian peri-urban ombrotrophic bog records: indices derived from the contents of lead, zinc, copper and nickel. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 15(4): 293–318.
- Битвинскас Т., 1981. Дендрохронологические шкалы сосны Литовской ССР. В: Т. Битвинскас (Ред.), Дендрохронологические шкалы Советского Союза. Часть 2. Дендроклиматохронологическая лаборатория, Каунас, 4–16.
- Кайрайтис И., 1978. Дубовые насаждения. Условия среды и радиальный прирост деревьев. Каунас, 56–61.

- Калинин М.И., 1983. Формирование корневой системы деревьев. Москва, 152 с.
- Карпавичюс Й.А., 1984. Групповая изменчивость радиального прироста сосны в болотных условиях произрастания. Временные и пространственные изменения климата и годовичные кольца деревьев, ч. 1, Каунас, 74–80.
- Колчин Б.А., Черных Н.Б., 1977. Дендрохронология Восточной Европы. Москва: Наука, 125 с.
- Крамер П.Д., Козловский Т.Т., 1983. Физиология древесных растений. Москва, 462 с.
- Стравинскене В., 1981. Единные дендрохронологические шкалы осоково-сфагновых и долгомошных сосняков Литвы. Дендроклиматологические шкалы Советского Союза (ред. Т. Битвинскас). Каунас: Институт ботаники АН Литовской ССР, 2: 39–46.
- Сукачев В.Н., 1905. О болотной сосне. Лесной журнал, 35(3): 354–372.
- Яценко-Хмелевский А.А., Лотова Л.И., 1987. Строение коры хвойных (Stroyeniye kory khvoynukh). Ленинград: Изд-во ЛТА Ленинград.

## SUMMARY

The global climate change is a heavily debated topic worldwide. Supporters of the climate change idea present seemingly undeniable facts evidencing that the climate changes towards warmer conditions. Climate change-related research covers a number of issues, including the clarification of causative factors in climate change, its retrospective analysis, as well as prediction of climate change and its impacts. These issues are addressed by dendrochronological research as well, and for decades, annual growth rings from trees have been one of our most commonly used and important climate archives (Esper et al., 2007; Cook et al., 2015).

Past climate and hydrological conditions can be analyzed by assessing tree growth rates (Fritts, 1976). Several studies have shown that pine trees growing in peatlands represent an exclusive object for decadal to multi-millennial (hydro)climatic reconstructions (Edvardsson et al., 2016a and references therein). Peatland ecosystems are important carriers of biodiversity and habitats for numerous plant and animal species, as well as a significant player influencing the global carbon cycle (MacDonald et al., 2006; Turetsky et al., 2015). Most often, peatlands act as major carbon sinks (Gorham, 1991; Lafleur et al., 2001; Turunen et al., 2002; Sagerfors et al., 2008; Salm et al., 2009), but can also be significant sources of CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> (Matthews and Fung, 1987; Saarnio et al., 2007; Turetsky et al., 2014), especially in the case that hydrological conditions should be changing. Spatiotemporal dynamics of carbon fluxes in raised bogs are closely linked to the hydrological conditions in the peatland (Moore and Knowles, 1989; Freeman et al., 1993; Salm et al., 2009; Gažovič et al., 2010; Mitsch et al., 2013). Hydrological shifts in peatlands can be measured as water-table (WT) changes, but the scarcity of instrumental time series, often limited to a few years, has so far hampered a precise knowledge of relationships between C sequestration and WT fluctuations beyond the period covered by instrumental records (Tamkeviciute et al., 2018). Proxy records for peatland WT depth, which indirectly also generate information about C sequestration in the peatlands, are therefore highly valuable to improve both moisture and climate reconstructions.

Tree growth in raised bogs is mainly dependent on groundwater fluctuations. Several studies have shown that radial tree growth of peatland trees is limited by the moisture status in the water unsaturated zone, and thereby drive the formation of tree-ring width (TRW) patterns that are closely linked to WT fluctuations in peatlands (Boogie, 1972; Pukienė,

2001; Leuschner et al., 2002; Edvardsson et al., 2016a). Further studies are therefore needed to increase our understanding about the complex interaction between hydrology and tree growth at peatlands, as well as to improve our moisture reconstructions using tree-ring data from peatland trees.

Explaining the relationship between the annual ring of pine trees growing in peatlands and hydrometeorological conditions, most of the data analyzed in this work were collected during the Lithuanian and Swiss cooperation project CLIMPEAT (Climate change in peatlands: Holocene record, recent trends and related impacts on biodiversity and sequestered carbon). Project agreement No CH-3-ŠMM-01/05. CLIMPEAT project leaders: professor Markus Stoffel at the University of Bern, Institute for Geological Sciences, professor Jonas Mažeika at the Nature Research Centre, and professor Egidijus Rimkus at the Vilnius University. The CLIMPEAT project was an international and interdisciplinary Swiss-Lithuanian research collaboration aiming to explore the interconnections and interdependencies of peatlands ecosystems with climate (change), anthropogenic activity and sequestered carbon. In the CLIMPEAT project, the tree-rings of pines was selected as one of the main climate proxies. In this investigation, Dr Johannes Edvardsson (researcher of the Geology Department, Lund University) made an especially great contribution to this project. He performed most to the project part of dendrochronology research. In this work, among other data, Dr Johannes Edvardsson's research results were used, which were published in 2015 in "Science of the Total Environment" and "Plant and Soil" journals.

**The aim of the study** was to (1) investigate in what way radial growth of bog pines is depending on changes of hydrometeorological conditions in the raised bog, and (2) to reconstruct hydrometeorological conditions from dendrochronological indicators.

### **Research tasks**

To evaluate the impact of hydrometeorological conditions on daily and seasonal radial stem changes in raised bog pine trees.

To evaluate the possibility of determining variations in moisture conditions according to the ring width of pine trees growing in different locations.

To evaluate the impact of meteorological conditions and groundwater level on the annual pine tree stem radial increment.

To reconstruct changes in the raised bog groundwater level since the 19<sup>th</sup> century using a multi-indicator method.

### **Relevance and applicability**

The data obtained from this study will increase our understanding about the relation between the pedosphere, atmosphere and anthropogenic impacts, thus contributing to the preservation and rational management of peatbog resources. To understand what impact groundwater level and climate fluctuations have on peatbogs, we reconstructed groundwater changes, foremost from tree-ring series compiled from peatland trees. Thorough knowledge of climate change and its impact on peatbogs and groundwater level is indispensable for ensuring effective management and preservation of these valuable ecosystems. By assessing the changes that have taken place during the Holocene, it is possible to identify periods of peatland colonization by trees, to develop interpretations of historical, climatic and environmental changes in peatlands. Several studies have already identified tree colonization at Lithuanian peatbog (Pukienė, 1997, 2001; Vitas, 2009; Edvardsson et al., 2016b), but further studies from living trees are needed to understand the cause and effects of these tree colonization events.

It is expected that results of this work will benefit researchers working in the areas of environmental protection, biodiversity conservation, wetland hydrology and climate change. On a national scale, this study is expected to provide knowledge indispensable for the development of rational peatbog exploitation strategy in Lithuania. This study is expected to significantly contribute to the assessment of climate and water level changes, their impact on the state of present-day peatbogs as well as peatbog evolution in the future.

### **Scientific novelty and significance of the research**

Over recent years, a great number of studies have addressed the history of raised bogs and their deposits formation based on macrofossil and dendrological data, vegetation (cartographic material) or interpretations of aerophotographs (e.g. Frankl and Schmeidl, 2000; Pellerin and Lavoie, 2003; Linderholm and Leine, 2004; Mauquoy and Yeloff, 2007; Gunnarson, 2008; Eckstein et al., 2010; Edvardsson et al., 2014; Edvardsson et al., 2015a; Stančikaitė et al., 2017). Among the study methods employed, one of the most popular is the dendrochronological method because subfossil pine remains found in peat medium in great amounts provide reliable data (annual) on ecological changes in the past (Leuschner et al., 2002; Edvardsson et al., 2016a).

Analysis of annual growth rings from trees enable accurate dating of tree-ring formation (Fritts, 1976). The potential of this scientific method for the reconstruction of hydrological conditions in peatlands is, however, still underused. There has been a lot of debate about components of individual peatlands and their interactions and connections, anthropogenic activities and the reflection of climate change in peatlands (Šimanauskienė et al., 2008; Linkevičienė et al., 2008; Mažeika et al., 2009; Taminskas et al., 2011; Zinkutė et al., 2015; Kažys et al., 2015; Edvardsson et al., 2015a, b) in recent years in Lithuania. Until recently, studies of peatlands in Lithuania have been episodic (Balevičius et al., 1984; Стравинскене, 1981) and mainly focused on the occurrence of individual peatbogs (Pakalnis, 1987; Bumblauskis, 1983; Pukienė, 1997). The relation between groundwater level and growth dynamics of peatbog pines has, however, not been clearly addressed in many of the earlier studies. Moreover, the determination of changes in the stem radius of raised bog pine trees have not been investigated using dendrometers before this dissertation. The employment of these measurement devices in this study provided new information on short-term interactions between hydrometric parameters and tree changes.

The current study employs complex hydrological and dendrochronological research methods for the analysis of changes in climate and in raised bog water regime, determination of interrelations between meteorological conditions and tree growth, reconstruction of raised bog pine growth in the industrial era. The tree-ring series compiled based on tree studies are used for the reconstruction of groundwater levels. The dendrometric method employed for the investigation of tree radial-growth changes enables determining not only tree increment dynamics but also changes in tree stem girth in general, the physiological state of trees in certain periods of time, as well as its dependence on hydrometeorological conditions and peculiarities of ring formation.

### **Approbation of research results**

A total of 7 articles have been prepared on the topic of this thesis. One of them has been submitted and three articles were published in an international scientific journal with impact factor (Clarivate Analytics Web of Science (WoS)) and the remaining three articles were published in scientific publications included into national and international databases. Presentations of thesis results were made at seven national and international scientific conferences. In addition, eight conference theses were published.

## **Structure of the dissertation**

The dissertation contains the following chapters: Introduction; Literature Review; Methods; Results and Discussion; Conclusions; References; Appendices. The dissertation consists of 176 pages and includes 36 figures and 8 tables. The dissertation is written in Lithuanian with a summary in English.

## **METHODS**

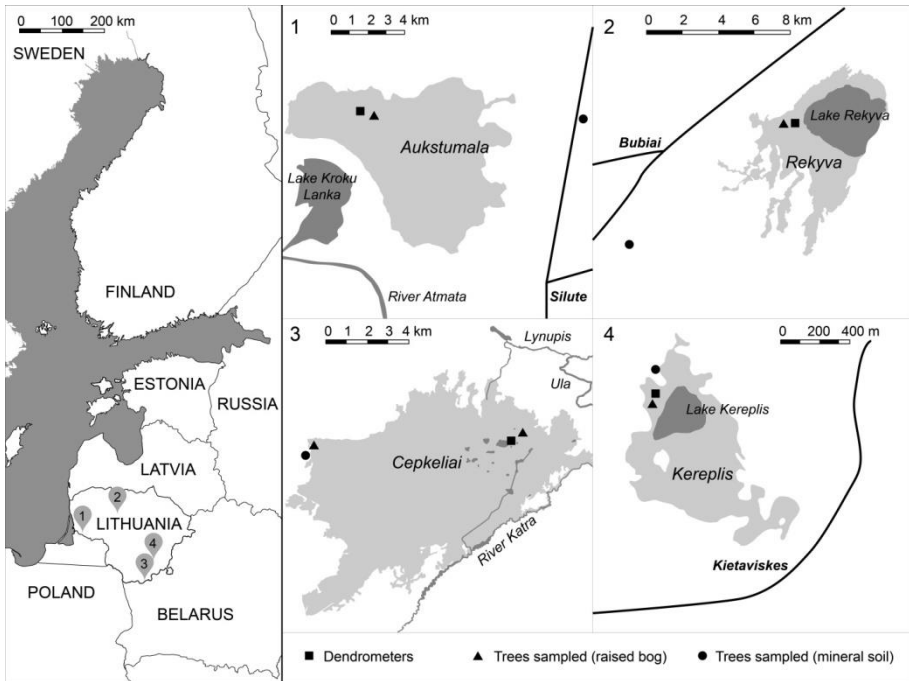
### **Selection of study sites**

Four raised bogs were selected for this study based on data availability, representativeness of the study site sample, state of tree colonization, variation in bog damage degree, and evenness of their distribution throughout Lithuania. The availability of meteorological and hydrological data for the sites, i.e. records of previously conducted hydrometeorological measurements therein, was also taken into account when choosing study sites. To determine relationships between hydrometeorological indices and tree growth, we conducted the hydrological-dendrochronological monitoring. In September–October 2013, six automatic high-resolution band dendrometers (DRL 26) were installed in natural parts of the raised bogs. At the same time, wells with automatic water level and temperature gauges were installed close to those trees.

The Rėkyva wetland complex is located in Šiauliai District Municipality, 140 km east of the Baltic Sea, at 132.5 m a. s. l. Peat- and vegetation-forming processes therein take place in conditions of the transitional marine-continental climate. The Rėkyva raised wetland complex covering an area of 2608 ha has formed in the watershed of the Dubysa, Venta, Nevėžis and Mūša River basins. The study site was chosen in the Aukštelkė raised bog as it has preserved its naturalness until these days. The mean peat thickness therein is 4.8 m, but can locally be as much as 9.6 m.

The Kerėplis wetland complex is located in Onuškis neighbourhood, Trakai District Municipality. Peat- and vegetation-forming processes therein take place in conditions of the continental climate. It is situated in the watershed of the Merkys-Verknė Rivers, 250 km east of the Baltic Sea, at 142.5 m a. s. l. As the southern part of the bog was exploited in 1986–1992, the study site was selected in its north-western part, which is almost a natural raised bog. The wetland complex covers an area of 144 ha. The mean peat thickness is 1.8 m, but can locally be as much as 5.4 m.





**Fig. 1.** Location of study sites in Aukštumala (1), Rėkyva (2), Čepkeliai (3) and Kerėplis (4) wetland complexes.

The Aukštumala wetland complex is situated in western Lithuania, Šilutė District Municipality, the Nemunas River Delta Regional Park, 15 km east of the Baltic Sea, at 5.5 m a. s. l. Peat- and vegetation-forming processes therein take place in conditions of the marine climate. The Aukštumala bog is greatly affected by peat mining and peat mining-related drainage works. The study site was selected in the western part of the bog as it has remained almost unchanged. The Aukštumala bog covers an area of 3018 ha. The mean peat thickness is 2.74 m, but can locally be as much as 6.2 m.

The Čepkeliai wetland complex is situated in the southern part of the country near the border of Lithuania with Belarus, about 270 km southeast of the Baltic Sea, at approximately 130 m a. s. l. Peat- and vegetation-forming processes therein take place in conditions of the continental climate. This wetland complex is located in the watershed of the Katra, Ūla and Grūda Rivers. The bog covers an area of 5858 ha. The mean peat thickness is 2.34 m, but can locally be as much as 6.5 m. The Čepkeliai marsh and nearby areas were almost unaffected by reclamation. However, in the last decades of the 20th century a rapid overgrowth of the marsh with trees was observed.

### **Dendrochronological monitoring *in situ***

Six automatic DRL 26 type dendrometers (two devices in Rėkyva and Aukštumala bogs each, one dendrometer in Kerėplis and Čėpkeliai wetlands each) were installed on approximately 100-year-old pine trees in natural parts of raised bogs in September–October 2013. Measurements were carried out until 2016. Variations in stem girth and air temperature were measured every hour. When selecting trees for device installation, attention was paid to crown defoliation, dechromation of pine needles and stem curvature, which can cause eccentricity of annual rings and mask the climate signal in stem growth dynamics.

So far, there is no unified methodology for assessing radial stem changes (RSCH) in slow-growing trees. Hence, when analyzing and assessing data of automatic dendrometers in this study, we followed several authors. Firstly, the data obtained were reviewed and all atypical measurements were excluded. If at the same study site there were several dendrometers installed, their readings were compared. As dendrometers record changes in stem girth and air temperature, to eliminate erroneous records, we also compared the temperature data obtained from dendrometers. The data obtained from each dendrometer were also compared with those of the nearest meteorological stations. When eliminating atypical measurements, we followed studies performed by Tardif et al. (2001), Deslauriers et al. (2007), Vieira et al. (2013). There were 810 (~4%) rows of hourly data eliminated for the Rėkyva bog, 911 (~5%) for Aukštumala, 763 (~4%) for Kerėplis, and 123 (~1%) for the Čėpkeliai bog.

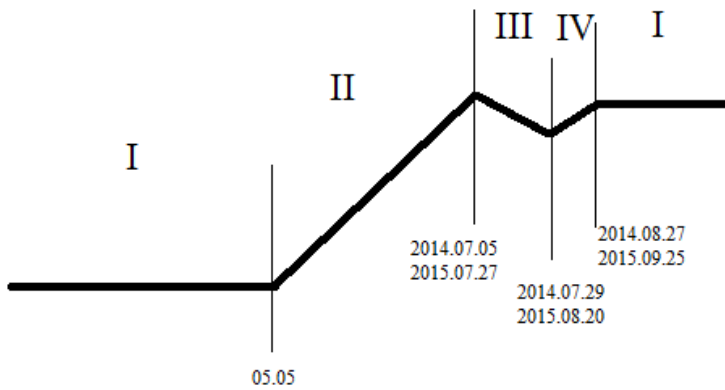
To determine a change in stem girth per given hour, we calculated the difference between two successive data points (Deslauriers et al. 2007). Radial stem changes data were calculated by dividing the stem circumference by  $2\pi$ .

To determine the daily stem cycle, a 24-hour average was calculated (Tardif et al., 2001; Deslauriers et al., 2007; Vieira et al., 2013).

The total intra-annual radial stem change was calculated by subtracting the first initial dendrometer reading on the first day of the year from each initial hourly dendrometer reading value.

For the assessment of the daily cycle of radial stem changes, we calculated averages of stem changes recorded daily at the same hour during a given period (Tardif et al., 2001; Deslauriers et al., 2007; Vieira et al., 2013). The daily cycle of stem changes was calculated for six periods: the dormance period covering the end of autumn, winter and the beginning of spring (period 1); the growth period covering the end of spring and the

beginning of summer (period 2); the summer period of stem contraction (period 3); the period of stem expansion covering the end of summer and the beginning of autumn (period 4); the vegetation period covering periods 2, 3, 4; and the period of the dormance beginning (the beginning of period 1). In the Aukštumala bog, the pre-autumn period of stem contraction was not discerned. The vegetation period is considered to begin when the total daily stem radial change starts increasing continuously (Deslauriers et al., 2007). According to the data for 2014 and 2015, the vegetation period in all the examined raised bogs began as of the first decade of May.



**Fig. 2.** Scheme of total RSCH periods in pine trees growing in Rėkyva, Kerėplis, Čepkeliai and Aukštumala raised bogs in 2014–2015

In assessing RSCH dependence on groundwater level, temperature and precipitation variables, a statistical analysis was applied (Student's t-test, Analysis of Variance (ANOVA) and linear regression model). Daily RSCH data was classified into high ( $\geq 15$  °C) and low ( $\geq 7$  to 15 °C) temperature, different precipitation (0 mm and  $>0$  to 5 mm), as well as high (up to -0.2 m), medium (from -0.2 to -0.3 m) and low (below -0.3 m) groundwater depths (GWD) from peat surface.

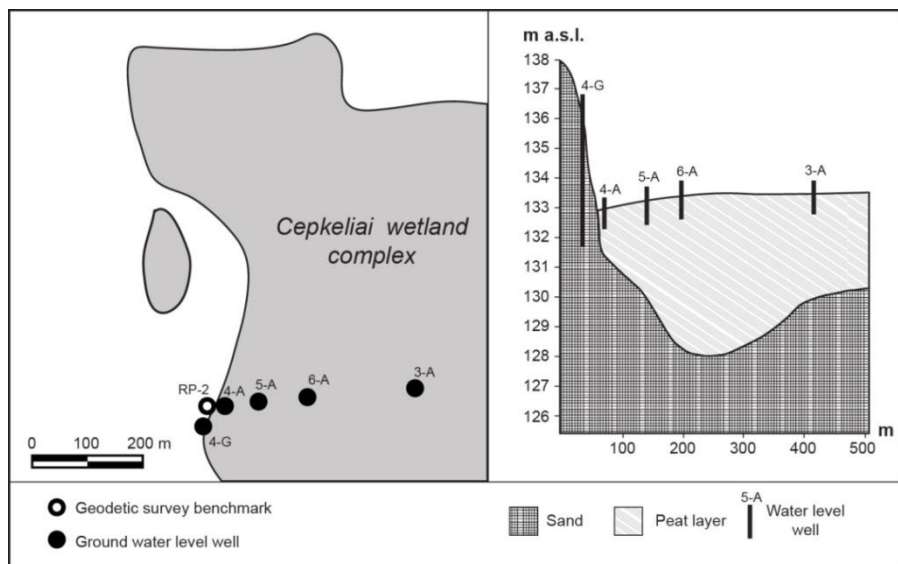
### Hydrometeorological monitoring

Monthly air temperature and precipitation data for 1929–2014 were obtained from the archives of Lithuanian Hydrometeorological Service (LHMT). In case of our study, nearest to the study sites were LHMT Meteorological Stations of Varėna, Šiauliai, Šilutė and Vilnius. In our long-

term studies aimed at determining the dependence of groundwater level on P, P-PET and that of annual tree-rings on meteorological factors, we used data of those meteorological stations that had the longest data row. Potential evapotranspiration (PET) was calculated by the main Thornthwaite's equation (Thornthwaite, 1948).

In short-term investigations (using dendrometer data) aimed at determining the dependence between RSCH and meteorological factors, we used hourly data for the 2013–2016 period. They were obtained from Rėkyva and Marcinkonys meteorological stations. Identifying the deep dormancy phase, data on precipitation and temperature were obtained from Rėkyva meteorology station, and data on cloud cover from Šiauliai meteorology station.

For the reconstruction of groundwater level (GWT) fluctuations, we used the data of the measurements which were conducted manually in Čepkeliai raised bog once in 10 days in April–October throughout the 2002–2014 period, with the accuracy of measurements being 0.01 m.



**Fig. 3.** Location of GWT measurement wells in the north-western part of the Čepkeliai bog (3-A, 4-A, 5-A, 6-A), a GWT measurement well installed in the mineral soil in the continental dune (4-G), and location of the geodetic survey benchmark (RP-2)

In wells, GWT was measured according to the absolute height. When converting groundwater level data into groundwater depth data, the bog

surface near the well was assumed to be of zero height. The bog surface was determined by compressing the acrotelm vegetation. In this study, we used the findings of the measurements conducted in five water table wells in Čepkeliai bog.

To determine the quality of the performed reconstruction of raised bog GWT values, we used the data of the Smalininkai water measuring station, which has a long Nemunas River discharge data row covering the period since 1812.

In order to conduct short-term investigations using dendrometer data, there were measuring stations set up in Rėkyva, Aukštumala, Kerėplis and Čepkeliai wetland complexes. At these stations, next to the pine trees with dendrometers measuring their girth development, there were wells equipped with automatic GWT, temperature and atmospheric pressure gauges (SOLINST Levelogger Gold, Barologger Gold) installed. GWT data from the Čepkeliai raised bog were not recorded because of the failure of the device. The installed equipment allowed carrying out hourly measurements throughout the 2013–2016 period.

### **Tree sample collection and dating**

Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) trees were sampled at Aukštumala, Čepkeliai, Kerėplis and Rėkyva raised bogs for the development of tree-ring chronologies. The sample collection, dating and chronology creation were carried out in cooperation with partners from Switzerland and Sweden. During the fieldwork in May, September of 2013 and in April, September, October of 2014, 344 samples of pine trees were collected. Two tree-ring chronologies were compiled for each locality – one developed from trees growing on the raised bogs, and one from the trees growing on mineral soils in the vicinity of the bogs. For more detailed information about the tree sampling and development of tree-ring chronologies, see Edvardsson et al. (2015a, b). In total, 63 samples of pine trees were collected from Kerėplis bog, 52 from Rėkyva bog, and 56 samples from Aukštumala. Respectively, 22, 20, and 15 samples of pine trees growing in the mineral soil near these bogs were collected. Three further chronological sequences of tree rings were compiled for the Čepkeliai raised bog – two sequences from trees growing in the raised bog and one sequence from trees growing at mineral soil. For more detailed information about the tree sampling and development of tree-ring chronologies see Tamkeviciute et al. (2018). A total of 96 tree samples were collected from the raised bog: 49 from the eastern edge of the bog (alongside the educational trail) and 47 from the western, watershed part

of the bog (at Lake Ešerinis). From the mineral soil, samples from 20 pine trees were collected. The tree samples were taken with an increment corer employing a standard technique (Fritts, 1976). For the development of tree-ring chronologies (RW), we used tree-ring measurements accurate to 0.01 mm, standard dendrochronology equipment (measurement table Lintab 5 and TSAPWin software (Rinn, 2003)) and the cross-dating technique (Fritts, 1976; Schweingruber, 1988; Cook and Kairiukstis, 1990).

Samples of earlywood (EW) and latewood (LW) from Čepkeliai and Rékyva raised bogs were measured separately. Cross-dating and measurement quality as well as chronology accuracy were assessed using TSAPWin and COFECHA software. Thereafter, the ARSTAN (Cook, 1985) program was used to construct the chronology of the study site from the reliably cross-dated series.

To reduce non-climatic changes and trends related to the influence of tree age and geometry, the RW data were standardized and indexed (Fritts, 1976; Cook and Kairiukstis, 1990). Three chronologies were constructed: Raw (average ring width data, mm), STD (standardized dimensionless tree-ring indices), and RES (residual chronology corrected for autocorrelation). Such functions as “negative exponential trend”, “spline”, “variable span smoother” described by Cook and Peters (1981; 1997) and Friedman (1984) were used in the process of standardization, which was performed using the ARSTAN\_41d program (Cook and Krusic, 2006). Reliability and dispersion of tree-ring chronologies were determined using “expressed population signal” (EPS) (Wigley et al., 1984) and “running rbar” functions (Cook and Kairiukstis, 1990). The safety margin, i.e. when data were considered to be reliable, was determined for periods when  $EPS \geq 0.85$  were reached (Wigley et al., 1984).

### **The use of dendrochronological data for the indication of hydro-meteorological conditions**

To determine relationships between climate variables and tree-rings, we used the program DendroClim2002 (Biondi and Waikul, 2004). We attempted to detect potential relationships between RW chronologies (Raw, RES, STD, distinguishing EW and LW) of pine trees growing in different raised bogs and monthly meteorological variables. To determine temporal changes of these relationships, we chose the function of 24-year long evolutionary and moving intervals. The mean monthly temperature ( $T_{vid}$ ), monthly precipitation amount (P) and the difference between precipitation and evapotranspiration were calculated for the 86-year long period from 1929 to

2014. In the study, we also used the maximum and minimum monthly temperature values of the 1947–2014 period. The results obtained employing bootstrap correlation are presented in this paper graphically. However, not all the values computed using this program were reported in this paper, just the longest year intervals with statistically significant correlation values. The most robust correlation results were obtained using the RES chronologies. The results presented and discussed in this dissertation are therefore primarily based on the analyses using RES chronologies.

To determine the best indicator of GWT in the raised bogs and to reconstruct GWT, we attempted to determine the relationship between annual GWT and the 1–10-year amount of P or P-PET sums. In order to extend GWT reconstructions, we determined relationships between GWT and annual ring chronologies. For that purpose, we used Pearson's correlation and regression analyses. Lagged correlations between hydrological, meteorological, and dendrochronological data were computed to quantify potential lag effects. Nonlinearity between RW and GWT was determined by nonlinear regression analysis. Segmented regression with a breakpoint at the vertex of best fit second order polynomial curve was used to establish the interval of GWT fluctuations in which linear regression model could be applied. Separate calibration (1986–2012) and independent verification (1935–1964) periods were used to validate the GWT reconstruction models based on our RW series developed from peatland pines. The Nemunas River runoff data were thereafter used to validate the GWT reconstructions obtained for the Čepkeliai raised bog. Then, based on the reconstructed groundwater level data, we tried to elucidate why in certain years annual ring formation was most strongly impacted by P and P-PET values. This study presents periods of significant correlation between P and P-PET values and annual tree-rings, which were revealed using the DendroClim2002 program, GWT trends during these periods and their reliability.

## **RESULTS AND DISCUSSION**

### **The impact of hydrometeorological conditions on daily and seasonal radial stem changes**

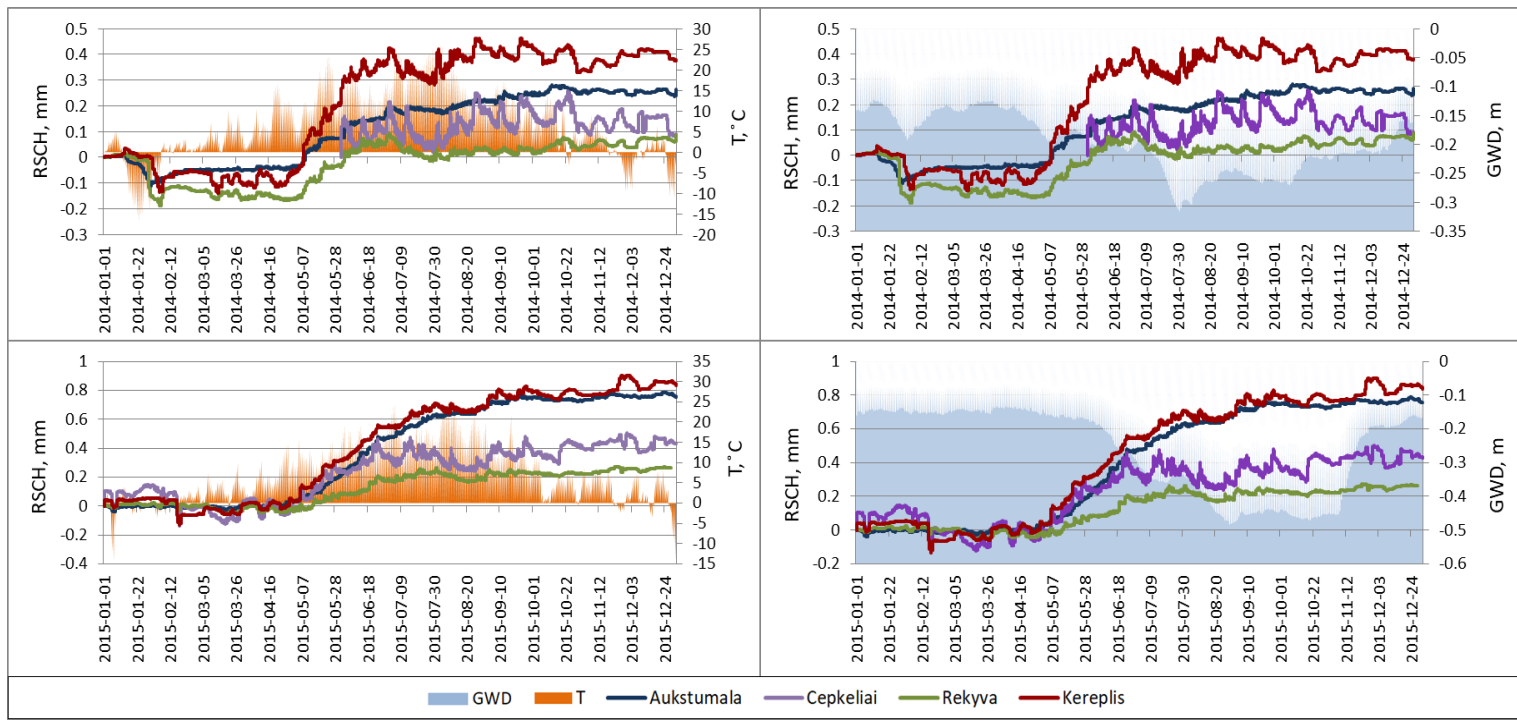
The sensitivity of trees to meteorological conditions depends not only on the biological properties of the trees or on the stand's hydrological regime determining the structure of the root system, but also on the period when separate tree-ring parts are formed. Based on other authors' investigations (Turcotte et al., 2009), the total RSCH occurring in the course of the year

can be divided into separate periods depending on stem swelling, shrinking, and dormancy (Fig. 2). Dendrometer data rows show that the total positive RSCH increase occurs from the beginning of May to the end of July (period 2), and later the growth curve reaches the stationary level. Stem shrinking (period 3) was observed in July of 2014 and in August of 2015, which could be due to moisture deficit – extremely low GWT. In 2014 and 2015, a slight summer stem shrinking was observed in the Aukštumala raised bog. Such discrepancy in periods can be due to a lower degree of continentality and a greater amount of precipitation in the Aukštumala raised bog. Aukštumala is located merely 15 km away from the Baltic Sea, whereas the Rėkyva raised bog is ~140 km away from the sea, Kerėplis raised bog ~250 km, and Čepkeliai raised bog ~270 km away from the sea. This would allow making a presumption that period 3 – RSCH decrease during the vegetation period – occurs as a result of extreme fall of GWT in raised bogs (30 cm below peat surface). In 2014–2015, Aukštumala's GWT during period 3 was not lower than 30 cm below peat surface.

At the beginning of the vegetation period, we observed a rather clear direct dependence of the total positive RSCH increase on increase in air temperature, whereas the effect of GWT was opposite – with GWT decreasing the total positive RSCH was increasing (Fig. 4). In 2014–2015, the vegetation period started at the beginning of May when the average 24-hour temperature was above 7 °C (Fig. 4). It seems that the main factor during the investigation period was temperature above 7 °C, and its alterations in the course of the period did not significantly affect RSCH. The effect of GWT change on RSCH is illustrated in Fig. 4. With GWT falling, stem diameter was increasing, and vice versa; however, when GWT dropped lower than 20 cm below peat surface, dependence changed – the falling GWT induced decrease in stem diameter, and vice versa.

The RSCH might be considerably affected by a rather cold winter of 2014 and low air temperature before the onset of the vegetation period (period 1). Long-lasting colds at the beginning of 2014 could affect a sharp (less than within a month) total increase of negative RSCH. In all raised bogs, the total negative RSCH increased up to 0.2 mm. The radial stem increment of all trees was twice or more times lower in 2014 compared to 2015. The greatest annual increment was recorded in pines of the Kerėplis raised bog (~0.4 mm in 2014, ~0.8 mm in 2015), followed by Aukštumala (~0.3 mm in 2014, ~0.8 mm in 2015), Čepkeliai (~0.1 mm in 2014, ~0.4 mm in 2015), and Rėkyva (~0.1 mm in 2014, ~0.2 mm in 2015).



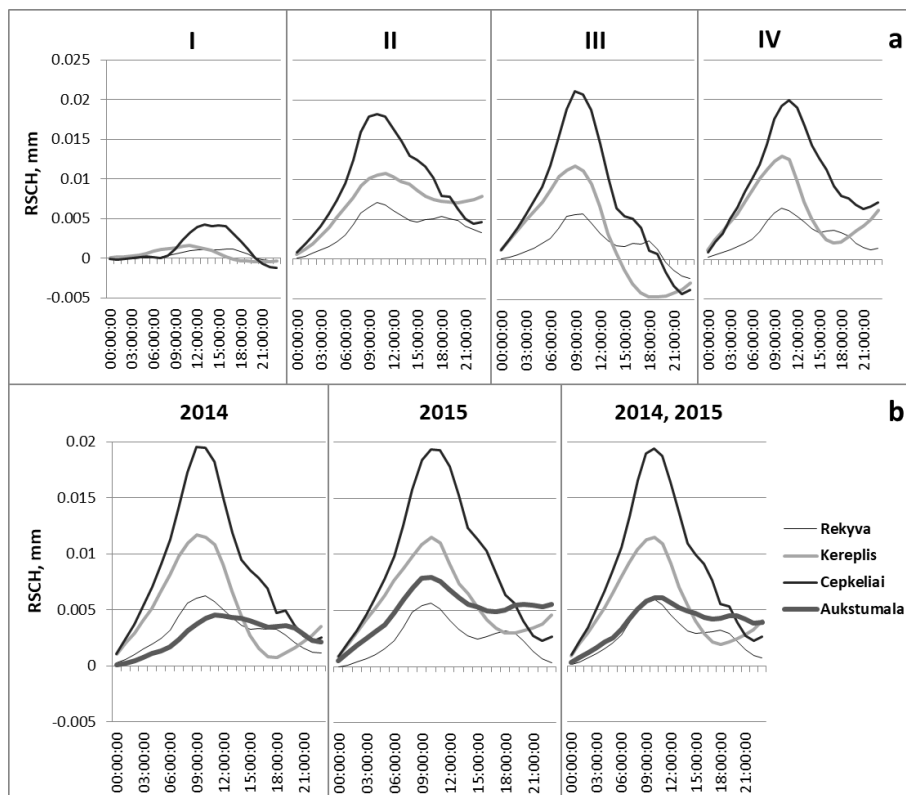


**Fig. 4.** Total RSCH, mean daily temperature (T) in bogs, and average GWD in 2014–2015. The Figure presents GWD data from Aukštumala, Kerėplis and Rėkyva raised bogs.

The investigation of the beginning of period 1 enabled identifying the onset of the deep dormancy phase in the investigated bogs. Temperature had the greatest impact on the change of tree dormancy phases. We can see that dormancy delayed for several days in the areas of a lesser degree of continentality, i.e. closer to the sea. During the investigation period, when temperature fell below 7 °C in the raised bogs, the deep dormancy phase started and fluctuations in stem girth change decreased. However, the dendrometers data obtained in the Aukštumala bog did not show a clear beginning of the deep dormancy phase at that period. After November 5th, the mean 24-hour temperature fluctuated around 6 °C in Aukštumala, whereas in Rėkyva and Kerėplis it was already about 4 °C. At the beginning of the dormancy phase, the greatest stem girth decrease was recorded on the days without precipitation. Stem girth changes also depended on cloud cover, which was most probably related with the amount of water in stem tissues. This was determined based on stem girth decrease under conditions of a small amount of clouds and absence of precipitation. From our data analysis, we can see that positive daily stem changes were recorded for days when the mean daily temperature was >4 °C, with precipitation ( $P > 0$  mm), and a great amount of clouds (8–10 points). The maximum daily stem girth changes occurred when the mean 24-hour temperature exceeded 8 °C. The period of the beginning of the dormancy phase allows improving our understanding of the impact of meteorological conditions on tree physiology and growth as well as on stem girth changes. A more detailed investigation of this period can be found in Tamkevičiūtė et al. (2014).

The investigation of the impact of hydrometeorological conditions on daily RSCH revealed that during the vegetation period tree stems were swelling until 9:00 a.m. when they reached the maximum in all bogs. Then stems began shrinking slowly up to around 10:00 p.m. Such process was observed in all bogs, except for Kerėplis. Most often, the daily cycle of RSCH shows stem tissue supply with water. The daily cycle of RSCH also largely depends on air temperature. Tree stems are swelling at sunrise when more water is taken from soil than lost through transpiration. When temperature rises and water absorption through roots does not satisfy water demand because of more intensive transpiration, stem water storage decreases wherefore tree cells shrink and the stem gets narrower. With the daylight fading, transpiration gets slower and the stem starts swelling again due to water accumulating in it. The greatest daily RSCH amplitude was observed in Kerėplis and Čepkeliai raised bogs. This, in our opinion, could be explained by the fact that the pines investigated in Kerėplis and Čepkeliai

were of younger age and therefore distinguished from other investigated pines by a greater relative volume of sapwood, through which water circulates.



**Fig. 5.** RSCH daily cycles in periods I, II, III, and IV of 2013–2015 (a) and in the vegetation period of 2014 and 2015 (b)

During the non-vegetation period, GWT fluctuated within 0.1–0.2 m below peat surface in all studied bogs. In the vegetation period, each bog experienced a different GWT fall. The greatest GWT reduction was recorded in Kerėplis (e.g. in 2015, the water table dropped lower than 0.6 m from peat surface), whereas in Rėkyva it dropped not more than 0.5 m, and in Aukštumala merely about 0.3 m below peat surface. This is most probably the reason why daily cycles of trees growing in Kerėplis are different from those observed in the other raised bogs. Most probably, low GWT is the reason why daily cycles of stem growth in Kerėplis during the vegetation period are mostly similar to the daily cycles of pines growing in mineral soils – become similar to a sinusoid (King et al., 2013; Vieira et al., 2013).

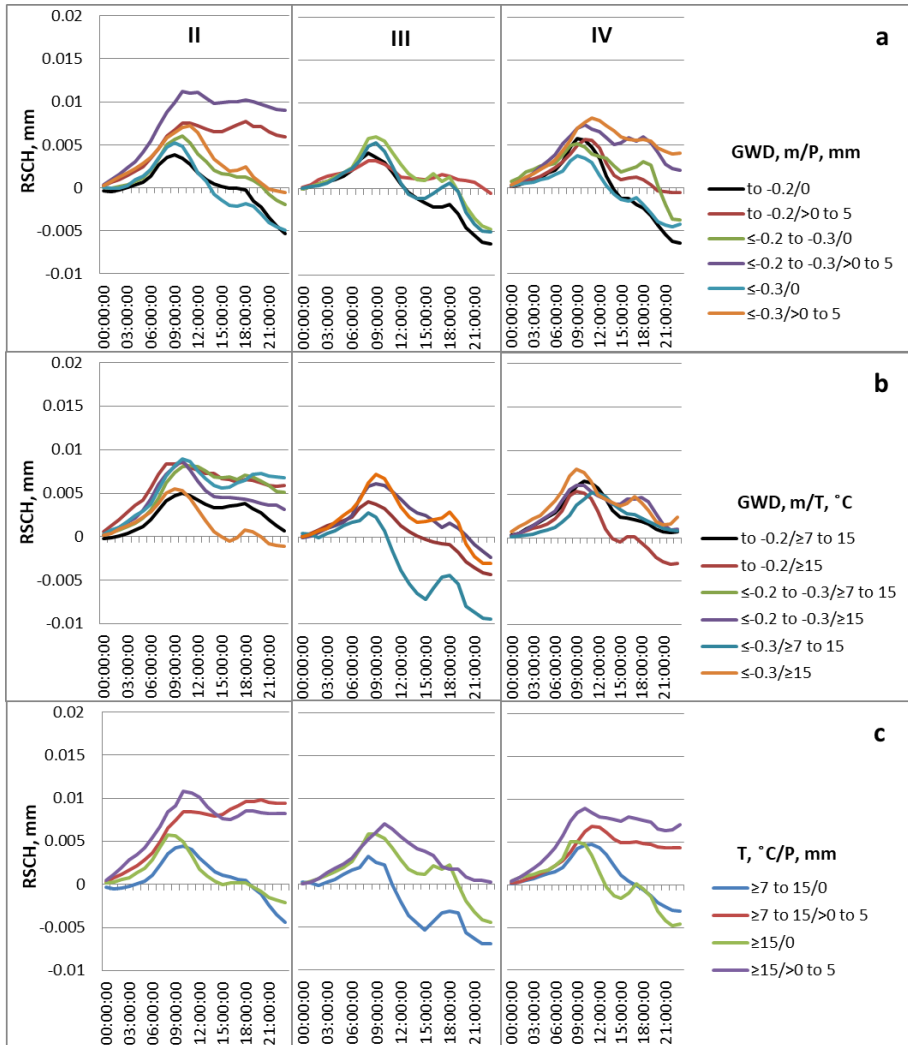
In other bogs, a second (less significant) stem swelling peak was observed around 6:00 p.m. At that time of the day, dendrometer temperature sensors recorded temperature rise. For this reason, temperature error was taken into consideration (De Belder, 2015) and it was found that temperature changes did not have any effect on the measuring device. It is likely that additional amount of moisture appears in the air after 3:00 p.m. due to intensive evaporation in the entire bog tree environment. Such moisture induces stem swelling up to 6:00–7:00 p.m. Most probably, temperature rise that dendrometer temperature sensors recorded around 6:00 p.m. (1–2 °C jump was recorded at 6:00 p.m.) was kind of a short-term hothouse effect caused by water vapour condensation in the bog. This is however only a hypothesis the proof whereof requires additional investigation.

A detailed analysis of RSCH dependence on climatic factors during period 2 in the Rėkyva raised bog demonstrated that RSCH was mostly affected by precipitation (Fig. 6 (a, c)). Precipitation creates favourable conditions for stem swelling. GWT impact on pines largely depends on temperature. Under lower temperatures (7–15 °C), low and average (lower than 0.2 m from peat surface) water levels were more favourable for stem swelling. Low temperatures slowed down transpiration intensity wherefore stem swelling accelerated. With GWT rising (higher than 0.2 m from peat surface), higher temperatures (above 15 °C) became more favourable (Fig. 6 (b)). High groundwater level creates unfavourable conditions for tree growth, and higher temperature activates transpiration and regulates water balance and thus creates more favourable conditions for tree growth.

With the vegetation period reaching the turning point and with the beginning of period 3, high temperatures (>15 °C) and precipitation became the most favourable factors for stem swelling, whereas GWT did not have any effect. This was most probably due to significant GWT variations during the investigation period, which excluded GWT from factors limiting tree growth during period 3. In most cases, stem diameter decreased in period 3. In days with favourable conditions (high temperature and precipitation) stem diameter remained unchanged. There is no sufficient data to establish relationship between low temperature, GWT and RSCH during this vegetation period.

During period 4, stem diameter mostly increased in days with precipitation, low and average GWT (<0.2 m below peat surface) and temperature exceeding 15 °C above zero. During period 4, otherwise than during period 1, a very low GWT (<0.4 m below peat surface) and high temperature prevailed. In period 4, GWT was the lowest, but low

temperatures at night increased the amount of condensate in acrotelm. It most presumably compensated water deficit caused by low GWT. Condensate and even a small amount of precipitation satisfied water demand necessary for pine growth, and in the days when air temperature was rather high, favourable conditions for pine growth occurred.



**Fig. 6.** Dependence of RSCH daily cycles on groundwater depth and precipitation (a), groundwater depth and temperature (b), and temperature and precipitation (c) in the Rėkyva raised bog during vegetation periods of 2014 and 2015

During all periods, precipitation created favourable conditions for tree stem swelling. In the absence of precipitation, the average GWT (0.2–0.3 m below peat surface) was the most favourable factor for tree growth. The RSCH daily cycle was visible only when precipitation did not exceed 5 mm, because with precipitation exceeding this limit stem swelling prevailed, which "hid" the RSCH daily cycle. The greatest stem shrinking was observed on the days without precipitation.

Based on statistical analysis (Student's t-test, ANOVA), statistically significant differences ( $p < 0.005$ ) were obtained by comparing RSCH classified into different precipitation groups (0 mm and  $>0$  to 5 mm) throughout the vegetation period (periods 2, 3 and 4). Statistically significant differences between RSCH data groups during the vegetation period were also determined at average (from -0.2 to -0.3 m below peat surface), compared to high (up to -0.2 m) and low (below -0.3 m) groundwater depths. The highest positive RSCH was determined at this level (from -0.2 to -0.3 m) of groundwater depth. Significant differences between RSCH data groups at different temperatures ( $\geq 7$  to 15 °C and  $\geq 15$  °C) were determined only during period 2. A regression analysis showed a positive statistically significant ( $p < 0.005$ ) precipitation effect on daily RSCH (i.e. a higher amount of precipitation statistically significantly predicted increase in stem girth). Evaluating the impact of air temperature on RSCH, a positive statistically significant ( $p < 0.005$ ) temperature effect on the daily RSCH (i.e. rising air temperature statistically significantly predicted increase in stem girth) was determined during period 2.

### **Radial stem changes under different humidity conditions**

From the Aukštumala raised bog, a tree-ring width chronology covering the period 1922–2012 has been developed (Edvardsson et al., 2015a, b). The mean annual pine increment was 0.8 mm in the period of 1922–2012, whereas the pines growing in the mineral soil near the raised bog formed 2.4 mm ring width on average in 1945–2012. Correlation between samples taken in the raised bog and in the mineral soil was significant in the case of Raw RW ( $r = 0.65$ ,  $p < 0.00001$ ) and insignificant in the case of Res RW ( $r = 0.26$ ,  $p < 0.05$ ).

From the Kerėplis raised bog, a tree-ring width chronology covering the period 1866–2012 has been developed (Edvardsson et al., 2015a, b). The mean annual pine increment was 0.6 mm, whereas the mean annual increment of pines in the mineral soil near the raised bog was 1.1 mm (the data of 1866–2012). Correlation between chronologies from bog and mineral

soil was significant (Raw RW  $r=-0.35$ ,  $p<0.00001$ ; Res RW  $r=0.34$ ,  $p<0.0001$ ).

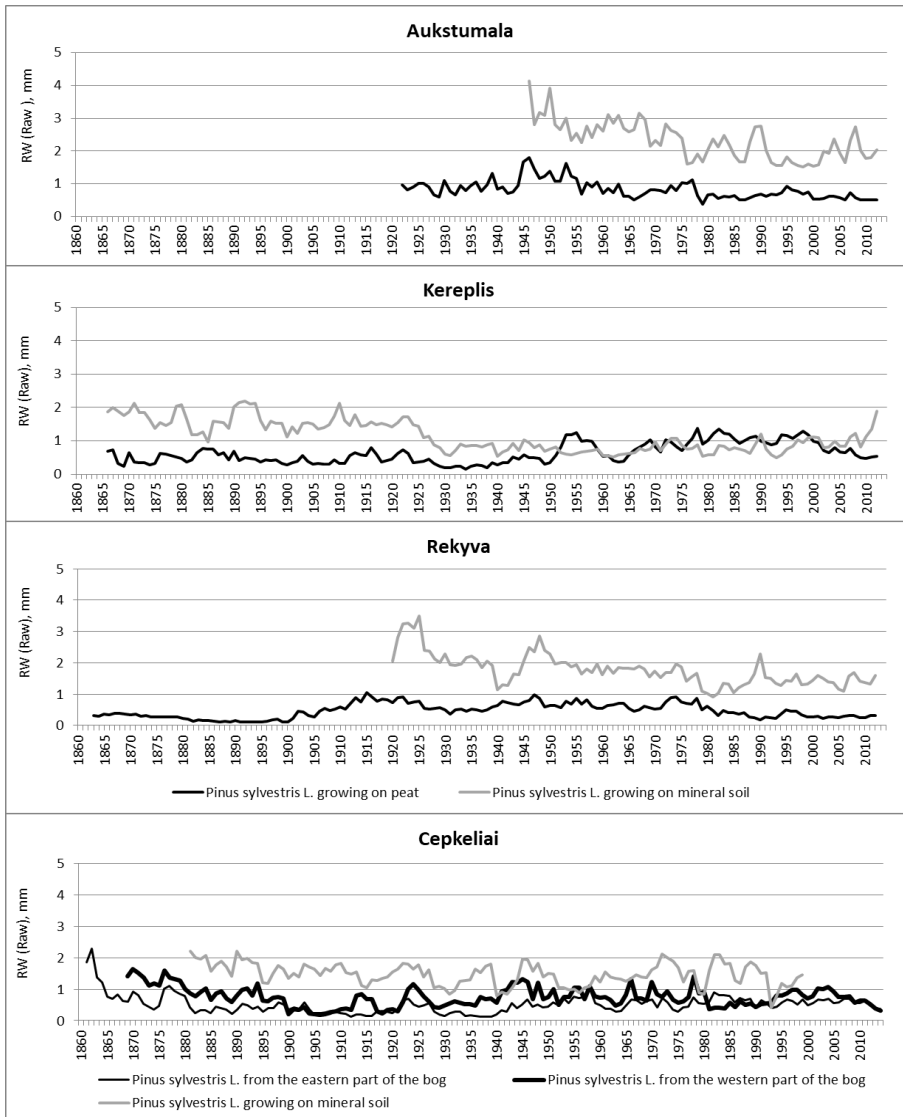
The tree-rings from Rėkyva raised bog pines (Edvardsson et al., 2015a, b) show a mean annual increment of 0.5 mm (1863–2012), whereas pine increment in the mineral soil near the raised bog was 1.8 mm per year on average (1920–2012). Correlation between chronologies from bog and mineral soil was significant (Raw RW  $r=0.52$ ,  $p<0.00001$ ) or insignificant (Res RW).

From the Čepkeliai raised bog, a tree-ring width chronology covering the period 1860–2014 has been developed (Tamkevičiute et al., 2018). The mean annual increment of pines was 0.5 mm near the lagg (western part of the bog) and 0.7 mm in the eastern part of the bog near Lake Ešerinis (in the watershed). However, for the pine trees growing in the mineral soil adjacent to the bog, the average ring width was 1.5 mm (1881–1999), which shows what great impact the moisture in the peat bog had on radial tree growth. Pine growth trends in western and eastern parts of the bog were similar. Correlation between samples taken near Lake Ešerinis and in the western part of the raised bog was significant (Raw RW  $r=0.52$ ,  $p<0.00001$ ; Res RW  $r=0.55$ ,  $p<0.00001$ ). Correlation between trees growing in the mineral soil and trees growing in the peat of the raised bog was insignificant.

Although significant correlation was established between the Raw chronology data in the above cases; however, the Student's t-test did not show trees increment data similarities between Raw chronology data pairs. Evaluating Res chronology (when each series' autoregression was removed) indices of pines growing in different soil, the highest significant correlation ( $r=0.34$ ;  $p<0.00001$ ), as expected, was found among annual rings of pine trees in the Kerėplis raised bog and in the mineral soil near the bog. Similarity between pine trees growing in this raised bog and in the mineral soil was also noticed by analyzing dendrometer data, i.e. evaluating the daily cycles.

The greatest annual ring width changes reflecting changes of hydrological conditions were recorded in Aukštumala in 1942–1980, in Kerėplis in 1952–2000, and in Rėkyva in 1900–1980. Changes in Aukštumala and Kerėplis could be due to the drainage of bogs during peat exploitation, while in Rėkyva due to lake water level regulation, drainage of bog area round the lake, and installation of an unregulated threshold.

Quite strong covariance was found between ring width of pines growing in the raised bogs, except for the individual cases discussed above.



**Fig. 7.** Annual ring width change in raised bog pines under different humidity conditions. The Figure presents Raw chronology data (mm) with no less than 10 tree chronological sequences in the same year

Comparing tree-ring data of different raised bogs, similar changes in stem increment were found among all raised bogs' TRW data pairs (65–97% confidence interval on the similarity between the means). It shows that in the past 150 years the growing conditions in the studied raised bogs could have been similar, which apparently was mainly due to the hydrological regime of the bogs. Based on the correlation coefficients and similarity of the raised



bogs' TRW data sequence during the period of 1922–2012, similar changes of tree increment were determined between the following bog pairs: Čepkeliai and Kerėplis ( $r=0.54$ ,  $p<0.00001$ ); Rėkyva and Kerėplis ( $r=0.36$ ,  $p<0.001$ ); Rėkyva and Čepkeliai ( $r=0.24$ ;  $p<0.05$ ). Lower similarity between the data sequence (65–70% confidence interval on the similarity between the means) and/or lower correlation coefficients were determined between the following raised bogs' TRW data pairs: Aukštumala and Kerėplis ( $r=0.23$ ;  $p<0.05$ ); Aukštumala and Rėkyva ( $r=0.33$ ;  $p<0.01$ ). There was no significant correlation between the TRW chronology of Aukštumala and Čepkeliai. Higher correlation coefficients were obtained between ring width indices of all pines growing in mineral soils (Res chronological data), which indicates that climate influences tree growth at mineral soils in a similar manner across almost entire Lithuania.

A strong correlation between raised bog ecosystem changes and specific ontogenesis determined weak correlation between tree-ring width and meteorological parameters in particular years. Due to site-related lag and feedback effects in the peat bogs, the growth response to various climate-related changes may not be synchronous for pine trees growing in different raised bogs. Stem increment for trees growing in raised bogs depends on specific features such as groundwater level, peat layer thickness, water infiltration properties, and tree root system development (Läänelaid, 1988; Linderholm et al., 2002; Edvardsson et al., 2016a). As a result, the increment for trees growing in mineral soils of different habitats in Lithuania always generated significant correlation values, whereas correlation tests between tree increments representing different peat bogs resulted in weak correlation values or absence of correlation.

### **The impact of meteorological conditions on (intra-)annual tree increment**

The Čepkeliai raised bog was chosen for a detailed investigation of the impact of meteorological conditions on annual pine increment. As a result, the EPS values of Raw, STD, and RES chronologies exceeded the statistically accepted threshold of  $EPS > 0.85$ . Out of 50 dated trees, 26 were chosen for early wood (EW) and late wood (LW) measurements.

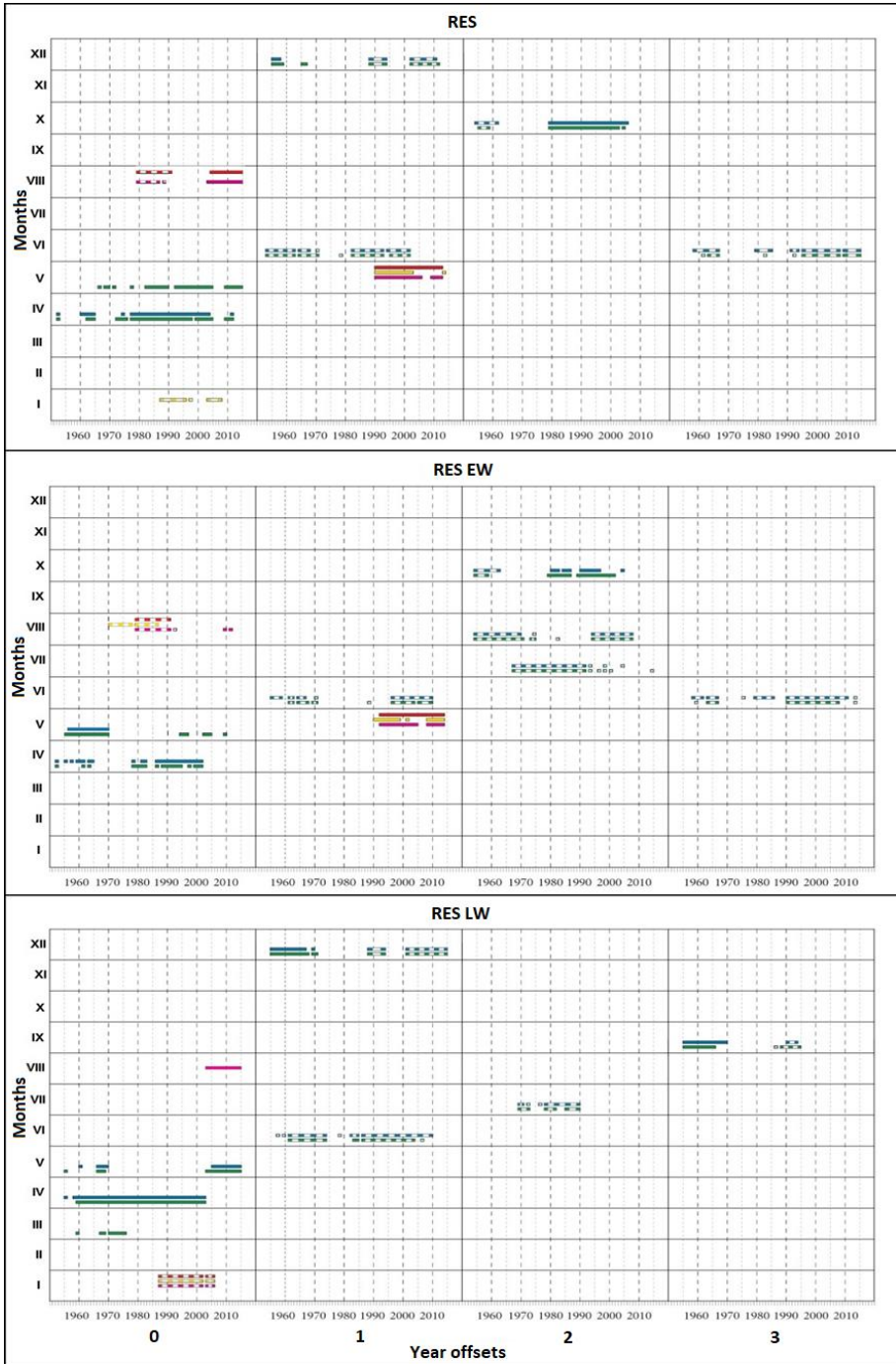
An assessment of temperature impact on annual rings of raised bog pines showed that the strongest negative impact on annual ring growth was exerted by January temperature extremes of the current year (LW). A positive impact on ring formation was exerted by the May temperature of the previous year (EW). The results of investigation of raised bog pines also

show a strong impact of the August temperature of the current year. In 1970–1994, a negative impact of August temperature on EW was observed. In 2003–2014, a positive impact of August temperatures was recorded on LW. A different (positive and negative) impact of August temperature on annual ring formation could most probably be due to precipitation. The mean monthly precipitation amount in August months of 1970–1994 was nearly half less than in August months of 2003–2014. The greatest significant negative impact of the current year's July and August temperatures on annual pine increment was also observed in Abakan region, Russia (Shah et al., 2015). The impact of other months' temperatures on pine growth was found to be insignificant during the investigation period.

Our investigations from the Čepkeliai raised bog showed that annual tree-ring formation for bog pines was mostly positively affected by P and P-PET of April and May of the current year. This could be explained by GWT drop from mid-spring, when pine trees that grew in areas of surplus humidity and had a surface-spreading root system did not reach water. This was particularly characteristic under variable climate conditions when sufficient water stocks did not form in winter. Before 2002, annual ring formation was mostly affected by April P-PET. For nearly a decade (1967–1976) tree-ring formation was also greatly influenced by March P-PET, whereas during 2003–2014 the impact of P-PET on tree-ring formation was mostly felt in May, but not in April, i.e. a month later. This could be due to global climate change, which causes warmer winters and a greater amount of precipitation during the cold part of the year.

Evaluation of long-term impacts of P and P-PET on annual ring formation shows that summer precipitation negatively affects ring formation, and such effect usually manifests in the following year and can be felt still for two years. A negative impact on tree-ring formation was observed to be made by previous June's P and P-PET in different annual ring chronologies throughout the entire period of investigation as well as by P and P-PET of summer or early autumn months before two or three years.

A great (both positive and negative) impact on annual pine increment in different periods was made by P and P-PET of September before three years, October before two years, and December of the previous year (could be seen in different RW chronologies). After examination of GWT trends of these periods it was found that P and P-PET, depending on GWT decrease/increase trend, respectively, positively/negatively affected annual ring formation.



**Fig. 8.** Bootstrap Correlation significant values between the RES, RES EW, RES LW chronology and environmental variables:  $T_{max}$  (red bars),  $T_{min}$  (yellow bars),  $T_{av}$  (purple bars), P (blue bars) and P-PET (green bars). Solid and striped bar indicates positive and negative correlation, respectively.

### **Reconstruction of groundwater level fluctuations in a raised bog by using several methods**

In order to extend a series of groundwater level fluctuations, a two-step modelling was applied: (i) extension of GWT instrumental measurement series for 1935–2014, based on P-PET; and (ii) GWT fluctuation reconstruction for 1870–2014, based on *Pinus sylvestris* RW series. The highest significant correlation value ( $r=0.92$ ,  $p<0.00001$ ) was found between the mean annual GWT in the well 4-A located near the bog lagg and the sum of seven years' P-PET ( $\sum_7$ ). The linear dependence of the modelled groundwater table (MGWT) can be expressed by the following equation:

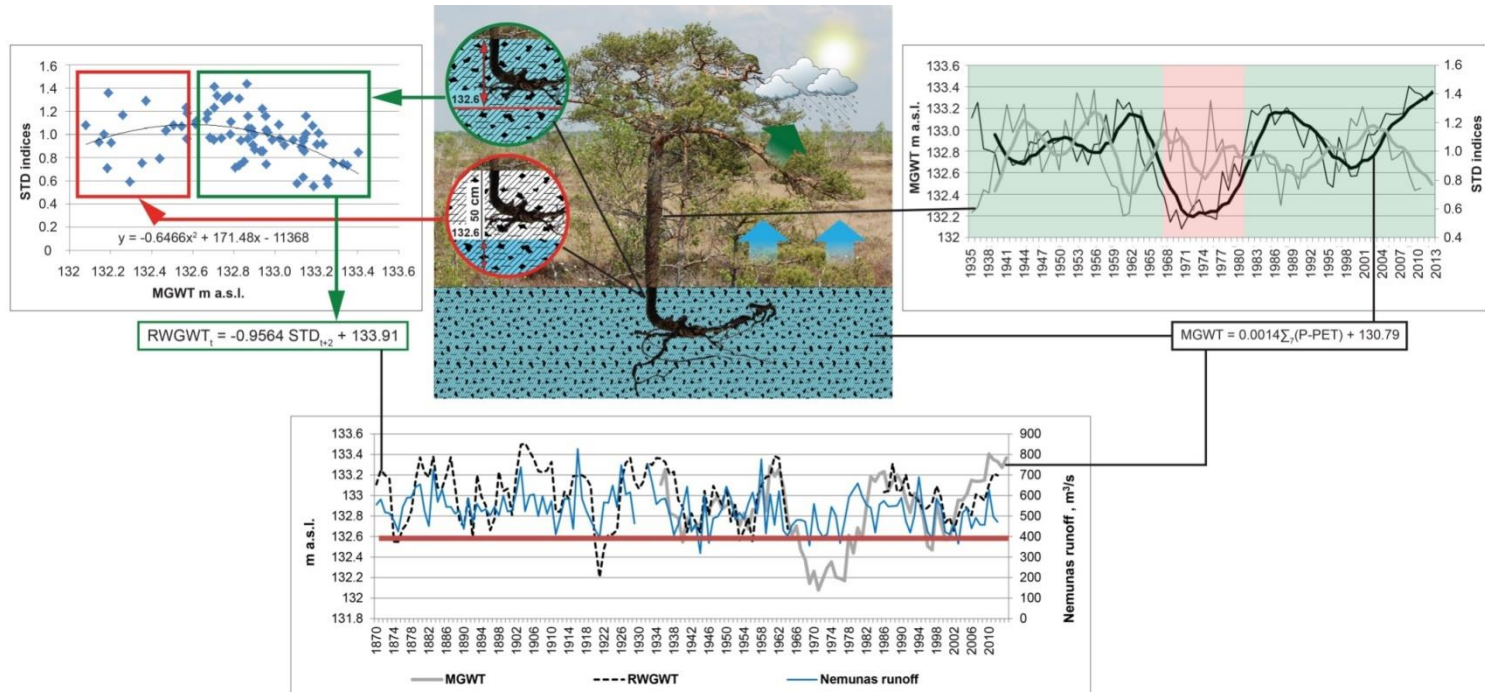
$$\text{MGWT}=0.0014\sum_7(\text{P-PET})+130.79$$

Investigations demonstrated that P-PET correlation with GWT depended on the location where GWT was measured. The highest significant correlation with annual GWT was recorded in the well nearest to the lagg. This could be due to the fact that lagg water resources better reflect moisture conditions throughout the bog, whereas in other bog places GWT more depends on the bog's micro-relief.

The correlation tests between MGWT and annual tree-ring width (RW) show a non-linear dependence, which was divided into variables when MGWT was below 132.6 m a.s.l. (50 cm below peat surface) and above 132.6 m a.s.l. A linear dependence between RW and MGWT was established when groundwater level was 50 cm or less below peat surface. When groundwater level dropped below this level, on the other hand, no reliable linear dependence existed anymore. The strongest significant correlation coefficient ( $r=-0.604$ ,  $p<0.00001$ ) was found between MGWT and STD chronology indices with a two-year shift, when MGWT was above 132.6 m a.s.l. The delayed effect of GWT fluctuations on tree-ring formation shows that GWT effect on tree-rings in bogs can manifest after 2 years.

A segmented regressive analysis was used to create a linear regression model, and the validation of the created model was performed using calibration (1986–2012) and verification (1935–1964) periods (according to Gordon, 1982). Calibration period's correlation coefficient between MGWT and STD chronology with a two-year shift was  $r=-0.602$ ,  $p<0.001$ . The following linear regression equation was created for this period:

$$\text{RWGWT}_t=-0.9564 \text{ STD}_{t+2}+133.91$$



**Fig. 9.** The diagram of relationship between raised bog pine RW and GWT. On the left – RW dependence on mean annual MGWT in different intervals according to MGWT fluctuations. Blue colour indicates a negative dependence of RW when MGWT is above 132.6 m a.s.l., red colour indicates a positive dependence in extremely dry years. On the right – a diagram of relationship between RW of pines (with a two-year shift) and mean annual MGWT (in 4-A well) in Čepkeliai raised bog. At the bottom – mean annual MGWT, extended GWT reconstruction according to RW (RWGWT) and Nemunas flow.

where  $RWGWT_t$  is the reconstructed GWT according to RW in a particular year ( $t$ );  $STD_{t+2}$  is the STD index of annual rings after two years ( $t+2$ ). This equation was used to reconstruct groundwater level for the period of 1935–1964. Verification period's correlation coefficient between the modelled and reconstructed GWT was 0.691 ( $p < 0.0001$ ). After verification, the groundwater level was reconstructed for the period 1870–1935 too.

The reconstructed GWT of the Čepkeliai raised bog of 1935–2014 complies with dry and wet years as well as with dry and wet periods of several years presented in literature (Balevičius et al., 1984). Besides, RWGWT complies with the general hydrological situation in the Nemunas River basin ( $r = 0.39$ ,  $p < 0.00001$ , 1870–2014). This compliance shows that annual rings of raised bog pines can serve as a suitable indicator to determine GWT, and long periods of extreme drought, when dependence between RW and GWT disappears, can be rather treated as exceptions.

### **Groundwater level impact on annual pine increment**

Tree growth in raised bogs is closely linked to groundwater fluctuations, which in their turn, is dependent on precipitation and temperature. A delayed manifestation of climatic factors in GWT can condition delay between climate-related changes and tree growth responses to these changes observed in the growth patterns of bog trees. As can be seen from the results of this research, the strongest relationship was found between the groundwater level reconstructed according to the sums of seven years' P-PET and STD chronology with two years' shift. The delay can be caused by the combination of several processes with a different duration of tree response as, for example, gradual inhibition of root formation or root decay in the environment saturated with water, availability of nutrients in peat soils largely dependent on activity of microbes and fungi (Kozłowski, 1997; Pallardy, 2008), which depend on GWT fluctuations (Dimitrov et al., 2010). In the Tellissaare Bog, northern Estonia, the effect of drainage on Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) with a growth surge was investigated after about 8 years. The lagged enhancement was evidently caused by the lowered soil-water table and additional release of nutrients due to intensified mineralisation in the aerated peat (Läänelaid et al., 2014). Physiological adaptation of bog pines to high groundwater level and to shortage of nutrients as, for example, peculiarities of the carbohydrate storage system, might also contribute to a slower response to environmental changes (Kozłowski, 1997). Other authors state that trees accumulate part of nutrients (mostly nitrogen) in the so-called "storing houses" for the purpose of using

them for the construction of new tissue in the following year (40–50% of nitrogen are found to be taken from old plant tissue (Sleinys, 1973)); however, experiments with bog pines are still scanty. How distribution and flow of nutrients act in the plant-soil system under environmental stress related to soil moisture is therefore one of the scientific research issues that still needs to be solved.

Tree-ring formation is determined not only by the level of the GWT that existed before two years, but also by the GWT during years even further back in time, in particular if similar GWT persists for a longer period of time and then goes up or down sharply. During long-lasting wet or dry periods, trees partly adapt to the existing conditions, and new GWT changes differently affect their growth.

Favourable environmental conditions for tree growth were recorded when GWT dropped down to 132.6 m a.s.l., and unfavourable conditions when GWT went up. Weak non-linear reverse relationship was observed between annual tree-rings and GWT during the period 1965–1985 when GWT used to fall below 132.6 m in the Čepkeliai raised bog. In 1978, GWT started rising, yet the impact of the long-lasting dry period on tree-ring growth still persisted. An assumption can be made that the groundwater limiting tree growth can be divided into three horizons: upper, medium, and lower. When GWT is in the upper horizon (0–10 cm), bog pines suffer from hypoxia and their growth is limited. High GWT inhibits the growth of tree roots by directing them towards the upper aerobic peat layer and thus slowing down root development (Coutts, 1982; Kozłowski, 1997). Besides, it restricts the amount of nutrients necessary for trees in the environment, which by itself is poor in nutrients (Ohlson, 1995), and thus tree growth is inhibited. Small amount of oxygen in soil incurs oxygen deficiency in the upper parts of the plant and later inhibits plant growth (Boggie, 1977). The most favourable growth conditions occur when GWT is in the medium horizon, at a depth of about 10–50 cm below peat surface. When GWT falls down to the lower horizon (50 cm or more below bog surface), the surface peat layer where tree roots are mainly entrenched starts drying and sinking, which can cause drought stress. When GWT falls to the lower horizon, tree root systems can be nourished only by precipitation and condensed water in case of favourable meteorological conditions. Condensed or precipitation water (pore water) accumulated in peat pores can sometimes compensate groundwater deficit. Moreover, a weak correlation was observed between very low WT and TRW, suggesting a shift in limiting factors from a

moisture-limited radial increment to a growth depending on other limiting environmental factors.

Radial tree growth changes detected in raised bog trees reflect GWT fluctuations, as the level of the GWT is the main factor limiting tree growth. Due to hydrological raised bog ecosystem functioning delays and feedback, there is still a shortage of knowledge about the exact impact of climate and environmental conditions on radial stem changes. The regularities and specificity of the development of raised bogs could be better revealed through continuation of dendrochronological investigations of hydrological processes on the complex impact of climate on trees in raised bogs: by combining the primary direct climate impact on tree growth with the multiannual integrated response to groundwater level fluctuations depending on regional climate.

## **CONCLUSIONS**

The seasonal radial stem growth of raised bog pines was found to begin when the mean 24-hour temperature exceeds 7 °C. When temperature drops below 7 °C, the dormant season begins and the amplitude of radial stem changes decreases. Groundwater level rather than temperature regulates radial increment throughout the vegetation period. A great impact on tree increment is also exerted by the climate conditions of the pre-vegetation period. In assessing the radial stem change daily cycles, we found that at low temperatures the expansion of the volume of pine stems is more favoured by low water level. At high temperatures, when transpiration become more active, high groundwater level becomes more favourable.

The covariance of tree-ring width series of raised bog pines shows that over the last 150 years the growing conditions of pines was similar in the investigated bogs. In the period 1922–2012, the greatest average radial increment of pines was recorded in the Aukštumala raised bog, followed by Kerėplis, Čepkeliai and Rėkyva. Different increment of bog pines can be caused by different humidity conditions.

Significant correlation was recorded between annual ring widths of pines growing in the mineral soils by all investigated raised bogs situated in different parts of Lithuania. However, not in all cases was there recorded a significant correlation between annual ring widths of pines growing in the raised bogs. The pines growing in raised bogs characterised by different features can respond to different climate-related changes within a different time period.



Tree increment in raised bogs mainly depends on groundwater level. The study recorded a delayed effect of GWT on tree-rings. The strongest link was found between the mean annual water level and 7-year P-PET sums and between MGWT reconstructed according to P-PET and RW (STD chronology) with a two-year delay.

There was established the GWT threshold, up to which GWT and RW were in linear negative relationship and according to which the groundwater level in the raised bog could be reconstructed. Moreover, a weak correlation was observed between very low GWT and RW, suggesting a shift in limiting factors from a moisture-limited radial increment to a growth depending on other limiting environmental factors. Despite these limitations, TRW series of pines were proved as a valuable proxy to reconstruct WT fluctuations in the bog lagg zone. In addition, the reliability of TRW chronologies was further demonstrated by significant correlation between our reconstruction and Nemunas runoff series. Considering the widespread availability of pine remains in peat deposits of boreo-nemoral peat bogs, the newly established relations can be used to reconstruct hydrological variability over major parts of the Holocene.

## REFERENCES

- Balevičius K., Giniūnas K., Jankevičienė R., Prūsaitė J., Šešelgis K., Tamošaitis J., 1984. Čepkelių raisto vandeningumo kitimas remiantis dendrochronologiniais duomenimis. Čepkelių rezervatas [Water level change in Čepkeliai raised bog based on dendrochronological data. Čepkeliai Reservation]. Vilnius, 44–45.
- Biondi F., Waikul K., 2004. DENDROCLIM2002: AC++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers & Geosciences*, 30: 303–311.
- Boggie R., 1972. Effect of water-table height on root development of *Pinus contorta* on deep peat in Scotland. *Oikos*, 23: 304–312.
- Boggie R., 1977. Water-table depth and oxygen content of deep peat in relation to root growth of *Pinus contorta*. *Plant Soil*, 48(2): 447–54.
- Bumblauskis T., 1983. Rytų žemaičių plynaukštės takoskyrinio kraštovaizdžio optimizavimas – metodinė medžiaga. Lietuvos TSR Mokslų Akademijos Botanikos Institutas [Optimization of the East Žemaitija Plateau ridge landscape – methodical material. Institute of Botany of the Academy of Sciences of the Lithuanian SSR], 158 p.
- Cook E.R., 1985. A time-series analysis approach to tree-ring standardization. Doctoral dissertation. The University of Arizona.

<http://ltrr.arizona.edu/sites/ltrr.arizona.edu/files/bibliodocs/CookER-Dissertation.pdf>

- Cook E. R., et al., 2015. Old World megadroughts and pluvials during the Common Era. *Sci. Adv.*, 1(10): e1500561. doi:10.1126/sciadv.1500561.
- Cook E.R., Kairiukstis L.A., 1990. *Methods of Dendrochronology, Applications in the Environmental Sciences*. Kluwer Academic Publishers, International Institute for Applied Systems Analysis, London. <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-015-7879-0>.
- Cook E.R., Krusic P.J., 2006. ARSTAN\_41: A Tree-Ring Standardization Program Based on Detrending and Autoregressive Time Series Modeling, with Interactive Graphics. Tree-Ring Laboratory, Lamont Doherty Earth Observatory of Columbia University, New York.
- Cook E.R., Peters K., 1981. The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. *Tree-ring Bulletin*, 41: 45–53.
- Cook E.R., Peters K., 1997. Calculating unbiased tree-ring indices for the study of climatic and environmental change. *The Holocene*, 7: 361–370.
- Coutts M.P., 1982. The tolerance of tree roots to waterlogging. *New Phytologist*, 90(3): 467–76.
- De Belder A., 2015. Comparison of different dendrometers and LVDT-sensors in laboratory and field conditions. Master's thesis. The University of Gento.
- Deslauriers A., Rossi S., Anfodillo T., 2007. Dendrometer and intra-annual tree growth: What kind of information can be inferred? *Dendrochronologia*, 25(2): 113–124. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2007.05.003>
- Dimitrov D.D., Grant R.F., Lafleur P.M., Humphreys E.R., 2010. Modeling the effects of hydrology on ecosystem respiration at Mer Bleue bog, J. *Geophys. Res.*, 115, G04043.
- Eckstein J., Leuschner H.H., Giesecke T., Shumilovskikh L., Bauerochse A., 2010. Dendroecological investigations at Venner Moor (northwest Germany) document climate-driven woodland dynamics and mire development in the period 2450–2050 BC. *The Holocene*, 20(2): 231–44.
- Edvardsson J., Poska A., Van der Putten N., Rundgren M., Linderson H., Hammarlund D., 2014. Late-Holocene expansion of a South Swedish peatland and its impact on marginal ecosystems: Evidence from dendrochronology, peat stratigraphy and palaeobotanical data. *The Holocene*, 24: 466–476.

- Edvardsson J., Corona C., Mažeika J., Pukienė R., Stoffel M. 2016b. Recent advances in long-term climate and moisture reconstructions from the Baltic region: Exploring the potential for a new multi-millennial tree-ring chronology. *Quaternary Science Reviews*, 131: 118–126.
- Edvardsson J., Rimkus E., Corona C., Šimanasienė R., Kazys J., Stoffel M., 2015b. Exploring the impact of regional climate and local hydrology on *Pinus sylvestris* L. growth variability e a comparison between pine populations growing at peat soils and mineral soils in Lithuania. *Plant and Soil*, 392: 345–356. doi:10.1007/s11104-015-2466-9
- Edvardsson J., Šimanasienė R., Taminskas J., Baužienė I., Stoffel M., 2015a. Increased tree establishment in Lithuanian peat bogs - Insights from field and remotely sensed approaches. *Science of the Total Environment*, 505: 113–120.
- Edvardsson J., Stoffel M., Corona C., Bragazza L., Leuschner H.H., Charman D.J., Helama S., 2016a. Subfossil peatland trees as proxies for palaeohydrology and climate reconstruction during the Holocene. *Earth-Science Reviews*, 163: 118–140.
- Esper J., Frank D., Büntgen U., Verstege A., Luterbacher J., Xoplaki E., 2007. Long-term drought severity variations in Morocco. *Geophys. Res. Lett.*, 34: L17702. doi:10.1029/2007GL030844.
- Frankl R., Schmeidl H., 2000. Vegetation change in a south German raised bog: ecosystem engineering by plant species, vegetation switch or ecosystem level feedback mechanisms? *Flora*, 195: 267–276.
- Freeman C., Lock M.A., Reynolds B., 1993. Fluxes of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O from a Welsh peatland following simulation of water table draw-down: potential feedback to climatic change. *Biogeochemistry*, 19(1): 51–60. doi:10.1007/BF00000574.
- Friedman J.H., 1984. A Variable Span Smoother, Department of Statistics Technical Report LCS 5, Stanford University, Stanford.
- Fritts H.C., 1976. *Tree Rings and Climate*. Academic Press, London, 567 p.
- Gažovič M., Kutzbach L., Schreiber P., Wille C., Wilmking M., 2010. Diurnal dynamics of CH<sub>4</sub> from a boreal peatland during snowmelt. *Tellus B* 62(3): 133–9. doi:10.1111/j.1600-0889.2010.00455.x.
- Gordon G.A., 1982. Verification of dendroclimatic reconstructions. In: *Climate from Tree Rings*. Cambridge University Press, London, New York, New Rochelle, Melbourne, Sydney, 58–61.
- Gorham E., 1991. Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming. *Ecological Applications*, 1(2): 182–95. doi:10.2307/1941811.

- Gunnarson B. E., 2008. Temporal distribution pattern of subfossil pines in central Sweden: perspective on Holocene humidity fluctuations. *The Holocene*, 18(4): 569–577. <https://doi.org/10.1177/0959683608089211>
- Kažys J., Rimkus E., Taminskas J., Butkutė S., 2015. Hydrothermal effect on groundwater level fluctuations: case studies of Čepkeliai and Rėkyva peatbogs, Lithuania. *Geology. Geography*, 1(3): 116–129.
- King G., Fonti P., Nievergelt D., Büntgen U., Frank D., 2013. Climatic drivers of hourly to yearly tree radius variations along a 6 °C natural warming gradient. *Agricultural and Forest Meteorology*, 168: 36–46. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.08.002>
- Kozłowski T.T., 1997. Responses of woody plants to flooding and salinity. *Tree Physiology*, 1: 1–29.
- Lafleur P.M., Roulet N.T., Admiral S.W., 2001. Annual cycle of CO<sub>2</sub> exchange at a bog peatland. *Journal of Geophysical Research*, 106(D3): 3071–3081. doi:10.1029/2000JD900588.
- Läänelaid A., 1988. Multi-year increment trends of Scotch pines as an indicator of bog dynamics. Zobel M. (Ed.). *Dynamics and ecology of wetlands and lakes in Estonia*. Academy of sciences of Estonian SSR. Estonian Republican Committee of the International Programme (Man and the Biosphere). Tallinn: Tartu State University, Institute of Zoology and Botany.
- Läänelaid A., Sohar K., Kull A., 2014. Kuivenduse mõju ulatus Tellissaare rabas määndide jämeduskasvu järgi [Detecting drainage effect in Tellissaare Bog on the basis of pine radial increment]. Tammiksaar E., Pae T., Mander Ü. (Ed.). *95 Years of Estonian Geography: Selected Studies*. Tartu: Tartu Ülikooli Kirjastus. *Publicationes Instituti Geographici Universitatis Tartuensis*, 111: 219–229. ISSN 1406-3069.
- Leuschner H.H., Sass-Klaassen U., Jansma E., Baillie M.G.L., Spurk M., 2002. Subfossil European bog oaks: population dynamics and long-term growth depressions as indicators of changes in the Holocene hydro-regime and climate. *The Holocene*, 12(6): 695–706. doi: 10.1191/0959683602hl584rp.
- Linderholm H.W., Leine M., 2004. An assessment of twentieth century tree-cover changes on a southern Swedish peatland combining dendrochronology and aerial photograph analysis. *Wetlands*, 24(2): 357–63.
- Linderholm H.W., Moberg A., Grudd H., 2002. Peatland pines as climate indicators? A regional comparison of the climatic influence on Scots pine growth in Sweden. *Canadian Journal of Forest Research*, 32(8): 1400–10.

- Linkevičienė R., Šimanauskienė R., Taminskas J., 2008. Analysis of woody vegetation structure in the heterogenous mires (the case study of Amalvas mire). Boltziar, M. (Ed.). Implementation of Landscape Ecology in New and Changing Conditions. Proceedings of the 14th International Symposium on Problems of Landscape Ecological Research, 4–7 October 2006. Institute of Landscape Ecology of the Slovak Academy of Sciences, Bratislava, branch Nitra, 510 p. ISBN 978-80-89325-03-0.
- MacDonald G.M., Beilman D.W., Kremenetski K.V., Sheng Y., Smith L.C., Velichko A.A., 2006. Rapid early development of circumarctic peatlands and atmospheric CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> variations. *Science*, 314: 285–288.
- Matthews E., Fung I., 1987. Methane emission from natural wetlands: global distribution, area, and environmental characteristics of sources. *Global Biogeochemical Cycles*, 1(1): 61–86. doi:10.1029/GB001i001p00061.
- Mauquoy D., Yeloff D., 2007. Raised peat bog development and possible responses to environmental changes during the mid-to late-Holocene. Can the palaeoecological record be used to predict the nature and response of raised peat bogs to future climate change? *Biodiversity and Conservation*, 17: 2139–2151.
- Mažeika J., Guobytė R., Kibirsktis G., Petrošius R., Skuratovič Ž., Taminskas J., 2009. The use carbon-14 and tritium for peat and water dynamics characterization: case of Čepkeliai peatland, Southeastern Lithuania. 2009 *Geochronometria*, 34:41–48.
- Mitsch W.J., Bernal B., Nahlik A.M., Mander Ü., Zhang L., Anderson C.J., 2013. Wetlands, carbon, and climate change. *Landscape Ecol.*, 28(4): 583–97. doi:10.1007/s10980-012-9758-8.
- Moore T.R., Knowles R., 1989. The influence of water table levels on methane and carbon dioxide emissions from peatland soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 69(1): 33–8. doi:10.4141/cjss89-004.
- Ohlson M., 1995. Growth and nutrient characteristics in bog and fen populations of Scots pine (*Pinus sylvestris*). *Plant Soil*, 172(2): 235–45.
- Pakalnis R., 1987. Rėkyvos ežero ir pelkinio komplekso optimizacija [Optimization of Rėkyva Lake and wetland complex]. Vilnius, Lithuania: Botanical Institute.
- Pallardy S.G., 2008. *Physiology of woody plants*, 3rd ed. Elsevier / Academic Press, 454 p.
- Pellerin S., Lavoie C., 2003. Reconstructing the recent dynamics of mires using a multitechnique approach. *J. Ecol.*, 91(6): 1008–1021.
- Pukienė R., 2001. Natural changes in bog vegetation reconstructed by sub-fossil tree remnant analysis. *Biologia*, 2: 111 – 113.

- Pukienė R., 1997. Pušynų augimo dinamika Užpelkių Tyrelio aukštapelkėje subatlančio periodu [Pinewood growth dynamics in Užpelkių Tyrelio raised bog during the Subatlantic period]. Doctoral dissertation. Vilnius: Botanical Institute, 136 p.
- Rinn F., 2003. TSAP-Win user reference manual. Heidelberg: Rinntech.
- Saarnio S., Morero M., Shurpali N.J., Tuittila E.S., Mäkilä M., Alm J., 2007. Annual CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> fluxes of pristine boreal mires as a background for the lifecycle analyses of peat energy. *Boreal Environment Research*, 12: 101–113.
- Sagerfors J., Lindroth A., Grelle A., Klemedtsson L., Weslien P., Nilsson M., 2008. Annual CO<sub>2</sub> exchange between a nutrient-poor, minerotrophic, boreal mire and the atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 113: G01001. doi:10.1029/2006JG000306.
- Salm J.O., Kimmel K., Uri V., Mander Ü., 2009. Global warming potential of drained and undrained peatlands in Estonia: A synthesis. *Wetlands*, 29(4): 1081–1092. doi:10.1672/08-206.1.
- Schweingruber F.H., 1988. *Tree Rings: Basics and Applications of Dendrochronology*. Reidel: Dordrecht, 276 p.
- Shah S.K., Touchan R., Babushkina E., Shishov V.V., Meko D.M., Abramenko O.V., Belokopytova L.V., Hordo M., Jevšenak J., Kędziora W., Kostyakova T.V., Moskwa A., Oleksiak Z., Omurova G., Ovchinnikov S., Sadeghpour M., Saikia A., Zsewastynowicz Ł., Sidenko T., Strantsov A., Tamkevičiūtė M., Tomusiak R., Tychkov, I., 2015. August to July Precipitation from Tree Rings in the Forest-Steppe Zone of Central Siberia (Russia). *Tree-Ring Res.*, 71: 37–44. doi:10.3959/1536-1098-71.1.37
- Sleinyš R., 1973. Paprastosios pušies (*Pinus sylvestris* L.) mineralinio maitinimosi ekologija ir diagnostika. Lietuvos miškų ūkio mokslinio tyrimo instituto mokslo darbai [Ecology and diagnostics of mineral nutrition of the scots pine (*Pinus sylvestris* L.). Proceedings of the Lithuanian Forestry Scientific Research Institute], Vol. XIV.
- Stančikaitė M., Gedminienė L., Edvardsson J., Stoffel M., Corona C., Gryguc G., Uogintas D., Zinkutė R., Skuratovič Ž., Taraškevičius R., 2017. Holocene vegetation and hydroclimatic dynamics in SE Lithuania – Implications from a multi-proxy study of the Čepkeliai bog. *Quaternary international*, <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.08.039>
- Šimanauskienė R., Taminskas J., Linkevičienė R., 2008. Anthropogenic and climate change influence towards the wetland ecosystem (the case study of Rekyva wetland). *Environmental engineering: the 7th international*

- conference: selected papers: May 22–23, 2008. Vilnius, Lithuania, 1: 394–400.
- Taminskas J., Mažeikis A., Linkevičienė R., 2011. Reconstruction of Bog Lake Water Level Fluctuations Using Method of Simple Modelling: A Case Study on Lake Rėkyva. *Science – Future of Lithuania*, 1(4). doi: 10.3846/mla.2009.4.03.
- Tamkevičiūtė M., Edvardsson J., Pukienė R., Taminskas J., Stoffel M., Corona C., Kibirkštis G., 2018. Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) based reconstruction of 130 years of water table fluctuations in a peatland and its relevance for moisture variability assessments. *Journal of Hydrology*, 558: 509–519.
- Tamkevičiūtė M., Taminskas J., Šmatas V., Pukienė R., 2014. Meteorologinių sąlygų poveikis didelės raiškos dendrometrais išmatuotam *Pinus sylvestris* kamieno apimties pokyčiui vegetacijos periodo pabaigoje [The impact of meteorological conditions on *Pinus sylvestris* radial stem changes measured by high-resolution dendrometers at the end of the vegetation period]. *Science – Future of Lithuania*, 6 (4): 392–399. ISSN 2029-2341.
- Tardif J., Flannigan M.D., Bergeron Y., 2001. An analysis of the daily radial activity of 7 boreal tree species, northwestern Quebec. *Environ Monit Assess*, 67: 141–160.
- Thorntwaite C.W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review*, 38: 55–94.
- Turcotte A., Morin H., Krause C., Deslauriers A., Thibeault-Martel M., 2009. The timing of spring rehydration and its relation with the onset of wood formation in black spruce. *Agric. Forest Meteorol*, 149: 1403–1409.
- Turetsky M.R., Kotowska A., Bubier J., Dise N.B., Crill P., Hornibrook E.R., Minkinen K., Moore T.R., Myers-Smith I.H., Nykanen H., Olefeldt D., Rinne J., Saarnio S., Shurpali N., Tuittila E.S., Waddington J.M., White J.R., Wickland K.P., Wilking M., 2014. A synthesis of methane emissions from 71 northern, temperate, and subtropical wetlands. *Global Change Biology*, 20(7): 2183–97. doi:10.1111/gcb.12580.
- Turetsky M.R., Benscoter B., Page S., Rein G., Van Der Werf G.R., Watts A., 2015. Global vulnerability of peatlands to fire and carbon loss. *Nature Geoscience*, 8: 11-14.

- Turunen J., Tomppo E., Tolonen K., Reinikainen A., 2002. Estimating carbon accumulation rate of undrained mires in Finland – application to boreal and subarctic regions. *The Holocene*, 12: 69–80.
- Vieira J., Rossi S., Campelo F., Freitas H., Nabais C., 2013. Seasonal and daily cycles of stem radial variation of *Pinus pinaster* in a drought-prone environment. *Agric. For. Meteorol.*, 180. 173–181. doi:10.1016/j.agrformet.2013.06.009
- Vitas A., 2009. Dendrochronological analysis of subfossil *Fraxinus* and *Quercus* wood excavated from the Kegai mire Lithuania. *Baltic For.* 15: 41–47.
- Wigley T.M., Briffa K.R., Jones P.D., 1984. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(2): 201–13.
- Zinkutė R., Baužienė I., Dilys K., Taminskas J., Taraškevičius R., 2015. Recent Lithuanian peri-urban ombrotrophic bog records: indices derived from the contents of lead, zinc, copper and nickel. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 15(4): 293–318.
- Стравинскене В., 1981. Единные дендрохронологические шкалы осоково-сфагновых и долгомошных сосняков Литвы. Дендроклиматологические шкалы Советского Союза (ред. Т. Битвинскас) [Stravinskienė V., 1981. Uniform dendrochronological scales in sedge-sphagnum bog and mature pinewoods of Lithuania. Dendroclimatological scales of the Soviet Union (ed. T. Bitvinskas)]. Kaunas. Institute of Botany of the Academy of Sciences of the Lithuanian SSR, 2: 39–46.



## PADĖKA

Disertacijos autorė nuoširdžiai dėkoja darbo vadovui Gamtos tyrimų centro Klimato ir vandens tyrimų laboratorijos vadovui doc. dr. Juliiui Taminskui už visokeriopą pagalbą, idėjas ir palaikymą rengiant šį darbą bei atliekant tyrimus. Už pagalbą ir vertingus patarimus autorė dėkoja dendrochronologei, mokslų daktarei, disertacijos konsultantei Rūtilei Pukienei. Autorė ypač dėkinga Gamtos tyrimų centro Klimato ir vandens tyrimų laboratorijos darbuotojams skatinusiems ir palaikiusiems atliekant tyrimus ir rengiant darbą bei su juo susijusias publikacijas. Autorė taip pat nuoširdžiai dėkoja recenzentams.

Padėka skiriama tyrimus rėmusiai Lietuvos–Šveicarijos bendradarbiavimo programai, kuria siekiama sumažinti ekonominius ir socialinius skirtumus išsiplėtusioje Europos Sąjungoje; projekto Nr. CH-3-ŠMM-01/05.

Už suteiktus meteorologinius ir hidrologinius duomenis autorė dėkinga Lietuvos hidrometeorologijos tarnybai.

Autorės padėka skiriama Berno universiteto Geologijos mokslų instituto Dendrogeomorfologijos laboratorijos profesoriui Markusui Stoffelui ir Lundo universiteto Geologijos departamento mokslo darbuotojui dr. Johannesui Edvardssonui už suteiktą galimybę atlikti stažuotę ir planuotus tyrimus Šveicarijoje, Berno universitete. Taip pat autorė dėkoja Sibiro federalinio universiteto rektoriui prof. Eugenijui A. Vaganovui ir dr. Elenai Babuškinai už suteiktą galimybę dalyvauti tarptautiniuose dendrochronologų mokymuose Abakane, Chakasijos Respublikoje.

Autorė ypač dėkinga savo šeimai, draugams ir kolegoms už kantrybę ir palaikymą.

## ACKNOWLEDGEMENTS

First and foremost, the author of this thesis wholeheartedly thanks her scientific supervisor, Chief and Head of the Laboratory of Climate and Water Research, Nature Research Centre, Assoc. Prof. Dr Julius Taminskas, for the manifold help, constructive ideas and continuing support throughout the period of scientific investigations and thesis preparation. For assistance and invaluable advice, the author expresses gratitude to Doctor of Biomedical Sciences Rūtilė Pukienė, whose consultations regarding thesis preparation proved very helpful.

The author is especially grateful to employees of the Laboratory of Climate and Water Research at the Nature Research Centre for their support and encouragement in the period of investigations, preparation of the thesis and thesis-related publications. Heartfelt thanks go to thesis reviewers.

The author expresses special appreciation of the support provided to her research by the Lithuanian-Swiss Cooperation Programme aimed at reducing economic and social disparities within enlarged EU; project No CH-3-ŠMM-01/05.

The author is grateful to employees of the Lithuanian Hydrometeorological Service for the meteorological and hydrological data provided.

The author takes this opportunity to thank Professor Markus Stoffel, Head of the dendrolab.ch, Institute of Geological Sciences, University of Bern (since 2016, the dendrolab.ch is affiliated to the Section of Earth and Environmental Sciences at the University of Geneva), and Johannes Edvardsson, researcher of Geology Department, Lund University, for the provided opportunity to do an internship and conduct the planned research at the University of Bern, Switzerland. The author is especially grateful to the researcher Johannes Edvardsson whose valuable advice and help during investigations and thesis preparation were extremely helpful. She is also sincerely grateful to the Rector of the Federal University of Siberia Prof. Eugene A. Vaganov and Dr E. Babushkina for the provided opportunity to attend the International Summer School in Abakan, Khakassia.

And finally, for patience, understanding and support, the author would like to give her heartfelt thanks to her family, friends and colleagues.

## CURRICULUM VITAE

**Full name** Marija Tamkevičiūtė  
**Date of birth** 23 March 1987  
**Nationality** Lithuanian  
**Address** 29-7, J. Kairiūkščio Street, Vilnius, Lithuania  
**Telephone** +370 600 84217  
**E-mail** m.tamkeviciute@gmail.com

### Education

Secondary Education – 2006, Vilnius Mikalojus Dauksa Secondary School, Lithuania.  
Vilnius Justinas Vienožinskis Art School – 2005, Lithuania.  
BSc degree, (Environmental Engineering. Environmental Management) – 2010, Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania.  
MSc degree (Environment Protection Policy and Administration) – 2012, Mykolas Romeris University, Lithuania.

### Courses-Internships

2009.04.20 – 2009.04.24 "Socially Responsible Business and Technologies". International Erasmus Week at Vilnius Gediminas Technical University. Vilnius, Lithuania.  
2011.10 "Environmental Management Systems and Certification". The course is organized within the framework of the Baltic University Programme, an international network of universities in the Baltic Sea region coordinated by Uppsala University, Sweden.  
2013.08.03 – 2013.08.19 "International Summer School: Tree Rings, Climate, Natural Resources and Human Interaction". Khakassian technical institute, Siberian Federal University (Abakan, Russia).  
2015.05.30 – 2015.06.26 During the internship, acquired knowledge of Dendro/Climate chronological softwares (TSAP Win, COFECHA, ARSTAN, DendroClim). Conducted Dendrochronology research. University of Bern, Switzerland.

## Professional activity

2013.01 – 2016.04	Technician at the project “Climate change in peatlands: Holocene record, recent trends and related impacts on biodiversity and sequestered carbon” of Nature Research Centre
2016.05 – 2016.10	Engineer at the Laboratory of Climate and Water Research, Institute of Geology and Geography of Nature Research Centre

## Social activities

2012.02 – to date	Member of the Public Environment Protection Commission of Vilnius City Council.
2012.02 – to date	Vice-President of Lithuanian Green Party.
2012.12 – 2013.04	President of the Waters and Contaminated Sites Subcommittee of the Public Environment Protection Commission of Vilnius City Council.
2016.05 – to date	The Chairperson of Vilnius Jeruzale microdistrict's "Jeruzale Community Center".

## LIST OF PUBLICATIONS

### Scientific papers published in impact-factor journals referenced in the *Clarivate Analytics Web of Science (WoS)* database

- Shah S.K., Touchan R., Meko D.M., Babushkina E., Shisov V.V., Abramenko O.V., Belokopytova L.V, Hordo M., Jevsenak J., Kędziora W., Kostyakova T.V., Mokshka A., Oleksiak Z., Omurova G., Ovchinnikov S., Sadeghpour M., Saikia A., Sidenko T., Strantsov A., Tamkevičiūtė M., Tomusiak R., Tychkov I., Zsewastynowicz L., 2015. Precipitation and drought reconstructions for Abakan, Russia from *Pinus sylvestris* ring-width chronology. *Tree-Ring Research*, 71(1): 37–44. ISSN 1536-1098.
- Taminskas J., Linkevičienė R., Šimanauskienė R., Jukna L., Kibirkštis G., Tamkevičiūtė M., 2018. Climate change and water table fluctuation: implications for raised bog surface variability. *Geomorphology*, 304: 40–49.

Tamkevičiūtė M., Edvardsson J., Pukienė R., Taminskas J., Stoffel M., Corona C., Kibirsktis G., 2018. Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) based reconstruction of 130 years of water table fluctuations in a peatland and its relevance for moisture variability assessments. *Journal of Hydrology*, 558: 509–519.

Taminskas J., Edvardsson J., Linkevičienė R., Corona C., Tamkevičiūtė M., Stoffel M. Combining multiple proxies to investigate water table fluctuations in wetlands: a case study from the Rėkyva wetland complex, Lithuania. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* (submitted 2017.12.12)

### **Scientific papers published in journals referred in international databases**

Tamkevičiūtė M., Taminskas J., Šmatas V., Pukienė R., 2014. Meteorologinių sąlygų poveikis didelės raiškos dendrometrais išmatuotam *Pinus sylvestris* kamieno apimties pokyčiui vegetacijos periodo pabaigoje [The impact of meteorological conditions on *Pinus sylvestris* radial stem changes measured by high-resolution dendrometer at the end of the vegetation period]. *Science – Future of Lithuania*, 6 (4): 392-399. ISSN 2029-2341.

Linkevičienė R., Mažeika J., Taminskas J., Baužienė I., Tamkevičiūtė M., Rimkus E., 2015. Klimato kaitos tyrimai: bendras Lietuvos ir Šveicarijos mokslinių tyrimų projektas [Climate change investigations: joint Lithuanian–Swedish scientific research project]. *Geologijos akiračiai*, 2: 16–22. 2015/2. ISSN 1392-0006.

### **Other publication**

Tamkevičiūtė M., Mikalauskienė R., 2015. Kokios klimato kaitos paslaptys slypi durpynuose? [What climate change secrets lie in peat bogs?]. *Žalasis pasaulis*, 12 (26 March 2015): 10. ISSN 1392-2092.

### **Conference reports**

Tamkevičiūtė M., Taminskas J., Šmatas V., Pukienė R., 2014. Meteorologinių sąlygų poveikis didelės raiškos dendrometrais išmatuotam *Pinus sylvestris* kamieno apimties pokyčiui vegetacijos periodo pabaigoje [The impact of meteorological conditions on *Pinus*

- sylvestris* radial stem changes measured by high-resolution dendrometer at the end of the vegetation period]. *17th Lithuanian Young Scientists Conference "Science – Future of Lithuania"*, 10 April 2004, Vilnius.
- Tamkevičiūtė M., Pukienė R., Taminskas J., Šmatas V., 2014. Factors affecting daily variations of Scots pine stem size at the end of vegetation season. *EuroDendro2014*, 8–12 September, Lugo, Spain.
- Edvardsson J., Leuschner H.H., Helama S., Corona Ch., Mažeika J., Taminskas J., Tamkevičiūtė M., Stoffel M., 2014. Subfossil bog pines as indicators of long-term palaeohydrology and climate change. *World Dendro2014*, 14–20 January, Melbourne, Australia.
- Tamkevičiūtė M., 2013. Climate change and anthropogenic impact on the wetland water regime and habitat changes in Lithuania. *International summer school: Tree rings, climate, natural resources and human interaction*, 3–19 August 2013, Khakassia, Abakan.
- Tamkevičiūtė M., Pukienė R., Taminskas J., Edvardsson J., 2016. Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) as a proxy for hydrological variability in peatlands: case study of Čepkeliai raised bog, south Lithuania. *BaltDendro2016*, 22–25 August, Klives Babites, Latvia.
- Tamkevičiūtė M., Pukienė R., Edvardsson J., 2016. Scots pine as a proxy for meteorological variables: a case study of Čepkeliai raised bog, south Lithuania. *BaltDendro 2016*, 22–25 August, Klives Babites, Latvia.
- Linkevičienė R., Taminskas J., Tamkevičiūtė M., Šimanauskienė R., Edvardsson J., Corona C., Stoffel M., 2017. Reconstruction of long term water table fluctuations in Rėkyva wetland complex. LIFE + programme project "Recreation of Aukštumala raised bog in the Nemunas delta regional park (LIFE AUKSTUMALA LIFE12 NAT/LT/000965)", final seminar, 1–2 June 2017, Ventė, Lithuania.
- Linkevičienė R., Taminskas J., Tamkevičiūtė M., Šimanauskienė R., Edvardsson J., Corona C., Stoffel M., 2017. *The International Conference on Conservation and Management of Priority Wetland Habitats*, 11–12 July 2017, Ryga, Latvia.

# I

**Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) based reconstruction of 130 years  
of water table fluctuations in a peatland and its relevance for  
moisture variability assessments**

Tamkevičiūtė M., Edvardsson J., Pukienė R., Taminskas J., Stoffel M.,  
Corona C., Kibirkštis G.

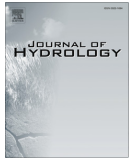
*Journal of Hydrology* 2018, 558: 509–519.

Reprinted with permission from *Journal of Hydrology*



Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Hydrology

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/jhydrol](http://www.elsevier.com/locate/jhydrol)

Research papers

## Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) based reconstruction of 130 years of water table fluctuations in a peatland and its relevance for moisture variability assessments



Marija Tamkevičiūtė<sup>a,\*</sup>, Johannes Edvardsson<sup>b,c</sup>, Rūtilė Pukienė<sup>a</sup>, Julius Taminskas<sup>a</sup>, Markus Stoffel<sup>b,d,e</sup>, Christophe Corona<sup>b,f</sup>, Gintautas Kibirkštis<sup>g</sup>

<sup>a</sup> Nature Research Centre, Akademijos str. 2, LT-08412 Vilnius, Lithuania

<sup>b</sup> Dendrolab.ch, Department of Earth Sciences, University of Geneva, rue des Marais 13, CH-1205 Geneva, Switzerland

<sup>c</sup> Quaternary Sciences, Department of Geology, Lund University, Sölvegatan 12, SE-223 62 Lund, Sweden

<sup>d</sup> Climate Change Impacts and Risks in the Anthropocene (C-CIA), University of Geneva, 66 Bvd Carl Vogt, 1205 Geneva, Switzerland

<sup>e</sup> Department F.-A. Forel for Aquatic and Environmental Sciences, University of Geneva, 66 Bvd Carl Vogt, 1205 Geneva, Switzerland

<sup>f</sup> GEOLAB, UMR6042 CNRS, 63057 Clermont-Ferrand, France

<sup>g</sup> Dzūkija National Park and Čepkeliai State Nature Reserve Administration, Vilniaus str. 3, Merkinė, LT-65334 Varėna district, Lithuania

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 8 May 2017

Received in revised form 16 November 2017

Accepted 31 January 2018

Available online 2 February 2018

This manuscript was handled by Tim R. McVicar, Editor-in-Chief, with the assistance of David C. Le Maitre, Associate Editor

#### Keywords:

Tree rings

Raised bog hydrology

Water table fluctuation

Čepkeliai wetland complex, Lithuania

### ABSTRACT

Continuous water-table (WT) measurements from peatlands are scarce and – if existing at all – very short. Consequently, proxy indicators are critically needed to simulate hydrological changes in peatlands over longer time periods. In this study, we demonstrate that tree-ring width (TRW) records of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) growing in the Čepkeliai peatland (southern Lithuania) can be used as a proxy to reconstruct hydrological variability in a raised bog environment. A two-step modelling procedure was applied to extend existing measurements and to develop a new and longer peatland WT time series. To this end, we used instrumental WT measurements extending back to 2002, meteorological records, a P-PET (difference between precipitation and potential evapotranspiration) series covering the period 1935–2014, so as to construct a tree-ring based time series of WT fluctuations at the site for the period 1870–2014. Strongest correlations were obtained between average annual WT measured at the bog margin and total P-PET over 7 years ( $r = 0.923$ ,  $p < 0.00001$ ), as well as between modelled WT and standardized TRW data with a two years lag ( $r = -0.602$ ,  $p < 0.001$ ) for those periods where WT fluctuated at the level of pine roots which is typically at <50 cm depth below the peat surface. Our results suggest that moisture is a limiting factor for tree growth at peatlands, but below a certain WT level (<50 cm under the soil surface), drought becomes a limiting factor instead. To validate the WT reconstruction from the Čepkeliai bog, results were compared to Nemunas river runoff since CE 1812 ( $r = 0.39$ ,  $p < 0.00001$ , 1870–2014). We conclude that peatlands can act both as sinks and sources of greenhouse gases in case that hydrological conditions change, but that hydrological lags and complex feedbacks still hamper our understanding of several processes affecting the hydrology and carbon budget in peatlands. We therefore call for the development of further proxy records of water-table variability in peatlands to improve our understanding of peatland responses to climatic changes.

© 2018 Elsevier B.V. All rights reserved.

## 1. Introduction

Wetland ecosystems are important carriers of biodiversity and habitats for numerous plant and animal species, as well as a significant agent in the global carbon cycle (MacDonald et al., 2006; Turetsky et al., 2015). Most often, peatlands act as major carbon

sinks (Gorham, 1991; Lafleur et al., 2001; Turunen et al., 2002; Sagerfors et al., 2008; Salm et al., 2009), but can also be significant sources of CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> (Matthews and Fung, 1987; Saarnio et al., 2007; Turetsky et al., 2014; Joosten and Clarke, 2002; Tanneberger and Wichtmann, 2011), especially in the case that hydrological conditions should be changing.

Spatiotemporal dynamics of carbon fluxes in raised bogs are closely linked to the hydrological conditions in the peatland (Moore and Knowles, 1989; Freeman et al., 1993; Salm et al.,

\* Corresponding author.

E-mail address: [m.tamkeviuciute@gmail.com](mailto:m.tamkeviuciute@gmail.com) (M. Tamkevičiūtė).



2009; Gažovič et al., 2010; Mitsch et al., 2013). Hydrological shifts in peatlands can be measured as water-table (WT) changes, but the scarcity of instrumental time series, often limited to a few years, has so far hampered a precise knowledge of relationships between C sequestration and WT fluctuations beyond the period covered by instrumental records. Proxy records for peatland WT depth, which indirectly also generate information about C sequestration in the peatlands, are therefore highly valuable to improve both moisture and climate reconstructions.

Several studies have shown that radial tree growth of peatland trees is limited by the moisture status in the water unsaturated zone, and thereby drive the formation of tree-ring width (TRW) patterns that are closely linked to WT fluctuations in peatlands (Boggie, 1972; Pukienė, 2001; Leuschner et al., 2002; Edvardsson et al., 2016). Periods for which the water table has been located close to the bog surface usually generated low oxygen uptake and limited nutrient assimilation by the root system of trees (Linderholm et al., 2002), which most often resulted in depressed tree growth (Boggie, 1972; Edvardsson et al., 2016). Consequently, TRW data from peatland trees have been used to reconstruct hydrological variations within peatlands at annual to decadal time scales (Edvardsson et al., 2015a; Edvardsson and Hansson, 2015). Initial studies, based on peatland trees, have already been performed in the Baltic region by Balevičius et al. (1984), Cedro and Lamentowicz (2011), Smiljanic et al. (2014), and Edvardsson et al. (2015a). Most often, negative correlations have been observed between the moisture status in the peatland and radial tree growth (Smiljanic et al., 2014; Edvardsson et al., 2015a), but lag responses often rendered the interpretation of results difficult. Most of these studies have been based on the correlation between TRW and temperature and precipitation records, which, however, only yielded indirect information on WT changes in the peatland. Further studies are therefore needed to increase our understanding about the complex interaction between hydrology and tree growth at peatlands, as well as to improve our moisture reconstructions using tree-ring data from peatland trees. In this context, an almost natural (semi-pristine) wetland complex in southern Lithuania was chosen. A relatively long instrumental record of hydrological observations already exist from this wetland complex as well as meteorological data from a nearby weather station.

In this study, we explore the potential of Scots pine growing at the peatland as a proxy for WT fluctuations and a tool to extend WT records beyond the limits of the instrumental series at the study site. Our objectives are to: (i) extend the WT series with a P-PET series (i.e. difference between precipitation and potential evapotranspiration); (ii) establish a relation between TRW and WT values; and (iii) develop a WT record based on TRW data and instrumental measurements. These objectives provide the structural sub-headings used in the following Statistical analyses, Results and interpretation, Discussions sections.

## 2. Material and methods

### 2.1. Study site

Roughly one tenth (9.9%) of Lithuania is covered by peatlands, of which 2.7% are pristine or semi-pristine and the remaining 7.2% have been drained or managed; these figures are comparable to Lithuania's neighboring countries (Taminskas et al., 2012). The Čepkeliai wetland complex is located in southern Lithuania (54°01'N, 24°32'E), and borders Belarus (Fig. 1). The Čepkeliai State Nature Reserve was established in 1975, and has formed a Ramsar site since 1993. The total area of the reserve is 8477 ha, of which 5858 ha are covered by a wetland complex and the remaining 2725 ha are covered by forests. The Čepkeliai State Nature Reserve

was formed to preserve one of the oldest and most natural raised bogs in Lithuania, as well as for the conservation of forested continental sand dunes, lakes, the natural hydrological regime of the raised bog and a rare plant and animal life. The highest point of Čepkeliai is 134 m above sea level (a.s.l.) in the domes of the raised bog, and reaches 127–130 m a.s.l. in the marginal fens. As such, the wetland complex represent one of the largest peatlands in the Baltic region and is, in addition, characterized by unusually large, open raised bog areas (82%), scattered fens (16%), transition mires (2%), small lakes, pools, forested islands and permanently flooded old forested areas (Povilaitis et al., 2011; Taminskas et al., 2012).

The wetland complex at Čepkeliai has been formed during the Holocene in the watershed of the Katra, Ūla, and Grūda streams (Nemunas river catchment). Rapid establishment of trees has been observed in the Čepkeliai raised bog over recent decades (Taminskas et al., 2008b), a process which is believed to be related to hydrological changes in the region (Edvardsson et al., 2015b; Ruseckas and Grigaliūnas, 2008). As clear signs of anthropogenic activities are clearly absent in the Čepkeliai wetland complex and its surroundings (Stančikaitė et al., 2017), colonization of the site with trees is believed to be related to hydrological changes associated with ongoing climate change (Bukantis, 1994; Stonevičius et al., 2017).

Geology and long-term palaeohydrological changes in the region have been discussed extensively in the past (Linkevičienė, 2009; Mažeika et al., 2009; Balakauskas et al., 2013; Stančikaitė et al., 2017), whereas research on bog vegetation and its interaction with hydrology has remained scarce (Balevičius et al., 1984).

### 2.2. Meteorological data

Meteorological data was obtained from the Varėna weather station (54°14' 53.79" N, 24°33' 6.31" E, 109 m a.s.l.) managed by the Lithuanian Hydrometeorological Survey, and located about 27 km north of the Čepkeliai wetland complex. At this site, monthly precipitation and air temperature have been measured since 1929. Average annual precipitation in the region is 680 mm yr<sup>-1</sup>, (max/min values: 423/874 mm yr<sup>-1</sup>, respectively). About two-thirds of annual precipitation falls during the vegetation period of trees that locally lasts from late May to late September. Over the last decade, precipitation has been above the average, especially during the vegetation period (i.e. +14% between 2004 and 2014 as compared to 1929–2014). Average annual temperature has been +6.4 °C (1929–2014). January is usually coldest with an average temperature of -5.1 °C whereas July is highest with +17.7 °C.

### 2.3. Hydrological data

Water-table fluctuations at Čepkeliai raised bog have been measured manually in 5 wells (Fig. 2, Table 1), at ten-day intervals from April to November since 2002 with a precision of 0.01 m.

Well 4-G is situated in the sand dunes adjacent to the raised bog, whereas well 4-A can be found in a transition zone at the bog's margin where water from the raised bog dome is collected (Rigg, 1925; Osvald, 1933; Howie and Meerveld, 2011). By contrast, wells 5-A, 6-A, and 3-A are located inside the raised bog. Water level in the wells was measured in m a.s.l. The elevation of the geodetic survey benchmark (RP-2) is H = 135.67 m (54°1'1.47"N, 24°25'53.7"E). Changes in water table are expressed as changes relative to the height of a zero level in each well which was set at the top of the peat layer. For well No 4-A, for instance, the zero level (i.e. the top of the peat layer in 2009) was at an elevation of 133.1 m a.s.l.

Runoff data from the Nemunas river are measured at the Smailininkai gauging station (55°4' 22.05"N, 22°35' 15.86"E) by the Lithuanian Hydrometeorological Survey. We used this data to test

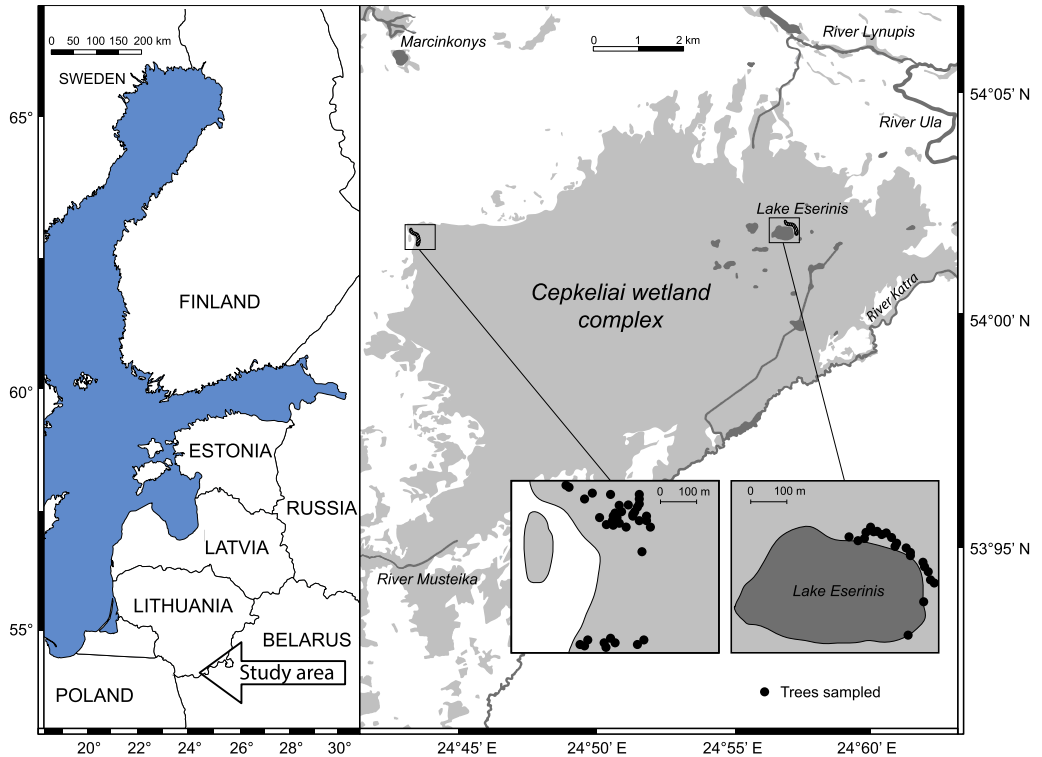


Fig. 1. Location of the study site and tree sampling design in the raised bog of the Čepkeliai wetland complex.

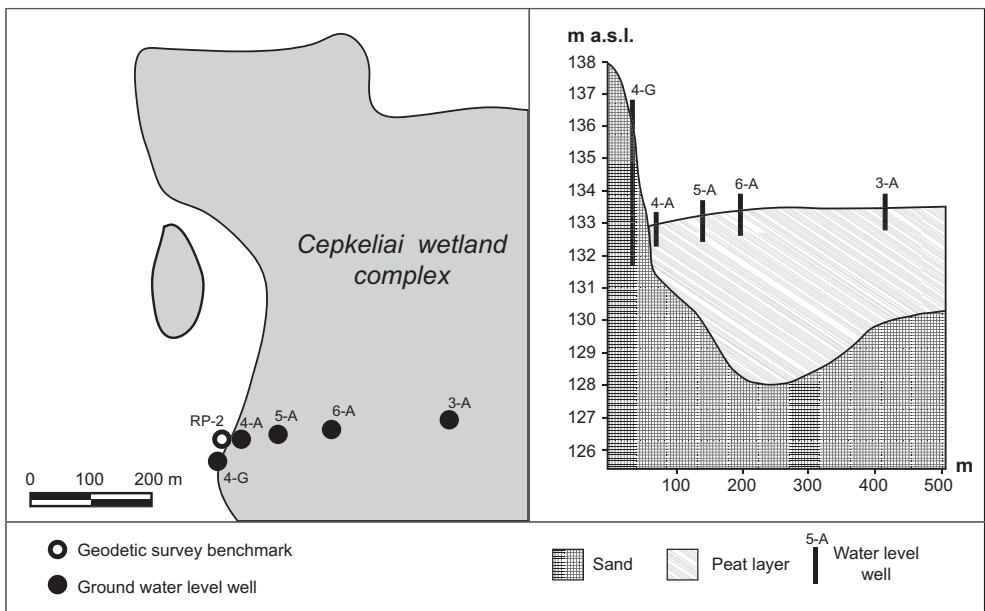


Fig. 2. Location of the water-table wells located in the north-western part of the Čepkeliai wetland complex.

**Table 1**  
Water table (WT) parameters of the wells analyzed at the Čepkeliai wetland complex.

Well, coordinates	Top of well (m a.s.l.)	Distance from bog margin (m)	Soil horizon	Peat layer thickness (m)	Well depth from bog or mineral soil surface (m)	Filter structure
4-G 54° 01' 00" N, 24° 25' 53" E	136.21	–	Sand	–	4.50	PA Grid 4.0–4.5 m from the mineral soil surface
4-A 54° 01' 01" N, 24° 25' 55" E	133.29	10.00	Peat	1.50	0.72	Continuously perforated pipe
5-A 54° 01' 01" N, 24° 25' 56" E	133.60	75.00	Peat	3.20	1.00	Continuously perforated pipe
6-A 54° 01' 01" N, 24° 26' 03" E	133.69	150.00	Peat	5.10	0.92	Continuously perforated pipe
3-A 54° 01' 01" N, 24° 26' 14" E	133.50	340.00	Peat	3.50	0.80	Continuously perforated pipe

and validate the tree-ring based water-table reconstructions from the Čepkeliai raised bog. The Smalininkai gauging station has the longest measurement series of river runoff data in Lithuania (1812–today).

#### 2.4. Tree-ring data

In April, September, and October 2014, increment cores from 96 Scots pine trees (*Pinus sylvestris* L.) were collected using a Pressler increment borer. Trees growing near the raised bog lagg zone were sampled as low as 40 cm above the peat surface so as to maximise the number of growth rings in these slow-growing samples. By contrast, trees growing near Ešerinis Lake (Fig. 1) were sampled at conventional breast height (130 cm) as growth was less suppressed in their case. Tree cores were air dried and sanded with increasingly finer grit until tree-rings and cellular structures became clearly visible (Stoffel and Corona, 2014). Thereafter tree-ring widths (TRW) chronologies were computed based on the measurements of annual growth rings with a precision of 0.01 mm, using a Lintab 5 measuring table and TSAPWin software (Rinn, 2003). Series were then cross-dated with conventional dendrochronological techniques (Fritts, 1976). The quality of measurements and TRW chronologies was evaluated with COFECHA (Holmes, 1983), which allowed removal of trees characterized by asynchronous growth.

### 3. Statistical analyses

To reconstruct hydrological variability in the Čepkeliai peatland, a two-step modelling procedure was employed to (i) extend the instrumental WT series via a P-PET analyses, and (ii) to reconstruct WT fluctuations based on the TRW series from *Pinus sylvestris* growing at the peatland.

#### 3.1. WT reconstruction based on P-PET analysis

To reconstruct fluctuations of the water table in the Čepkeliai raised bog, we first computed relations between annual instrumental WT (IWT) changes and compared them to estimated precipitation vs. Potential evapotranspiration (P-PET) data for time windows ranging from 1 to 10 years. To estimate possible trends and/or changes thereof in evaporative demand, we looked at the four primary meteorological variables wind speed, atmospheric humidity, radiation, and air temperature, as these have been shown to be particularly relevant in long-term water resource assessments (McVicar et al., 2012). At the Varėna meteorological station, net radiation is not measured, which prevented the application of Penman's or Priestly-Taylor equations (Sumner and Jacobs, 2005) to estimate evapotranspiration. We therefore used an equation based on air temperature in which potential evaporation rates are obtained via empirical relationships (Donohue et al., 2010). In concrete terms, and for the purpose of our study, Thornthwaite's equation (Thornthwaite, 1948) has been applied as follows:

$$PET = 16(10T/I)^a \quad (1)$$

where T represents average monthly temperature, I is a heat index for a given area which is the sum of 12 monthly index values  $i$  and, where  $a$  is an empirically derived exponent as a function of I:

$$i = (T/5)^{1.514} \quad (2)$$

$$a = 0.00000675i^3 - 0.0000771i^2 + 0.01792i + 0.49239 \quad (3)$$

To model PET in the Čepkeliai peatland, we used average monthly temperature from the Varėna meteorological station. The difference (D) between P and PET provides a simple means to measure water surplus or deficit for the analysed time window (Vicente-Serrano et al., 2010):

$$D_i = P_i - PET_i \quad (4)$$

Based on this equation, we estimate that roughly 69% of total precipitation is lost through evapotranspiration in Čepkeliai, of which 82% takes place in during the vegetation period of trees which is locally lasting from late May to late September. On average, the annual potential evapotranspiration is about 469 mm. Relations between P-PET and IWT were thereafter modeled through regression estimates and used to reconstruct WT changes for the period of available meteorological data.

#### 3.2. Relation between TRW and WT

In a second step, relations between modeled mean annual water table (MWT) according to the P-PET analyses were contrasted with annual tree growth to extend the hydroclimatic reconstruction further back in time.

To minimize the influence of non-climatic variations and trends related to tree age and geometry, the TRW data was standardised and transformed into dimensionless TRW indices (Fritts, 1976; Cook and Kairiukstis, 1990) using the ARSTAN\_41d software (Cook and Krusic, 2006). To preserve potential low-frequency variations in tree growth, a flexible Friedman's variable span smoother (Friedman, 1984) was used for standardization. Reliability of the TRW chronologies and the common variance of the single series were evaluated with the expressed population signal (EPS; Wigley et al., 1984) and running rbar (Cook and Kairiukstis, 1990), respectively. The limit at which the records were considered reliable and well replicated was set to the commonly accepted threshold of  $EPS \geq 0.85$  (Wigley et al., 1984). Three different TRW chronologies were created using ARSTAN\_41d, a raw TRW chronology (Raw), a standardised TRW chronology (STD) and a residual TRW chronology (RES).

Pearson correlation analysis was used to estimate the relationship between TRW series (STD chronology) and WT fluctuations. Lagged correlations between hydrological, meteorological, and dendrochronological data were computed to quantify potential lag effects. Nonlinearity between TRW and MWT was taken into account by nonlinear regression. Segmented regression with a breakpoint at the vertex of best fit second order polynomial curve

was used to establish the interval of WT fluctuations in which linear regression model could be applied.

3.3. WT reconstruction using TRW data

Separate calibration (1986–2012) and independent verification (1935–1964) periods were used to validate the WT reconstruction models based on our TRW series developed from the peatland pines. The TRW based water table reconstruction (TRWWT) was considered only for that period for which TRW data were reliable and statistically robust. Nemunas river runoff data was thereafter used to validate the WT reconstructions obtained for the Čepkeliai raised bog.

4. Results and interpretation

4.1. WT reconstruction derived from P-PET assessment

The correlation values (2002–2014) between annual instrumental water table (IWT) measurements in the different wells shown in Fig. 2 and the ratio of precipitation vs. potential evapotranspiration (P-PET) for periods ranging from 1 to 10 years are presented in Table 2. The strongest correlation coefficient ( $r = 0.92$ ,  $p < 0.00001$ ) was observed between average annual IWT at well 4-A, located closest to the lagg, and P-PET over 7 years. The following regression model was used for estimates of WT fluctuations from the P-PET:

$$WT = 0.0014\sum_7(P - PET) + 130.79 \tag{5}$$

Estimates from this model were then used to extend the WT series at the lagg (well 4-A) for the period 1935–2002. According to our reconstructions, the WT fluctuated from 133.3 m a.s.l. to 132.1 m a.s.l. This means that the WT has been 20 cm above the zero level in wet years at the bog lagg and that its surroundings were subject to flooding. At the other extreme, in very dry years, the WT at well 4-A was 100 cm below the level of the peat surface.

4.2. Relations of TRW with WT

After crossdating and evaluation of the TRW series, 50 out of 96 trees were included in the final TRW chronologies used for WT reconstructions. The relatively high rejection rate of samples (48%) is related to the large number of missing rings in many tree-ring samples. The final TRW chronologies and related sample depth over time are presented in Fig. 3. The EPS values of the raw

(RAW), standardised (STD), and residual (RES) TRW chronologies are above the critical threshold of 0.85 between 1870 and 2014 for all series.

Strongest correlation has been obtained between the measured WT at well 4-A and the STD TRW chronology. A lag effect between tree growth and water level in the peatland was detected as the strongest relation between TRW and MWT which was obtained with a 2-year lag in the TRW record. Moreover, the 2-year lag between TRW and MWT revealed a nonlinear dependence between the two parameters (Fig. 4). Nevertheless, MWT could be segmented into two distinct intervals with a threshold at the vertex of the best-fit curve, i.e. at 132.6 m a.s.l. (i.e. 50 cm below the peat surface), as characterized by different response of TRW to WT fluctuations. Linear negative dependence ( $r = -0.57$ ) of TRW with MWT was observed when MWT fluctuated within a 50 cm layer below the peat surface, but this relation vanished and even turned to insignificantly positive after the MWT dropped below the 50 cm threshold (Fig. 5).

Our records show a dry period, with water levels below 132.6 m a.s.l., between 1965 and 1985. At the beginning of this phase, tree growth was fairly moderate before a growth depression started to emerge in the 1970s, followed by a gradual recovery up to 1981. With the exception of the period just described before, negative correlations between MWT and STD-TRW chronology was observed, suggesting that increasing peat moisture limited tree growth at the peatland. The strongest significant correlation coefficient ( $r = -0.604$ ,  $p < 0.00001$ ) was computed between MWT and STD TRW chronology with an offset of 2 yrs in TRW indices (see Table 3), which supports the idea that the WT fluctuations have a delayed influence on radial tree growth.

The correlation tests show that any rise in water table results in depressed tree radial growth, which is visible in the form of narrower annual growth rings, except for the extremely dry period 1965–1985. In Fig. 6, we compare STD-TRW indices and MWT values with their low frequency components (i.e. a 5-yr moving average). In general terms, those periods associated with depressed radial growth correspond with phases with high water levels, as was the case for instance during 1935–1939, 1945–1950, 1958–1963, 1983–1994, and ever since 2004. Opposite conditions were recorded for periods with low water tables during 1939–1945, 1953–1956, and to a lesser extent, 1995–2003. During these phases, relatively dry conditions allowed better growth in trees. The only exception is observed for the period 1965–1985, as this interval was characterized by water-table levels < 132.6 m a.s.l.; the latter did not trigger any specific trends in tree growth.

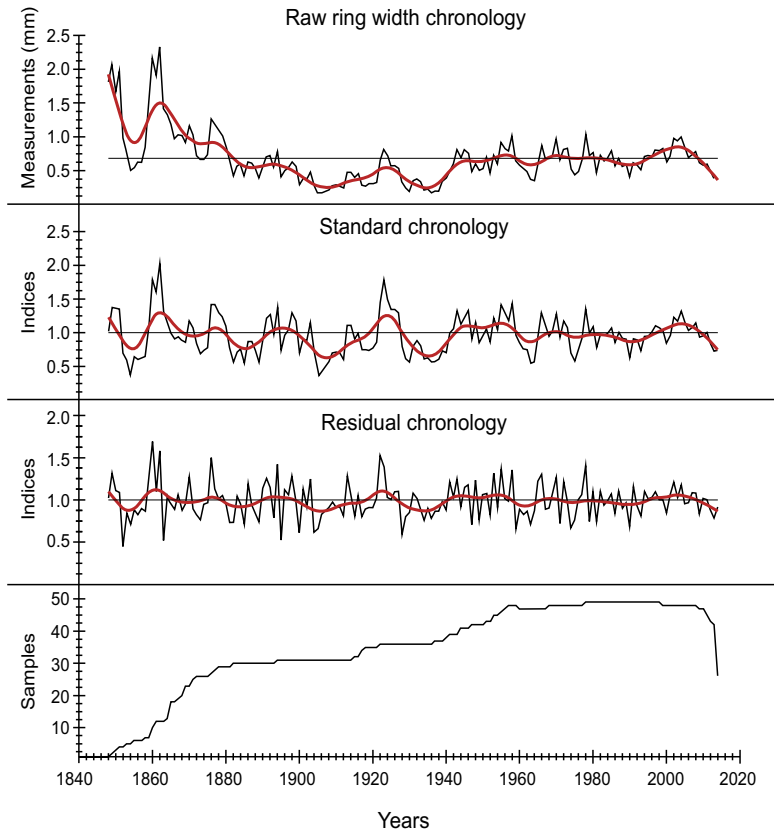
Table 2

Correlations between annual instrumental water table (IWT) measurements in different wells (4-G, 4-A, 5-A, 6-A, 3-A) and the ratio of precipitation vs. potential evapotranspiration (P-PET) for periods ranging from 1 to 10 years.

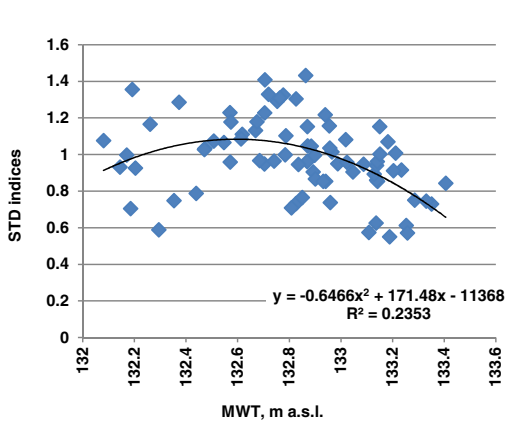
	$\sum_1(P-PET)$	$\sum_2(P-PET)$	$\sum_3(P-PET)$	$\sum_4(P-PET)$	$\sum_5(P-PET)$
4-A	0.14	0.25	0.56	0.78 <sup>*</sup>	0.76 <sup>*</sup>
4-G	0.12	0.19	0.51	0.72 <sup>*</sup>	0.68
5-A	0.17	0.29	0.54	0.74 <sup>*</sup>	0.63
6-A	0.22	0.32	0.53	0.70 <sup>*</sup>	0.50
3-A	0.19	0.27	0.48	0.71 <sup>*</sup>	0.58
	$\sum_6(P-PET)$	$\sum_7(P-PET)$	$\sum_8(P-PET)$	$\sum_9(P-PET)$	$\sum_{10}(P-PET)$
4-A	0.73 <sup>*</sup>	0.92 <sup>****</sup>	0.90 <sup>***</sup>	0.87 <sup>**</sup>	0.86 <sup>**</sup>
4-G	0.61	0.82 <sup>**</sup>	0.82 <sup>**</sup>	0.76 <sup>*</sup>	0.74 <sup>*</sup>
5-A	0.69 <sup>*</sup>	0.88 <sup>***</sup>	0.83 <sup>**</sup>	0.79	0.77 <sup>*</sup>
6-A	0.58	0.79 <sup>*</sup>	0.76 <sup>*</sup>	0.68 <sup>*</sup>	0.60
3-A	0.64	0.84 <sup>**</sup>	0.80 <sup>**</sup>	0.75 <sup>*</sup>	0.68

Correlation significance levels are marked as follows:

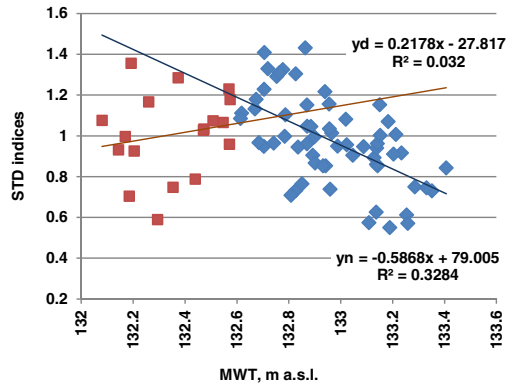
- \* ( $p \leq 0.01$ ).
- \*\* ( $p \leq 0.001$ ).
- \*\*\* ( $p \leq 0.0001$ ).
- \*\*\*\* ( $p \leq 0.00001$ ).



**Fig. 3.** Raw, standardised, and residual tree-ring width (TRW) chronologies and related sample depth (i.e. trees available in each year of the reconstruction). The black curves show radial tree-growth variability with annual resolution whereas the smoothed red curves are 20-year low-pass filter splines highlighting low-frequency patterns of variability at the site.



**Fig. 4.** Scattergram of tree-ring width (TRW) indices (with a 2-yr offset) versus mean annual water table (MWT) at well 4-A; peat surface elevation 133.1 m a.s.l.) in a given year.



**Fig. 5.** Linear dependencies of tree-ring width (TRW) indices (with a 2-yr offset) on annual mean water table (MWT; as in Fig. 4) for different intervals of MWT fluctuations: the blue line and symbols mark a negative dependence when MWT was >132.6 m a.s.l. ( $y_d$ ), the brown line and symbols mark extreme drought years ( $y_d$ ).

**Table 3**

Pearson correlation values between mean annual water table (MWT) and the standardised tree-ring width (STD-TRW) chronology indices depending on year offsets in TRW indices.

Offset MWT–TRW (in yrs)	r	p
0	–0.23	>0.05
–1	–0.42	<0.001
–2	–0.60	<0.00001
–3	–0.57	<0.00001
–4	–0.46	<0.001
–5	–0.32	<0.05

**4.3. WT reconstruction based on TRW data**

A significant correlation was obtained between WT fluctuations as derived from P-PET analyses for well 4-A and the STD-TRW chronology ( $p < 0.00001$ ), provided that the dry period comprised between 1965 and 1985 was excluded from analyses. The linear regression model between both datasets was calibrated over the period 1986–2012, whereas the time window 1935–1964 was

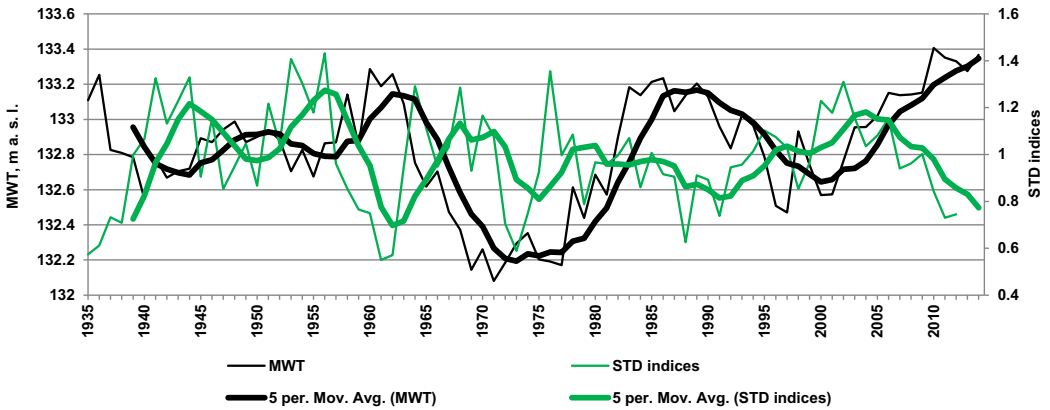
used for independent model verification. The correlation coefficient between MWT and STD-TRW chronology, using an offset of 2 years, is  $r = -0.602$  ( $p < 0.001$ ) for the calibration period 1986–2012 and the linear regression model is expressed as follows:

$$TRWWT_t = -0.9564STD_{t+2} + 133.91 \tag{6}$$

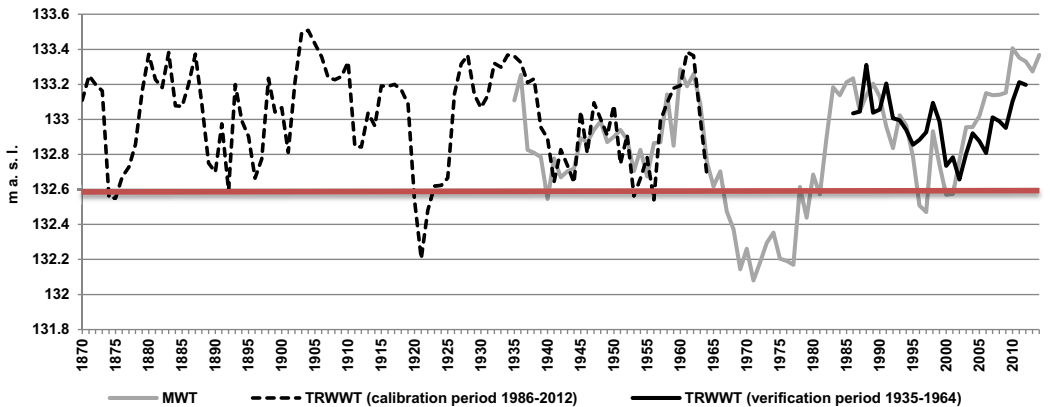
where  $TRWWT_t$  is the reconstructed WT based on TRW in year  $t$ , and  $STD_{t+2}$  is the tree-ring STD index with a 2-yr offset.

For the verification period, correlation between observed and estimated WT fluctuations is 0.691 ( $p < 0.0001$ ). Based on the significance of this test, our model was thereafter used to estimate WT levels at the site between 1870 and 1935 (Fig. 7).

Periods with high water tables ( $\geq 133.0$  m a.s.l., or 0.1 m below the peat surface) were reconstructed for the phases 1870–1873, 1879–1888, 1902–1910, 1915–1919, 1926–1939, 1947–1950, 1957–1963, 1983–1990, and since 2005. Low water tables ( $\leq 132.8$  m a.s.l., or 0.3 m below the peat surface) were detected in 1874–1878, 1889–1897, 1920–1926, 1940–1946, 1952–1956 and 1995–2003. Noteworthy, our tree-ring records are not able



**Fig. 6.** Mean annual water table (MWT; well 4-A) and tree-ring width (TRW) indices of the standardised (STD) chronology. The best match between curves was obtained when the TRW chronology curve is shifted by 2 years, thus taking account of the lagged response to the MWT.



**Fig. 7.** Reconstructed mean annual water table (MWT) in the raised bog (well 4-A) based on (i) 7-yr P-PET values (solid grey line;  $MWT = 0.0014\sum_7(P-PET) + 130.79$ ) and (ii) the tree-ring based water table (TRWWT) reconstruction for well 4-A according to the standard tree-ring width (STD-TRW) chronology (dotted line;  $TRWWT_t = -0.9564 STD_{t+2} + 133.91$ ). Calibration period is 1986–2012 (dotted line), verification period is 1935–1964 (solid black line).

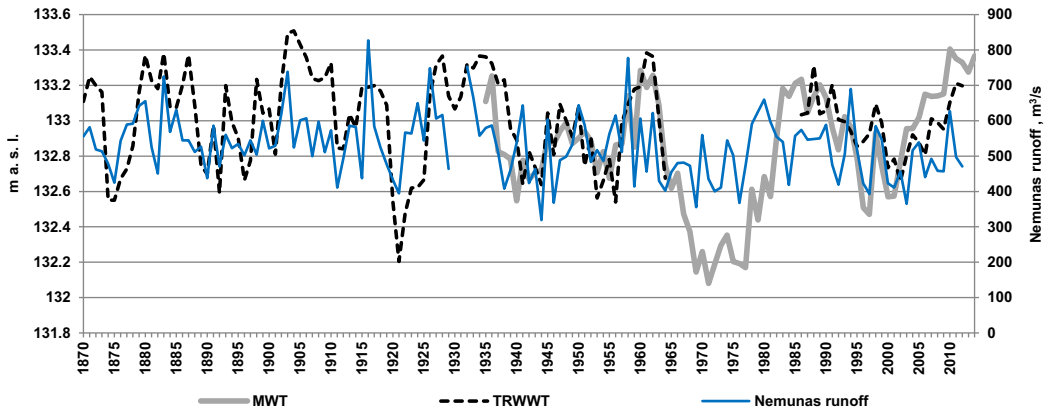


Fig. 8. Reconstructed mean annual water table (MWT) in raised bog at well 4-A according to (i) 7-yr P-PET values (solid grey line;  $MWT = 0.0014 \sum_{t=1}^7 (P-PET) + 130.79$ ), (ii) tree-ring width based water table (TRWWT) reconstruction at well 4-A using the standardised tree-ring width (STD-TRW chronology; dotted line;  $TRWWT_t = -0.9564 STD_{t+2} + 133.91$ ) and Nemunas runoff (in  $m^3/s$ ; blue line).

to reproduce prolonged periods of low water tables during which values drop below 132.6 m a.s.l.

To validate our hydrological reconstructions, the Čepkeliai WT data was compared to mean annual runoff data from the Nemunas river at Smalininkai gauging station. Runoff data is assumed here to represent the common hydrological situation for the entire Nemunas catchment area (Fig. 8). Reconstructed long-term changes for the hydrological regime at Čepkeliai raised bog, which is located in the central course of Nemunas river, are significantly correlated with river runoff data ( $r = 0.39$ ,  $p < 0.00001$ , 1870–2014).

The agreement between the reconstructed TRWWT and Nemunas runoff data further underline the robustness of our reconstruction. Periods with high WT correspond to narrow growth rings in the TRW records and years with large overall runoff. This coherence suggests that TRW data developed from peatland pine trees can be used as a proxy of WT levels in peatlands. The only exception was the prolonged and exceptionally dry period in which the link between TRW and WT disappeared.

## 5. Discussion

### 5.1. WT reconstruction based on P-PET

The different calculation models considered in this study have allowed comparison of different approaches in a field for which data is still scarce and knowledge of processes and drivers remains fragmentary. The application of Thornthwaite's equation, based exclusively on a temperature relationship, has certain limitations and at best a theoretical justification (Taylor and Ashcroft, 1972). Since temperature and vapour pressure gradients are related to the movement of air as well as to the heating of the soil, the validity of the equation should not be generalized. Moreover, the equation has to be tested empirically whenever the climate is appreciably different from the area in which it has been tested originally (Skaggs, 1980; Nokes, 1995; Xu and Singh, 2001). We opted for Thornthwaite's equation due to a lack of more complete input data, but also because earlier studies by Taminskas et al. (2008a) have obtained a reliable relationship ( $R^2$  from 0.57 to 0.62) between observed actual evapotranspiration and potential evapotranspiration in a set of sites close to our study site. In that study, the utility of Thornthwaite's estimates towards a recon-

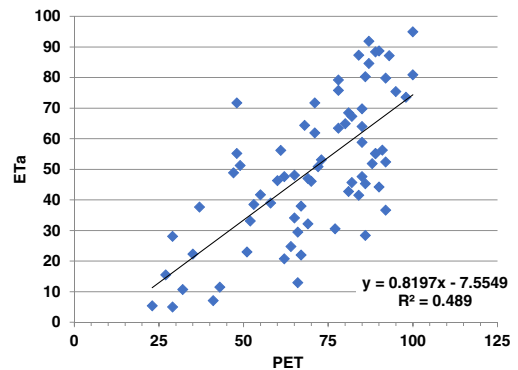


Fig. 9. Comparison of observed actual evapotranspiration (weighing lysimeter, ETA) and modeled potential evapotranspiration (PET) using Thornthwaite's equation at Utena, Lazdijai and Vėžaičiai (Lithuania).

struction of variability in evapotranspiration was tested by comparing results according to Thornthwaite's equation with the same month weighing lysimeter method estimates of actual evapotranspiration at three locations (Fig. 9).

Our study has also demonstrated the crucial role of a dense WT monitoring network so as to accurately reconstruct WT fluctuations in peat bogs. Indeed, correlations between P-PET, TRW data and raised bog WT fluctuations obviously depend on piezometer location (Table 2). In our case, the strongest correlation was obtained at the raised bog lagg, which is characterized by a lack of surface runoff. The lagg is located in the lowest part of the bog, and might therefore be the best location for the assessment of water resources in the bog water system (Howie and Meerveld, 2011). Strong correlation coefficients between precipitation and IWT in the lagg further indicate that water level in the lagg depends more on the annual amount of precipitation than WT fluctuations in the raised bog slope or in the mineral soil surrounding the peat bog. Interestingly, the lowest correlation coefficients were recorded between P-PET and annual IWT in well 6-A, located on the bog slope at a distance of 150 m from the bog

margin (Fig. 2). The steepest slope in bog surface along the cross-section analyzed is located close to this well, and the higher influence of surface runoff at this location apparently determines a decline in the correlation coefficient in this area. Most often, the slope gradient on the bog surface declines as soon as the distance from bog margin increases; bog surface is indeed close to flat in the area where well 3-A is located (at a distance of 340 m from the bog margin, Fig. 2). In this area, WT is linked to P-PET rather than surface runoff from other areas in the bog complex. An increase in the correlation coefficient between IWT and P-PET is therefore observed again, and an increase in correlation is observed between IWT recorded in well 4-G, located on sand dunes and P-PET as compared to well 6-A (inside the bog) and P-PET (Table 2). The water level in well 4-G is, however, most likely affected by both water supply from the bog and groundwater levels in the bog margins. Stronger correlations have been observed between annual IWT and P-PET in wells located in the lagg and on the raised bog as compared to well 4-G located on sand dunes (Table 2). Furthermore, comparison between well 4-G and the wells located at the bog surface shows that water level varies differently inside the bog and on mineral soil sites over the year. This may depend on differences in groundwater recharge in the wells on the bog and mineral soil, especially during the dry season of the year. IWT data from the bog wells is therefore more suitable for TRW analysis than is IWT data from wells located on mineral soils outside the bog. This observation is in agreement with comparisons between pine trees growing under identical climatic conditions but different soil moisture (Edvardsson et al., 2015a). Even though the trees sometimes grew only a hundred meter apart, correlation was often close to absent between the TRW series from the mineral and peat soil pines.

Our studies are also in agreement with results from Howie and Meerved (2011), suggesting that WT in a bog lagg is more integrated indicator of hydrological regime in the wetland.

### 5.2. TRW relations with WT changes

In general, WT changes in peat bogs are mainly controlled by precipitation, but they also tend to be influenced by temperature controlled evapo(transpiration) (Charman et al., 2004). Several studies have shown that peat bogs can indeed act as water reservoirs, thereby buffering water, and that WT fluctuations in peat bogs therefore can lag several years behind climatic or environmental changes (Kilian et al., 1995; Linderholm et al., 2002; Edvardsson and Hansson, 2015). This lag may also explain the delayed response that is sometimes recorded in TRW records to climate changes, especially if the series are developed from pines growing on raised bogs (Vaganov and Kachaev, 1992; Edvardsson et al., 2015a). In this study, the strongest correlation was computed between total P-PET over 7 years and STD-TRW chronology with a 2-yr lag. Our results also confirm that tree growth in peatlands reflects the multiannual synthesis of moisture variability as well as a hydrological lag and/or feedback responses (Linderholm et al., 2002; Edvardsson et al., 2015a; Edvardsson and Hansson, 2015).

WT fluctuations within the peat bog are the main driver of radial growth of bog pines. The 2-yr lag observed in our records (Table 3) is consistent with results from the Männikjärve peat bog in Estonia (Smiljanic et al., 2014). Lagged responses of about 3 yrs were detected between the increases in moisture (derived from  $\delta^{13}\text{C}$  isotopes in annual tree rings) and decreased radial growth of subfossil pine trees in two Swedish bogs (Edvardsson et al., 2014). Drivers of lag responses can be related to the progressive inhibition of root formation or root decay in water-saturated environments or the availability of nutrients in peaty substrates, which have been shown to be highly dependent on the activity

of decomposing microbes or mycorrhizae fungi (Kozłowski, 1997; Pallardy, 2008). These processes, however, all depend on WT fluctuations as well (Dimitrov et al., 2010). Physiological adaptation of peatland pines to extremely wet conditions and shortage of nutrients, e.g. peculiarities in carbohydrates storage system, could also influence the existence of a slower reaction to environmental changes (Kozłowski, 1997).

Studies on the contribution of different carbon sources on tree growth show rather variable ratios of new carbohydrates versus remobilised reserves from previous years, ranging from 71% to 35% (Brüggemann et al., 2011), but experiments on bog pines are still lacking (Edvardsson et al., 2016). Whether and to which degree carbon allocation and carbon fluxes in the plant-soil system are affected by environmental stress conditions remains one of the research questions in this field (Brüggemann et al., 2011).

Water saturated peat soils create unfavourable conditions for tree growth due to a number of physical, chemical, and biological processes (Kozłowski, 1997; Linderholm et al., 2002; Edvardsson et al., 2016). Most often, increased peat moisture result in depressed tree growth, which can be analysed *a posteriori* through the presence of narrower annual growth rings (Smiljanic et al., 2014; Edvardsson et al., 2015a). High water tables also restrict the development of tree roots to the upper aerobic peat layers (Coutts, 1982; Kozłowski, 1997; Leuschner et al., 2007), and therefore limit the nutrient pool available for trees in an already nutrient-limited environment (Ohlson, 1995). Moreover, low oxygen levels in peat soils can favor oxygen deficiency in the upper plant tissues and can thus cause inhibition of plant growth (Boggie, 1977). The growth patterns observed in this study are in line with these findings, but also suggest that tree growth can be depressed during extremely dry phases as well. Similar to Smiljanic et al. (2014), we observe that extremely low water levels may cause growth stress as well, a fact which may result from the shallow and horizontal spreading root systems of peat trees (Edvardsson et al., 2016). In our study, a weak positive link between MWT and STD-TRW chronology indices was observed during the unusually dry period 1965–1985, during which the WT was as low as 132.6 m a.s.l. or even lower (i.e. the average annual depth of the water table was 50 cm below the peat surface). Although the water level started to rise again in 1978, the drought signal in the TRW data persisted for some more years. In times with low WT, the surface layers of peat dry out, leaving the shallow roots in the top peat layers with very limited access to water and hence expose the trees to drought stress (Braekke, 1983; Dang and Liefers, 1989; Pepin et al., 2002). We hypothesize that during these dry periods, TRW will depend less on hydrological drivers.

Taking into consideration recent global warming and the projected intensification of extremes (Rimkus et al., 2011; Stonevičius et al., 2017), one may expect more frequent droughts in the study region and thus also increased drought stress on bog trees. Indeed, our WT reconstructions show enhanced amplitudes of WT fluctuations in the second half of the 20th century.

### 5.3. WT reconstruction based on TRW

The development of a 130-year WT reconstruction from peatland TRW data represents the core of this study and an important step to a more widespread application of a new proxy record for moisture variability in peatland ecosystems far beyond the period covered by monitoring data. Such proxy records are important due to the close relation of hydrology with carbon sequestration in peatland ecosystems. In general terms, our results show that moister conditions generate harsher growth conditions for bog trees, and are thus in line with previous findings (Leuschner et al., 2002; Edvardsson et al., 2016). At the same time, however, our findings also indicate that unusually dry conditions may result



in unfavorable growth conditions as well. Once that the WT falls below a threshold of 50 cm beneath the peat surface, TRW indices will no longer remain statistically dependent on WT depth. In other words, as soon as WT fluctuations fall >50 cm below the peat surface, TRW records will fail to significantly estimate past WT fluctuations. Under current conditions, such conditions must, however, be considered as quite exceptional. To reconstruct WT depths during such extremely dry periods as well, one needs to take alternative proxies into consideration. By way of example, stable isotopes in tree rings may offer an opportunity, however, isotope studies on peatland trees have remained rather limited so far (Sass-Klaassen et al., 2005; Edvardsson et al., 2014). In the case of proxies without annually resolved proxies, like e.g., testate amoebae, could thus be added to strengthen WT reconstructions, especially in a longer-term perspective (Hendon and Charman, 2004, van Bellen et al., 2014, Lamentowicz et al., 2015).

Despite the limitations of TRW data to reconstruct MWT fluctuations during extreme droughts, statistically significant correlation between our reconstruction and the instrumental Nemunas runoff data suggests that TRW records from peatland pines can indeed be used as a reliable proxy of past WT variability in peatlands. Moreover, the reconstructed WT fluctuations in the Čepkeliai raised bog correspond to periods which are associated with dry/wet conditions known from the literature (Balevičius et al., 1984; Taminskas et al., 2008a,b).

## 6. Conclusions

The radial growth of peatland pine trees is strongly influenced by WT fluctuations, which in turn depend on changes in precipitation and temperature. In our case, the strongest correlation between average annual IWT and P-PET totals has been obtained if the latter was considered for a period of 7 years. Further, strong correlations were obtained between MWT and STD-TRW chronology with a 2-yr lag. While this lagged response sustains the findings in other raised bog studies, more thorough investigations are necessary to really understand the eco-physiological factors predetermining time lags in peatland ecosystem functioning.

The negative dependence of TRW on WT fluctuations was found in this study as well, provided that the latter fluctuated within a 50 cm layer below the peat surface. By contrast, the correlation quickly fades as soon as the WT drops below this threshold. Consequently, and in case of extremely low water levels, narrow TRW may be formed as well, which could possibly result in some bias. Moreover, a weak correlation was observed between very low WT and TRW, suggesting a shift in limiting factors from a moisture-limited radial increment to a growth depending on other limiting environmental factors. Despite these limitations, TRW series from pine trees were used successfully in this study as a valuable proxy to reconstruct WT fluctuations in the bog lagg zone. In addition, the reliability of TRW chronologies is further demonstrated by the significant correlation observed between our reconstruction and Nemunas runoff series. Considering the widespread availability of pine remains in peat deposits of boreo-nemoral peat bogs (Edvardsson et al., 2016), the newly established relations can be used to reconstruct hydrological variability over major parts of the Holocene.

## Acknowledgments

This study has been funded by the Lithuanian-Swiss cooperation program to reduce economic and social disparities within the enlarged European Union under the name CLIMPEAT (Climate change in peatlands: Holocene record, recent trends and related impacts on biodiversity and sequestered carbon) project agree-

ment No CH-3-ŠMM-01/05. The authors are grateful to Lithuanian Hydrometeorological Service under the Ministry of Environment for the meteorological and hydrological data provided and Dzikujia National Park for the help during the fieldwork. Furthermore, we thank editors and anonymous reviewers for their advice.

## References

- Balaukas, L., Taminskas, J., Mažeika, J., Stančikaitė, M., 2013. Lateglacial and Early Holocene palaeohydrological changes in the upper reaches of the Ula river: an example from south eastern Lithuania. *The Holocene* 23, 117–126.
- Balevičius, K., Giniūnas, K., Jankevičienė, R., Prusaite, J., Šešelgis, K., Tamošaitis, J., 1984. Čepkelių raisto vandeningo kitimas remiantis dendrochronologiniais duomenimis. Čepkelių rezervatas [Čepkeliai wetland water content variation based on dendrochronological data. Čepkeliai reserve]. Vilnius 44–45. [In Lithuanian].
- Boggie, R., 1972. Effect of water-table height on root development of *Pinus contorta* on deep peat in Scotland. *Oikos* 23, 304–312.
- Boggie, R., 1977. Water-table depth and oxygen content of deep peat in relation to root growth of *Pinus contorta*. *Plant Soil* 48 (2), 447–454. <https://doi.org/10.1007/BF02187253>.
- Braekke, F.H., 1983. Water table levels at different drainage intensities on deep peat in northern Norway. *Forest Ecol. Manage.* 5 (3), 169–192. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(83\)90070-1](https://doi.org/10.1016/0378-1127(83)90070-1).
- Brüggemann, N., Gessler, A., Kayler, Z., Keel, S.G., Badeck, F., Barthel, M., Boeckx, P., Buchmann, N., Brugnoli, E., Esperschütz, J., Gavrichkova, O., Ghashghaie, J., Gomez-Casanovas, N., Keitel, C., Knohl, A., Kuptz, D., Palacio, S., Salmon, Y., Uchida, Y., Bahn, M., 2011. Carbon allocation and carbon isotope fluxes in the plant-soil-atmosphere continuum: a review. *Biogeosciences* 8, 3457–3489. <https://doi.org/10.5194/bg-8-3457-2011>.
- Bukantis, A., 1994. Lithuanian Climate. Vilnius. p. 186 [In Lithuanian].
- Cedro, A., Lamentowicz, M., 2011. Contrasting responses to environmental changes by pine (*Pinus sylvestris* L.) growing on peat and mineral soil: an example from a Polish Baltic bog. *Dendrochronologia* 29, 211–217. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2010.12.004>.
- Charman, D.J., Brown, A.D., Hendon, D., Karofeld, E., 2004. Testing the relationship between Holocene peatland paleoclimate reconstructions and instrumental data at two European sites. *Quaternary Science Reviews* 23 (1–2), 137–143. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2003.10.006>.
- Cook, E.R., Kairiukstis, L.A., 1990. *Methods of Dendrochronology, Applications in the Environmental Sciences*. Kluwer Academic Publishers, International Institute for Applied Systems Analysis, London. 10.1007/978-94-015-7879-0.
- Cook, E.R., Krusic, P.J., 2006. ARSTAN: 41: a tree-ring standardization program based on detrending and autoregressive time series modeling, with interactive graphics. Lamont Doherty Earth Observatory of Columbia University, New York. Tree-Ring Laboratory.
- Coutts, M.P., 1982. The tolerance of tree roots to waterlogging. *New Phytologist* 90 (3), 467–476. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1982.tb04479.x>.
- Dang, Q.L., Lieffers, V.J., 1989. Climate and annual ring growth of black spruce in some Alberta peatlands. *Can. J. Bot.* 67 (6), 1885–1889. <https://doi.org/10.1139/b89-239>.
- Donohue, R.J., McVicar, T.R., Roderick, M.L., 2010. Assessing the ability of potential evaporation formulations to capture the dynamics in evaporative demand within a changing climate. *J. Hydrol.* 386, 186–197.
- Dimitrov, D.D., Grant, R.F., Lafleur, P.M., Humphreys, E.R., 2010. Modeling the effects of hydrology on ecosystem respiration at Mer Bleue bog. *J. Geophys. Res.* 115, G04043. <https://doi.org/10.1029/2010JG001312>.
- Edvardsson, J., Hansson, A., 2015. Multiannual hydrological responses in Scots pine radial growth within raised bogs in southern Sweden. *Silva Fennica* 49, 1–14. <https://doi.org/10.14214/sf.1354>.
- Edvardsson, J., Edwards, T.W.D., Linderson, H., Hammarlund, D., 2014. Exploring climate forcing of growth depression in subfossil South Swedish bog pines inferred from stable isotopes. *Dendrochronologia* 32, 55–61. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2013.08.002>.
- Edvardsson, J., Rimkus, E., Corona, C., Šimanauskienė, R., Kazys, J., Stoffel, M., 2015a. Exploring the impact of regional climate and local hydrology on *Pinus sylvestris* L. growth variability e a comparison between pine populations growing at peat soils and mineral soils in Lithuania. *Plant Soil* 392, 345–356. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2466-9>.
- Edvardsson, J., Šimanauskienė, R., Taminskas, J., Baužiene, J., Stoffel, M., 2015b. Increased tree establishment in Lithuanian peat bogs detected using a combination of field and remotely sensed approaches. *Sci. Total Environ.* 505, 113–120. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.078>.
- Edvardsson, J., Stoffel, M., Corona, C., Bragazza, L., Leuschner, H.H., Charman, D.J., Helama, S., 2016. Subfossil peatland trees as proxies for palaeohydrology and climate reconstruction during the Holocene. *Earth-Sci. Rev.* 163, 118–140. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.10.005>.
- Freeman, C., Lock, M.A., Reynolds, B., 1993. Fluxes of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O from a Welsh peatland following simulation of water table draw-down: potential feedback to climatic change. *Biogeochemistry* 19 (1), 51–60. <https://doi.org/10.1007/BF00000574>.
- Friedman, J.H., 1984. *A Variable Span Smoother*. Department of Statistics Technical Report LCS 5. Stanford University, Stanford.
- Fritts, H.C., 1976. *Tree Rings and Climate*. Academic Press, London, p. 567.

- Gažovič, M., Kutzbach, L., Schreiber, P., Wille, C., Wilmking, M., 2010. Diurnal dynamics of CH<sub>4</sub> from a boreal peatland during snowmelt. *Tellus B* 62 (3), 133–139. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2010.00455.x>.
- Gorham, E., 1991. Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming. *Ecol. Appl.* 1 (2), 182–195. <https://doi.org/10.2307/1941811>.
- Hendon, D., Charman, D.J., 2004. High-resolution peatland water-table changes for the past 200 years: the influence of climate and implications for management. *Holocene* 14, 125–134. <https://doi.org/10.1191/0959683604hl695rp>.
- Holmes, R.L., 1983. Computer assisted quality control in tree ring dating and measurement. *Tree-ring Bull.* 43, 69–78.
- Howie, S.A., Meerveld, I.T., 2011. The essential role of the lagg in raised bog function and restoration: a review. *Wetlands* 31, 613–622. <https://doi.org/10.1007/s13157-011-0168-5>.
- Joosten, H., Clarke, D., 2002. Wise use of mires and peatlands – Background and principles including a framework for decision-making. International Mire Conservation Group/International Peat Society. p. 304.
- Kilian, M.R., Van der Plicht, J., Van Geel, B., 1995. Dating raised bogs: New aspects of AMS <sup>14</sup>C wiggle matching, a reservoir effect and climatic change. *Quaternary Sci. Rev.* 14 (10), 959–966. [https://doi.org/10.1016/0277-3791\(95\)0081-X](https://doi.org/10.1016/0277-3791(95)0081-X).
- Kozłowski, T.T., 1997. Responses of woody plants to flooding and salinity. *Tree Physiol.* 1, 1–29. <https://doi.org/10.1093/treephys/17.7.490>.
- Laffleur, P.M., Roulet, N.T., Admiral, S.W., 2001. Annual cycle of CO<sub>2</sub> exchange at a bog peatland. *J. Geophys. Res.* 106 (D3), 3071–3081. <https://doi.org/10.1029/2000JD900588>.
- Lamentowicz, M., Galka, M., Lamentowicz, L., Obremska, M., Kühl, N., Lücke, A., Jassey, V.E.J., 2015. Reconstructing climate change and ombrotrophic bog development during the last 4000 years in northern Poland using biotic proxies, stable isotopes and trait-based approach. *Palaeoecogr. Palaoclimatol. Palaeoecol.* 418, 261277. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2014.11.015>.
- Leuschner, H.H., Sass-Klaassen, U., Jansma, E., Baillie, M.G.L., Spurk, M., 2002. Subfossil European bog oaks: population dynamics and long-term growth depressions as indicators of changes in the Holocene hydro-regime and climate. *The Holocene* 12 (6), 695–706. <https://doi.org/10.1191/0959683602hl584rp>.
- Leuschner, H.H., Bauerochse, A., Metzler, A., 2007. Environmental change, bog history and human impact around 2900 BC in NW Germany—preliminary results from a dendroecological study of a sub-fossil pine woodland at Campemoor, Dümmer Basin. *Vegetation Hist. Archaeobot.* 16 (2–3), 183–195. <https://doi.org/10.1007/s00334-006-0084-4>.
- Linderholm, H.W., Moberg, A., Grüdd, H., 2002. Peatland pines as climate indicators? A regional comparison of the climatic influence on Scots pine growth in Sweden. *Can. J. For. Res.* 32 (8), 1400–1410. <https://doi.org/10.1139/x02-071>.
- Linkevičienė, R., 2009. Impact of river capture on hydrography and water resources: case study of Ula and Katra catchments, south Lithuania. *The Holocene* 19 (8), 1233–1240.
- MacDonald, G.M., Beilman, D.W., Kremenetski, K.V., Sheng, Y., Smith, L.C., Velichko, A.A., 2006. Rapid early development of circumarctic peatlands and atmospheric CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> variations. *Science* 314, 285–288.
- Mažeika, J., Guobytė, R., Kibirštis, G., Petrošius, R., Skuratovič, Ž., Taminskas, J., 2009. The use of carbon-14 and tritium for peat and water dynamics characterization: case of Čepkeliai Peatland, Southeastern Lithuania. *Geochronometria* 34, 41–48.
- McVicar, T.R., Roderick, M.L., Donohue, R.J., Li, L.T., Van Niel, T.G., Thomas, A., Griesser, J., Jhajharia, D., Himri, Y., Mahowald, N.M., Mescherskaya, A.V., Kruger, A.C., Rehman, S., Dinpashov, Y., 2012. Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: Implications for evaporation. *J. Hydrol.* 416–417, 182–205.
- Matthews, E., Fung, I., 1987. Methane emission from natural wetlands: global distribution, area, and environmental characteristics of sources. *Glob. Biogeochem. Cycles* 1 (1), 61–86. <https://doi.org/10.1029/GB001i001p00061>.
- Mitsch, W.J., Bernal, B., Nahlik, A.M., Mander, Ü., Zhang, L., Anderson, C.J., 2013. Wetlands, carbon, and climate change. *Lands. Ecol.* 28 (4), 583–597. <https://doi.org/10.1007/s10980-012-9758-8>.
- Moore, T.R., Knowles, R., 1989. The influence of water table levels on methane and carbon dioxide emissions from peatland soils. *Can. J. Soil Sci.* 69 (1), 33–38. <https://doi.org/10.4141/cjss89-004>.
- Nokes, S.E., 1995. Evapotranspiration. In: Ward, A.D., Elliot, W.J. (Eds.), In: *E. Environmental hydrology*. Boca Raton, New York, pp. 91–130.
- Ohlson, M., 1995. Growth and nutrient characteristics in bog and fen populations of Scots pine (*Pinus sylvestris*). *Plant Soil* 172 (2), 235–245. <https://doi.org/10.1007/BF00011326>.
- Osvald, H., 1933. Vegetation of the Pacific Coast bogs of North America. *Acta Phytogeogr. Suoc* 5, 1–32.
- Pallardy, S.G., 2008. Physiology of woody plants, 3rd ed. Elsevier/Academic Press. p. 454.
- Pepin, S., Plamondon, A.P., Britel, A., 2002. Water relations of black spruce trees on a peatland during wet and dry years. *Wetlands* 22 (2), 225–233. [https://doi.org/10.1672/0277-5212\(2002\)022\[0225:WROBST\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1672/0277-5212(2002)022[0225:WROBST]2.0.CO;2).
- Povilaitis, A., Taminskas, J., Gulbinas, Z., Linkevičienė, R., Pileckas, M., 2011. Lithuanian wetlands and their water protective importance. p. 327. [In Lithuanian].
- Pukienė, R., 2001. Natural changes in bog vegetation reconstructed by sub-fossil tree remnant analysis. *Biologia* 2, 111–113.
- Rigg, G.B., 1925. Some Sphagnum bogs of the north Pacific coast of North America. *Ecology* 6, 260–279. <https://doi.org/10.2307/1929201>.
- Rimkus, E., Kažys, J., Bukantis, A., Krotovas, A., 2011. Temporal variation of extreme precipitation events in Lithuania. *Oceanologia* 53, 259–277.
- Rinn, F., 2003. TSAP-Win user reference manual. Rinntech, Heidelberg.
- Ruseckas, J., Grigaliūnas, V., 2008. Effect of drain-blocking and meteorological factors on groundwater table fluctuations in Kamanos Mire. *J. Environ. Eng. Landsc. Manage.* 16 (4), 168–177.
- Saarnio, S., Morero, M., Shurpali, N.J., Tuittila, E.S., Mäkilä, M., Alm, J., 2007. Annual CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> fluxes of pristine boreal mires as a background for the lifecycle analyses of peat energy. *Boreal Environ. Res.* 12, 101–113.
- Sagerfors, J., Lindroth, A., Grelle, A., Klemetsson, L., Weslien, P., Nilsson, M., 2008. Annual CO<sub>2</sub> exchange between a nutrient-poor, minerotrophic, boreal mire and the atmosphere. *J. Geophys. Res.* 113, G01001. <https://doi.org/10.1029/2006JG000306>.
- Salm, J.O., Kimmel, K., Uri, V., Mander, Ü., 2009. Global warming potential of drained and undrained peatlands in Estonia: a synthesis. *Wetlands* 29 (4), 1081–1092. <https://doi.org/10.1672/08-206.1>.
- Sass-Klaassen, U., Poole, I., Wils, T., Helle, G., Schleser, G.H., van Bergen, P.F., 2005. Carbon and oxygen isotope dendrochronology in sub-fossil bog oak tree rings – a preliminary study. *IAWA J.* 26, 121–136.
- Smiljanic, M., Seo, J., Länelaid, A., Maaten-Thuisen, M.V., Stajič, B., Wilmking, M., 2014. Peatland pines as a proxy for water table fluctuations: Disentangling tree growth, hydrology and possible human influence. *Sci. Total Environ.* 500–501, 52–63. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.08.056>.
- Skaggs, R.W., 1980. Drainmod Reference Report. Methods for design and evaluation of drainage-water management systems for soils with water tables. North Carolina State University, Raleigh, NC.
- Stančikaitė, M., Gedminienė, L., Edvardsson, J., Stoffel, M., Corona, C., Gryguc, G., Uogintis, D., Zinkutė, R., Skuratovič, Z., Taraškevičius, R., 2017. Holocene vegetation and hydroclimatic dynamics in SE Lithuania—Implications from a multi-proxy study of the Čepkeliai bog. *Quaternary Int.* <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.08.039>.
- Stoffel, M., Corona, C., 2014. Dendroecological dating of geomorphic disturbance in trees. *Tree Ring Res.* 70, 3–20.
- Stonevičius, E., Rimkus, E., Štaras, A., Kažys, J., Valiūškevičius, G., 2017. Climate change impact on Nemunas River basin hydrology in the 21st century. *Boreal Environ. Res.* 22, 49–65.
- Sumner, D.M., Jacobs, J.M., 2005. Utility of Penman-Monteith, Priestly-Taylor, reference evapotranspiration, and pan evaporation methods to estimate pasture evapotranspiration. *J. Hydrol.* 308, 81–104.
- Taminskas, J., Mažeika, A., Valiūškevičienė, L., 2008a. Comparison of potential evapotranspiration estimation according to air temperature. *Annales Geographicae* 41 (1–2), 81–89 [In Lithuanian].
- Taminskas, J., Linkevičienė, R., Mažeika, J., Kibirštis, G., 2008b. The impact of global climate change for hydrometeorological conditions of Čepkeliai Peatland: the elements of vertical water cycle. *Annales Geographicae* 40 (2), 50–60 [In Lithuanian].
- Taminskas, J., Pileckas, M., Šimanasienė, R., Linkevičienė, R., 2012. Wetland classification and inventory in Lithuania. *Baltica* 25, 33–44.
- Tanneberger, F., Wichtmann, W., 2011. Carbon credits from peatland rewetting. Climate – biodiversity – land use. Science, policy, implementation and recommendations of a pilot project in Belarus. Schweizerbart, Stuttgart. p. 223.
- Taylor, S.A., Ashcroft, G.L., 1972. *Physical Edaphology*. W.H. Freeman and Co., San Francisco, CA.
- Thornthwaite, C.W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geograph. Rev.* 38, 55–94. <https://doi.org/10.2307/210739>.
- Turetsky, M.R., Kotowska, A., Bubier, J., Dise, N.B., Crill, P., Hornbrook, E.R., Minkinen, K., Moore, T.R., Myers-Smith, I.H., Nykanen, H., Olefeldt, D., Rinne, J., Saarnio, S., Shurpali, N., Tuittila, E.S., Waddington, J.M., White, J.R., Wickland, K. P., Wilmking, M., 2014. A synthesis of methane emissions from 71 northern, temperate, and subtropical wetlands. *Glob. Change Biol.* 20 (7), 2183–2197. <https://doi.org/10.1111/gcb.12580>.
- Turetsky, M.R., Benscoter, B., Page, S., Rein, G., Van Der Werf, G.R., Watts, A., 2015. Global vulnerability of peatlands to fire and carbon loss. *Nat. Geosci.* 8, 11–14.
- Turunen, J., Tomppo, E., Tolonen, K., Reinikainen, A., 2002. Estimating carbon accumulation rate of undrained mires in Finland – application to boreal and subarctic regions. *The Holocene* 12, 69–80.
- Vaganov, E.A., Kacheav, A.V., 1992. Dendroclimatic analysis of the growth of pine in forest-bog phytocenoses of Tomsk Oblast. *Lesovedenie* 6 (1), 3–10 [in Russian].
- Van Bellen, S., Mauquoy, D., Payne, R.J., Roland, T.P., Daley, T.J., Hughes, P.D.M., Loader, N.J., Street-Perrott, F.A., Rice, E.M., Pancotto, V.A., 2014. Testate amoebae as a proxy for reconstructing Holocene water table dynamics in southern Patagonian peat bogs. *J. Quaternary Sci.* 29 (5), 463474. <https://doi.org/10.1002/jqs.2719>.
- Vicente-Serrano, S.M., Begueria, S., Lopez-Moreno, J.I., 2010. A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *J. Clim.* 23 (7), 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>.
- Wigley, T.M., Briffá, K.R., Jones, P.D., 1984. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *J. Clim. Appl. Meteorol.* 23 (2), 201–213.
- Xu, C.Y., Singh, V.P., 2001. Evaluation and generalization of temperature-based methods for calculating evaporation. *Hydrology Process.* 15 (2), 305–319.

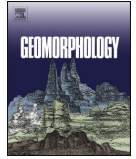
## II

### **Climate change and water table fluctuation: implications for raised bog surface variability**

Taminskas J., Linkevičienė R., Šimanauskienė R., Jukna L., Kibirškis  
G., Tamkevičiūtė M.

*Geomorphology* 2018, 304: 40–49.

Reprinted with permission from Journal of *Geomorphology*



# Climate change and water table fluctuation: Implications for raised bog surface variability



Julius Taminskas<sup>a</sup>, Rita Linkevičienė<sup>a,b</sup>, Rasa Šimanauskienė<sup>a,b,\*</sup>, Laurynas Jukna<sup>b</sup>, Gintautas Kibirskštis<sup>c</sup>, Marija Tamkevičiūtė<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Nature Research Centre, Akademijos str. 2, Vilnius, Lithuania

<sup>b</sup> Faculty of Chemistry of Geosciences, Čiurlionio str. 21/27, Vilnius University, Lithuania

<sup>c</sup> Čepkeliai-Dzūkija PAN Park, Vilniaus str. 3, Merkinė, LT-65334 Varėna District, Lithuania

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 20 July 2017

Received in revised form 14 December 2017

Accepted 19 December 2017

Available online 24 December 2017

### Keywords:

Climate change

Peatland surface

Raised bog water table

Surface variability

Net rainfall

## ABSTRACT

Cyclic peatland surface variability is influenced by hydrological conditions that highly depend on climate and/or anthropogenic activities. A low water level leads to a decrease of peatland surface and an increase of C emissions into the atmosphere, whereas a high water level leads to an increase of peatland surface and carbon sequestration in peatlands. The main aim of this article is to evaluate the influence of hydrometeorological conditions toward the peatland surface and its feedback toward the water regime. A regional survey of the raised bog water table fluctuation and surface variability was made in one of the largest peatlands in Lithuania. Two appropriate indicators for different peatland surface variability periods (increase and decrease) were detected. The first one is an  $\sim 200 \text{ mm y}^{-1}$  average net rainfall over a three-year range. The second one is an average annual water depth of 25–30 cm. The application of these indicators enabled the reconstruction of Čepkeliai peatland surface variability during a 100 year period. Processes of peatland surface variability differ in time and in separate parts of peatland. Therefore, internal subbasins in peatland are formed. Subbasins involve autogenic processes that can later affect their internal hydrology, nutrient status, and vegetation succession. Internal hydrological conditions, surface fluctuation, and vegetation succession in peatland subbasins should be taken into account during evaluation of their state, nature management projects, and other peatland research works.

© 2017 Elsevier B.V. All rights reserved.

## 1. Introduction

The nature of peatlands is controlled by hydrological processes, and normally, their formation begins in moist depressions. These depressions are filled with partially decayed litter, and thus, peatland grows upward and expands laterally (Korhola, 1992; Franzén, 1994; Almquist-Jacobson and Foster, 1995; Franzén et al., 1996; Korhola et al., 1996; Yu et al., 2000). Afterward, peatland transforms into a raised bog phase. The surface of the raised bog depends on the organic mass balance. The raised bog shape and the notion of its change are based on several assumptions: (i) peat accumulation is faster at the bog centre resulting in a convex shape of the peatland surface; (ii) raised bog surface height is a function of its age and the rate of peat accumulation decreases over time; and (iii) a raised bog is drained by streams, which are fed by a constant area of peatland. These assumptions are mainly based on the *bog growth model* (BGM) (Clymo, 1984) and the *groundwater mound hypothesis*

(Childs and Youngs, 1961; Ingram, 1982). Both hypotheses make predictions for large-scale patterns (e.g., a huge peatland complex) and long-term peatland dynamics (e.g., Holocene period) (Yu et al., 2001). The changes of the peatland surface will have a constant character as the bias of the peat age detection is  $\sim 100\text{--}200$  years (Mažeika et al., 2009). However, the small-scale (e.g., a part of peatland) and short-term research (e.g., up to 100 years) show the intensive fluctuation of the peatland surface (Franzén, 2006). Observations on European peatlands (Ingram, 1983; Weber, 1902; Glaser et al., 2004) describe seasonal or annual fluctuations of peatland surfaces in the range of 10–30 cm. More recent research suggests that peatland surface fluctuations occurring from +18 to  $-43$  cm could be observed over a short time series (during several decades) (Franzén, 2006). However, the peatland surface changes over the long time scale will approach the rate of peat addition to catotelm, i.e.,  $\text{ca. } < 1 \text{ mm y}^{-1}$  (Belyea and Baird, 2006), and must not be related to a seasonal phenomenon but to longer-term hydrological fluctuations (Almendinger et al., 1986; Feurdean et al., 2015).

Although the bog growth model and the groundwater mound hypothesis were landmark advances of their time, a hierarchical approach to modelling could lead to a better representation of peatland development and a response to external forcing (Belyea and Baird, 2006).

\* Corresponding author at: Nature Research Centre, Akademijos str. 2, Vilnius, Lithuania.

E-mail addresses: [julius.taminskas@geo.lt](mailto:julius.taminskas@geo.lt) (J. Taminskas), [rita.linkeviciene@geo.lt](mailto:rita.linkeviciene@geo.lt) (R. Linkevičienė), [rasa.simanauskieni@gf.vu.lt](mailto:rasa.simanauskieni@gf.vu.lt) (R. Šimanauskienė).

Moreover, the rate of peat production and decay is different in the acrotelm and catotelm. Acrotelm, which is the upper oxic layer (stratum), is a product of several decades and indicates microforms of peatland; whereas catotelm, which is the underlying anoxic layer, reflects mezofoms of peatland (Holden and Burt, 2003; Baird et al., 2016).

The constant accumulation of organic material in the catotelm (Clymo, 1984) influences the augmentation of the peat layer at  $1 \text{ mm y}^{-1}$  in pristine peatlands (Franzén, 2006). However, our observations imply more rapid changes of the peatland surface, which is influenced by peat accumulation and subsidence. Favourable humidity conditions (high net rainfall) influence a rapid development of peat-forming plants. Moreover, low peat decomposition rates induce a high litter production in the acrotelm. Therefore, the increase of the raised bog surface is up to several  $\text{cm y}^{-1}$ . Water regime changes (a lack of humidity) in the acrotelm influence the subsidence of peat, and the raised bog surface decreases up to several  $\text{cm y}^{-1}$ . The main indicators of the raised bog surface variation are average annual excess precipitation (also called net rainfall) and average annual water table depth.

Therefore, the main aim of this article is to evaluate the influence of hydrometeorological conditions toward the peatland surface and its feedback toward the water table depth. This theory implies the dynamics of limits of peatland subbasins and is vitally important for sustainable peatland management and maintenance. The restoration of disturbed peatland habitats requires the ability to comprehend the complex mechanism of peatland renaturalization in the context of the subbasin's level. Methodological applications for peatland restoration after the disturbed hydrological regime are many (Gorham and Rochefort, 2003; Holden et al., 2004; Howie and Meerveld, 2011). However, the lack of a holistic approach in the subbasins level may prolong a recovery of many hydrological and ecological processes for many decades (Price et al., 2003). To date, most of the research on Lithuanian peatlands (Taminskas et al., 2008a; Mažeika et al., 2009; Kažys et al., 2015) concentrates on the influence of climate change toward the hydrological regime and peatland's landscape (Edvardsson et al., 2015). However, no studies are available

on peatland surface variation and hydroclimatic interdependencies. Therefore, in this study, we will concentrate on (i) the raised bog surface and subdivision issue and (ii) climate, hydrology, and the raised bog surface variation interrelationships.

## 2. Study area

Čepkeliai ( $54^{\circ}00'N$ ,  $24^{\circ}30'E$ ) is one of the largest peatlands in Lithuania (5858 ha) consisting of raised bogs (82% total area), fens (16%), and transition mires (2%). This peatland consists of 3.2% of all of the natural (nondrained) Lithuanian mires (Taminskas et al., 2012). Several mineral substrate islands and 21 small lakes are located inside this peatland.

Čepkeliai peatland is drained by three streams (Fig. 1): Katra (109 km, the right inflow of the Nemunas River) and the Ūla (84 km) and Grūda (36 km) streams (inflows of Merkys). The Ūla and Katra catchments changed in the middle of the nineteenth century because of natural capture. Accordingly, the discharge changes, transformations of the rivers' longitudinal profiles, and reduction and extinction of lakes in these catchments were observed (Linkevicienė, 2009). No research regarding the capture influence on Čepkeliai peatland surface development was carried out.

The surface of the peatland is slightly undulating (128.5–134.4 m asl). The average depth of the organic layers is  $\sim 2.3 \text{ m}$  but can locally be as much as 16.5 m.

The average annual temperature is  $6.8^{\circ}\text{C}$  in this region. The average monthly temperature fluctuates from  $-3.7^{\circ}\text{C}$  in January up to  $17.9^{\circ}\text{C}$  in July. The average annual rainfall is  $\sim 700 \text{ mm}$ , and snow cover remains for  $\sim 90$  days. Annual net rainfall is  $\sim 220 \text{ mm}$ .

Farming activities are restricted in the whole Čepkeliai peatland and its surroundings, as this territory is covered by different protected area status. The Čepkeliai state strict nature reserve was founded in 1975. It was included in the Ramsar site list as a Wetland of International

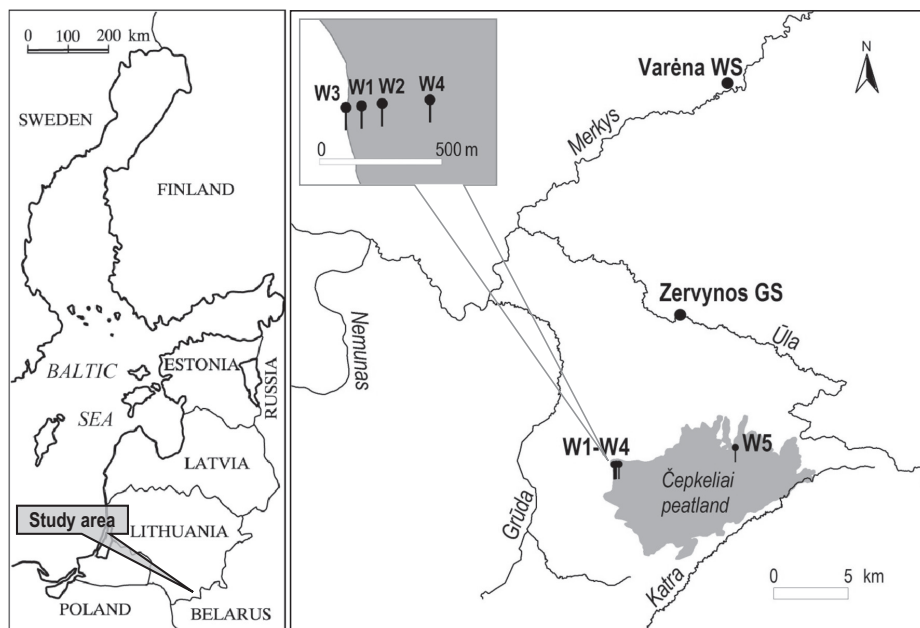


Fig. 1. Location map of the Čepkeliai peatland (WS – weather station; GS – gauging station; W1–W5 – wells).

Importance in 1993, Čepkeliai peatland is also an important part of the European Union ecological network – NATURA 2000 territory.

### 3. Materials and methods

#### 3.1. Peatland surface and subbasins

LIDAR (*Light Detection and Ranging*) point cloud surface data from the Lithuania surface scanning project and implemented by the National Land Surface Agency of Lithuania in 2007 and topographic maps at the scale of 1:10,000 from 1981 were used for determination of the Čepkeliai surface variation during the period from 1981 to 2007 and the identification of drainage subbasins of peatland. The DEM (*digital elevation model*) data, vector and raster surface elevation layers from the LiDAR point cloud, and topographic maps (after vectorization) were processed and calculated with ArcGIS 10.4 version. The data were used for further analysis, identification of drainage subbasins, and scale of the surface changes.

Absolute values of peatland surface changes were not analysed in detail because of the different accuracies of the LiDAR point cloud surface data and topographical maps. These values were generalized into three surface change classes: slight increase ( $\geq +0.1$  m), slight decrease ( $\leq -0.1$  m), and no changes ( $-0.1$ – $+0.1$  m). Based on these changes, the peatland surface variability map was formed.

To detect the discontinuous character of peatland moisture conditions, a terrain recognition and cartographical interpretation of the desiccation areas of peatland pine trees (Fig. 4) was made in 2012–2013.

#### 3.2. Peatland water table and surface variability

Water table fluctuations in Čepkeliai peatland were analysed according to the data of five wells (W1, W2, W3, W4, and W5) located in the northwestern and north-central parts of the raised bog. The W1 well is located at 65 m, the W2 well at 155 m, the W3 well at 10 m, and the W4 well at 300 m from the western margin of the peatland. The W5 well is located 450 m from the north margin of the raised bog (Fig. 1). Long-term (2002–2016) peatland surface elevation and water table measurements were made only in the W1 and W2 wells. These measurements are valuable for showing the long-term relationship between peatland surface elevation and the water table. The measurement period is comprised of dry and wet years. However, long-term measurements were affected only in two wells that are located close to each other.

In other wells (W3, W4, and W5), short-term measurements (2–5 year period) were made during 2002–2016. They are located in other parts of the peatland and their measurements enable an evaluation and verification of the W1 and W2 results.

The water table in all of the wells was measured during the vegetation period (April–October). Measurements were made manually and every 10 days with an accuracy of 1 cm. According to these measurements, the average annual water table was calculated. Water table reconstruction is based on the long-term water table measurements in W1 and W2 ( $H_1$  and  $H_2$ , m asl).

The peatland surface variability was analysed in correspondence with the W1, W2, W3, W4, and W5 measurements. The surface elevations near the wells were measured manually and every 10 days with an accuracy of 1 cm during the vegetation period (April–October) of 2007–2016. According to these data, the average annual surface elevation was calculated ( $SE$ , m asl).

According to the difference between the water table and the peatland surface elevation, the average annual water depth ( $d$ , m) during 2007–2016 was calculated in all of the wells:  $d = H - SE$ .

An analysis of the climate indices were made according to precipitation and air temperature measurements made at the Varėna weather station (WS) during 1929–2016. The Varėna WS is located 27 km to the north of the Čepkeliai peatland centre (Fig. 1). Air temperature

differences between the peatland and WS are insignificant. However, precipitation, especially heavy rain, may slightly differ in the Varėna WS and Čepkeliai peatland. According to Varėna WS precipitation measurements, the average annual precipitation ( $P$ , mm) was calculated. The temperature data were used to calculate the potential evapotranspiration ( $PET$ , mm) according to the Thornthwaite (1948) equation. Thornthwaite's equation is based entirely upon a temperature relationship, has the disadvantage of a rather flimsy physical basis, and has only theoretical justification (Taylor and Ashcroft, 1972). Because the temperature and vapour pressure gradient are modified by the movement of air and by the heating of the soil and surroundings, the formula generally is not valid but must be tested empirically whenever the climate is appreciably different from areas in which it has been tested in original spatial and temporal contexts (Skaggs, 1980; Nokes, 1995; Xu and Singh, 2001). However, no measurements have been made of the net radiation since 1929 in the Varėna WS. Therefore, the evaluation of evapotranspiration from the peatland was complicated, and Penman's or Priestly-Taylor formulas (Sumner and Jacobs, 2005), although very appropriate, could not be used in our case. However, prior research (Taminskas et al., 2008b) showed a reliable relationship ( $R^2$  from 0.57 to 0.62) between estimated actual evapotranspiration and potential evapotranspiration estimated according to Thornthwaite's equation in the territories near our study area.

Net rainfall ( $NR$ , mm) was calculated after the evaluation of the difference between average annual precipitation and potential evapotranspiration. The net rainfall ( $NR$ ) for the year  $i$  is also known as the average annual excess and provides a simple measure of the water surplus or deficit for the analysed year:  $NR_i = P_i - PET_i$ . Long-term (2, 3 and 4 years) average  $NR$ ,  $NR_2$ ,  $NR_3$ , and  $NR_4$  was also used for further analysis.

Linear relationships between the measured values of the peatland water table ( $H_1$  and  $H_2$ ) and  $NR$  of the different periods were analysed. According to the analysis of these relationships, an average annual water table in W1 and W2 wells during 1930–2016 was reconstructed ( $H_{1r}$  and  $H_{2r}$ , m asl).

To evaluate the peatland surface variations, the annual peatland surface elevation gradients ( $\Delta SE$ :  $\Delta SE_n = SE_{n+1} - SE_n$ ) were calculated according to the average annual surface elevation ( $SE_n$ ). To reconstruct the peatland surface variation during the longer period, a reliable relationship between the surface variation and  $NR$  during 2007–2016 was detected. According to this relationship, the peatland surface elevation from 1930 to 2016 was reconstructed near the W1 and W2 wells ( $SE_{1r}$  and  $SE_{2r}$ , m asl). The average annual water depth was reconstructed in relation to the reconstructed peatland surface elevation and reconstructed average annual water table ( $d_{1r}$  and  $d_{2r}$ , m).

To evaluate the results derived from the W1 and W2 wells, relationships between  $NR$ ,  $d$ , and  $SE$  in the short-term wells (W3, W4, and W5) were analysed.

Ūla stream runoff data from the Zervynos water gauging station (GS) during 1960–2015 were used for verification of the reconstructed peatland water table and surface change. Ūla is one of three streams that drain the Čepkeliai peatland. Zervynos GS is situated ~25 km downstream from the Čepkeliai peatland (Fig. 1). After analysis of the relationship between the average annual water depth in the peatland ( $d$ ) and various indices of draining stream runoff, the strongest correlation was found with the annual minimum of 7 days of runoff ( $Q_{7min}$ ,  $m^3 s^{-1}$ ). This index of draining river runoff was used for verification of the reconstructed water table and surface elevation of the peatland.

## 4. Results

#### 4.1. Peatland surface and subbasins

Elevation of the Čepkeliai peatland surface is approximately 129–135 m asl. The raised bog is located in the northern, western and eastern parts of the peatland. The central part of the raised bog is  $> 132$  m asl, whereas the highest elevation point is located in the west of the raised

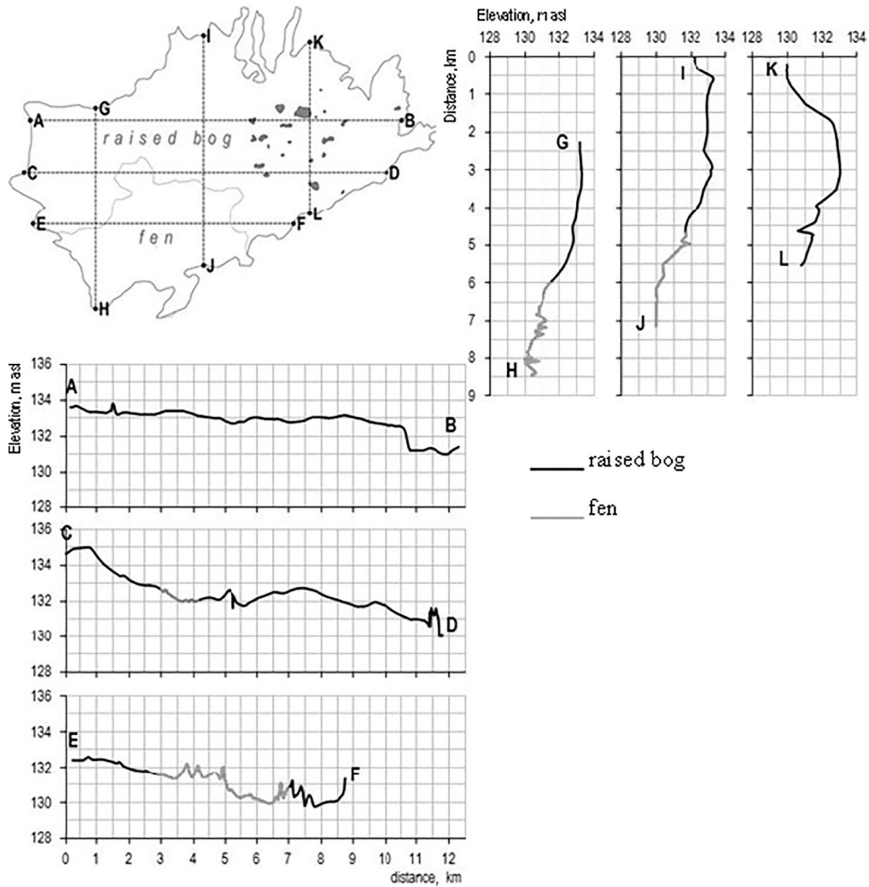


Fig. 2. Čepkeliai peatland profile graphs.

bog (> 134 m asl). The surface is lower and more undulated in the margins of the raised bog and fen that are located in the southern part of the peatland (Fig. 2). According to the raised bog profile graphs, the surface does not continuously increase to the centre. Rather, it is more undulated with the appearance of hollows and hillocks. The groups of hollows form watersheds of the subbasins.

The surface of the Čepkeliai peatland increased in the past few decades (Fig. 3). Only in a few areas in the Katra subbasin, mainly in the fen, can the decrease of the surface be observed. The surface variation was from –1.8 to +1.9 m when comparing the topographical map (1981) and LiDAR data (2007). Thus, the average annual change was ± 7 cm in the areas of the fastest surface variability.

In the plain watershed surface of the peatland, even small differences in elevation influence surface runoff distribution and water storage in the different subbasins. Peculiarities of the water regime, vegetation development, and peat formation in different parts of the peatland are a function of insularity of these subbasins and the conditions of the surface runoff. Seven parts have different draining conditions in the Čepkeliai peatland: the Ūla, Grūda, and Katra subbasins, in which water runs to the rivers; and four closed drainage subbasins, where water surplus is removed by groundwater exchange or

evapotranspiration (Fig. 4). The probable differences of hydrological conditions in the subbasins reflect the pine desiccation phenomenon in a closed subbasin that is located in the northwestern part of the peatland (Fig. 4). No pine desiccation was detected in other parts of the peatland.

#### 4.2. Climate, hydrology, and peatland surface variation

Overland flow and throughflow are the main causes of water loss in raised bogs. However, the water table depends on the main water balance elements, which are precipitation and evapotranspiration. Long-term change and periodical fluctuations of the water balance elements mostly influence the inequality of the water table in the peatlands and the development of the other processes. Existing meteorological data enable the evaluation of three-decade climate normals and comparison of the humidity conditions during these periods in the Čepkeliai peatland (Table 1).

Differences of NR show various conditions of peatland humidity during the three-decade period and in separate years. According to the graph (Fig. 5), the rotations of the dry or wet year sequences of the different lengths prevail. This influences long-term transformations of the

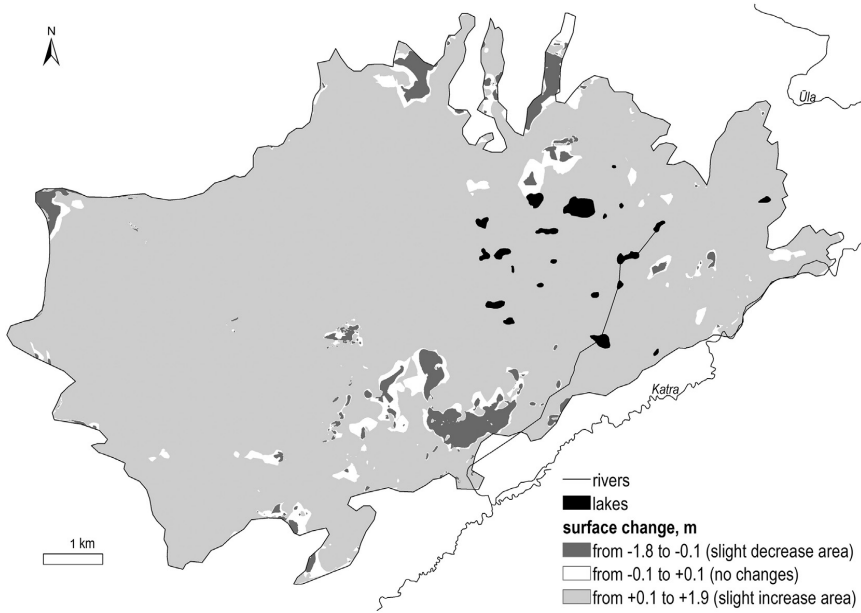


Fig. 3. Transformation of the Čepkeliai surface during 1981–2007.

peatland groundwater table and surface. For example, the dry period during 1959–1988 was not favourable for the surface increase: a low net rainfall induced the processes of surface decrease. However, two periods with high net rainfall were observed during 1989–2016 with a short interruption of lower net rainfall in the 1990s (Table 1, Fig. 5).

Fluctuation of the average water table in the wells corresponds to net rainfall in the same year (Fig. 5). However, a weak relationship between the average annual water table ( $H_1$  and  $H_2$ ) and annual

precipitation,  $PET$  and  $NR$ , is observed. The correlation coefficient between annual  $NR$  and the average water table is 0.101 ( $NR/H_1$ ) and 0.313 ( $NR/H_2$ ). A weak relationship also occurs between the average annual water table and net rainfall ( $NR_2$  and  $NR_3$ ). A possible explanation for this might be that the water table of previous years was not included in the evaluation process. A strong relationship is observed only between  $NR_4$  and the average annual water table in the wells:  $R = 0.616$ ,  $p < 0.05$  ( $W_1$ ) and  $R = 0.685$ ,  $p < 0.01$  ( $W_2$ ).

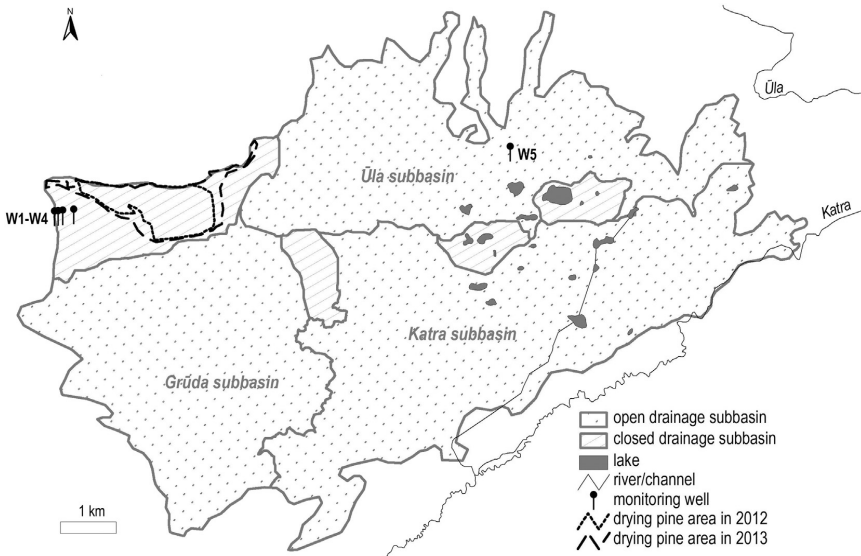


Fig. 4. Situation of the subbasins in 2007 in the Čepkeliai peatland.



**Table 1**  
Hydroclimatical indices are calculated according to the Varėna WS 1929–2016 data.

Index	Period					
	1929–2016			1929–1958	1959–1988	1989–2016
	Min	Max	Avg	Climate normals		
P, mm	423	874	680	686	654	701
PET, mm	414	511	469	464	462	481
NR, mm	-43	423	211	222	192	220

A strong and significant relationship is observed between the average annual water depth and the net rainfall of the two years ( $NR_2$ ):

in the first well  $R = 0.714, p < 0.05, d_{1r} = 0.0009 NR_2 - 0.463$  (1)

in the second well  $R = 0.759, p < 0.05, d_{2r} = 0.0006 NR_2 + 0.395$  (2)

This confirms that the relationship between net rainfall and the water table is weak. However, it has a strong character if we take into account net rainfall and water depth. Such differences could be explained by the significant influence of water depth toward evapotranspiration.

The water depth in wells W1 and W2 ( $d_{1r}$  and  $d_{2r}$ ) was reconstructed according to Eq. (1) and Eq. (2) during 1930–2016 (Fig. 6). The analysis of the relationship between the reconstructed water depth and the peatland draining river flow showed a strong correlation with annual 7-day minimum flow ( $R = 0.562, p < 0.00001$ ). Therefore, the minimum annual flow is appropriate for evaluation of the peatland water storage.

According to the measurements, the peatland surface variability may have a high amplitude and may be characterized by different trends. It depends on various factors such as vegetation productivity, the amount of litter and its level of decomposition, and acrotelm subsidence. Most of these factors are linked directly with the water table. It is critical for peatland development because it controls species composition through anoxia at depth, which retards decomposers and enables peat accumulation (Price et al., 2003). Meteorological conditions influence peat accumulation. In addition, the net accumulation of peat can occur if the summer water deficit is <100–150 mm (Maltby and Proctor, 1996). Our research confirms the proposition that the raised bog surface variability depends on annual net rainfall. A comparison of the annual surface elevation gradient ( $\Delta SE$ ) of the Čepkeliai peatland with the average value of  $NR_3$  showed that the peatland surface increased when the 3 year net rainfall average was >196–209 mm  $y^{-1}$ , ca.  $NR_3 > 200$  mm (Fig. 7).

Therefore, when the annual net rainfall is >200–220 mm, the peat surface increases; whereas the decline of the annual net rainfall (<200–220 mm) determines the decrease of the surface (Fig. 7). These

intervals were derived according to the analysis of long-term measurements (W1, W2). A significant influence of the net rainfall toward peatland development was mentioned in earlier studies: no bogs occur in those regions of Ireland where the average annual net rainfall is <250 mm (Hammond, 1984).

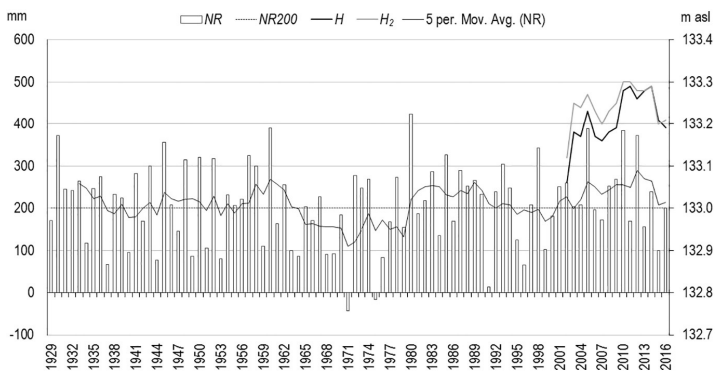
Additionally, a strong linear correlation ( $R = 0.728; p < 0.05$ ) was detected between  $\Delta SE$  and  $NR_3$  near the short-term wells W3, W4, and W5. However, the measurements in these wells were only taken during the increased surface periods. Therefore, hydroclimatical conditions influencing the surface decrease could be detected only according to the linear relationship. The surface decrease in these wells should be observed when  $NR_3 < 186$  mm (Fig. 8). Such differences compared to the abovementioned results are influenced by a small set of data. It might also be influenced by the difference of surface and hydrological conditions: W1 and W2 wells are located in the slope of peatland, W3 (near lagg), and W4 and W5 (in the flat part of the peatland).

According to the net rainfall, wet ( $NR > 200$  mm) and dry ( $NR < 200$  mm) years were distinguished. A wet year prevailed in 1929–2016, and the trend of the peatland surface increase was observed. Dry years prevailed in the 1960s and 1970s (Fig. 5). A significant decrease of the peatland surface is observed in this period, and the question arises as to what could evoke vegetation succession (a rapid overgrowth of peatland with woody vegetation) (Edvardsson et al., 2015).

Surface increase and decrease cycles were observed in the Čepkeliai peatland during 2007–2016. In this period, a strong linear correlation was detected between the annual peatland surface elevation change ( $\Delta SE$ ) and the water depth ( $d$ ) in the W1 and W2 wells:  $R = 0.739, p < 0.05 (\Delta SE_1/d_1), R = 0.734, p < 0.05 (\Delta SE_2/d_2)$ . According to these relationships, the peatland surface decrease replaced the increase and vice versa when the average annual water table was ~27–30 cm (Fig. 9). The water depth decline leads to the acceleration of the peatland surface increase. The fastest peatland surface increase, which was 7 cm  $y^{-1}$ , was detected in 2011 when the average annual water depth was 20–21 cm (Fig. 9, W1). The fastest decrease, which was nearly 6 cm  $y^{-1}$ , was in 2014 when the average annual water depth was 27–29 cm (Fig. 9, W2).

Another kind of relationship appeared between water depth in the W3, W4, and W5 wells and surface elevation. Additionally, the strong linear correlation ( $R = 0.769, p < 0.05$ ) between  $d$  and  $NR_3$  near the wells is observed according to these measurements (Fig. 10). However, as mentioned above, no measurements were made in these wells during the dry and surface-decreasing periods. Therefore, the linear correlation only shows that the surface decrease appears when the water depth declines <15 cm in the wells. Measurements of the W3, W4, and W5 wells are excluded from the retrospective analysis because of the short period and different surface and hydrological conditions.

The annual variability amplitude of the peatland surface near W1 well was from -6 up to +6 cm. The amplitude of the farther well W2



**Fig. 5.** Fluctuation of the measured water table ( $H_1$  and  $H_2$ ) in the Čepkeliai peatland wells and net rainfall (NR).

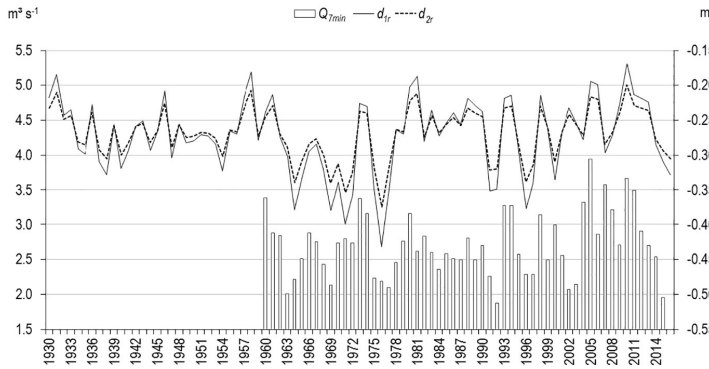


Fig. 6. Fluctuation of the reconstructed water depth of the Čepkeliai peatland ( $d_{1r}$  and  $d_{2r}$ ) and minimum annual 7 day flow of the Ūla River ( $Q_{7min}$ ).

was smaller and was from  $-6$  up to  $+4$   $\text{cm y}^{-1}$ . Although the peatland surface varied differently near the W1 and W2 wells in separate years, the trend of the surface variability was the same.

The variability amplitude of the peatland surface increase or decrease according to NR (Figs. 7 and 8) and  $d$  (Figs. 9 and 10) corresponds to the specific case and the limited set of our observations. Additional research is needed to specify these limits and to determine the application possibilities in other raised bogs.

Analysis of the minimum 7 day annual Ūla flow ( $Q_{7min}$ ) was performed to evaluate the relationships between the river flow and the peatland surface variation. The results showed a very similar variation of the minimum flow and estimated the annual surface elevation gradient ( $\Delta SE$ ) (Fig. 11). The peatland surface increases during the wet years, which is detected by the 7-day minimum annual river flow ( $Q_{7min} > 3.7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ).

The correlation coefficient between the raised bog annual surface elevation gradient and net rainfall (NR,  $NR_2$ ) varies from 0.606 up to 0.663 ( $p < 0.1$ ). A higher correlation and a positive relationship ( $R = 0.782, p < 0.05, \Delta SE_{r1} = 0.0489 NR_3 - 9.58$ ) was obtained between the annual surface elevation gradient  $\Delta SE$  close to the W1 well and average  $NR_3$ . A weaker positive relationship was obtained between the annual surface elevation gradient close to the W2 well ( $R = 0.696, p < 0.05, \Delta SE_{r2} = 0.0446 NR_3 - 9.336$ ). Therefore, the annual surface elevation gradient of the raised bog was calculated according to  $NR_3$ . The reconstructed peatland surface ( $SE_{r1}$  and  $SE_{r2}$ ) is based on the calculations of the annual surface elevation gradient ( $\Delta SE_r$ ). Parameters  $SE_{r1}$  and  $SE_{r2}$  show that because of favourable humidity conditions, the raised bog surface close to the W1 and W2 wells was increasing during the 1930–2016 period. The surface of the peat increased in the 61 cm (ca.  $7 \text{ mm y}^{-1}$ ) close to

the W1 well, whereas an increase of only 4 cm (ca.  $0.5 \text{ mm y}^{-1}$ ) close to the W2 well was estimated. Generally, the surface increased more quickly in the margins of the peatland. Therefore, the reconstructed peatland surface in 2011 close to the W1 well became higher compared with the W2 well that is located farther from the peatland margins (Fig. 11), and according to the measurements it occurred in 2015. Thus, the local direction of the surface slope changed, and a natural barrier for overland flow toward the margin of the raised bog formed.

Analysis of shorter periods showed even different peatland surface variation trends. A fast surface decrease was observed during the 1960s and 1970s: the average annual decrease was ca.  $8 \text{ mm y}^{-1}$  near the peatland margin (W1) and even  $21 \text{ mm y}^{-1}$  farther from the margin (W2). The surface of the peatland increased again during the 1980s: ca.  $28 \text{ mm y}^{-1}$  (W1) and ca.  $17 \text{ mm y}^{-1}$  (W2). Development of the peatland surface was rather stable starting from the 1990s up to 2004. It increased  $3 \text{ mm y}^{-1}$  on average near the peatland margins and it has decreased on average  $3 \text{ mm y}^{-1}$  farther from margin. A rapid vertical growth of the peatland surface may be observed from 2005:  $26 \text{ mm y}^{-1}$  (W1) and  $16 \text{ mm y}^{-1}$  (W2) (Fig. 11). According to the reconstructed surface elevation gradient, the cyclic raised bog surface variability prevails and depends on water storage, which is influenced by local or regional causes in a particular part of the raised bog. From 1970 to 2005 in Swedish raised bogs, the total surface decrease was as much as 17.8 cm or ca.  $5 \text{ mm y}^{-1}$  (Franzén, 2006). In our case, the reconstructed surface of the Čepkeliai peatland close to the first well (W1) increased insignificantly by only 8.2 cm or ca.  $2 \text{ mm y}^{-1}$ , whereas the data from the second well (W2) (surface decreased 14.6 cm or  $4 \text{ mm y}^{-1}$ , Fig. 12) are consistent with the results shown in the abovementioned article. Surface variation close to the peatland

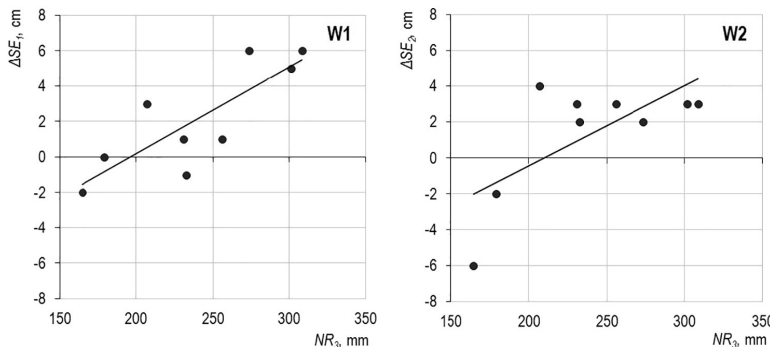


Fig. 7. The relationship between the annual peatland surface elevation gradient ( $\Delta SE$ ) near the W1 and W2 wells and the 3 years of net rainfall average ( $NR_3$ ).

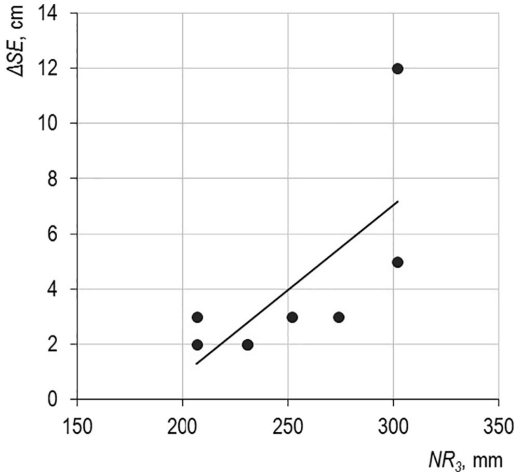


Fig. 8. Relationship between annual peatland surface elevation gradient ( $\Delta SE$ ) near W3, W4, and W5 wells and the 3 year net rainfall average ( $NR_3$ ).

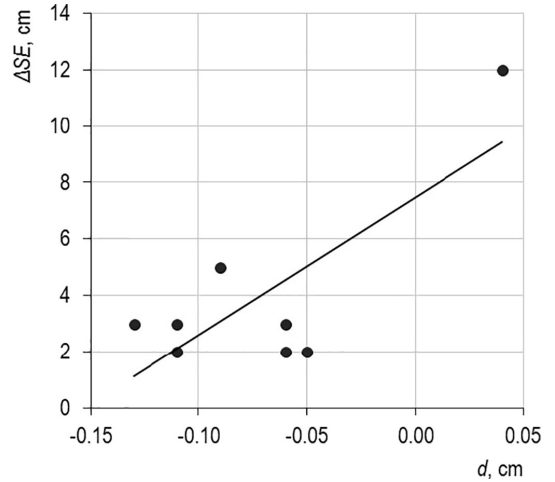


Fig. 10. Relationship between peatland annual surface elevation gradient ( $\Delta SE$ ) near W3, W4 and W5 wells and the estimated average annual water depth ( $d$ ).

margins (W1) could be influenced by the local water table in the peatland lagg zone, whereas the surface variation near the W2 well could be more affected by meteorological conditions and indicate the surface variability of the bigger part of the peatland. Analysis of LiDAR and topographic maps during 1981–2007 showed that the bigger part of the peatland surface has increased from 0.1 to 1.9 m (Fig. 3). According to surface observation data near the wells (W1 and W2), the reconstructed surface confirms that the Čepkeliai peatland surface increased by 0.16–0.36 m during 1981–2007 (Fig. 12).

5. Discussion

Former studies that have noted the importance of the peat accumulation rate have shown different accumulation results varying from <1 mm up to several  $mm\ y^{-1}$  (Franzén, 2006; Stivrins et al., 2017). A possible explanation for these differences may be the lack of a uniform concept of peat accumulation, i.e., no difference is made between the litter accumulation rate in the acrotelm and the peat accumulation rate in the catotelm. Some previous research analysed peat accumulation rates in the acrotelm and in the catotelm (Belyea and Baird, 2006; Morris and Waddington, 2011; Baird et al., 2016), whereas other studies suggested taking into account only the catotelm peat to determine the peat accumulation rate (Kremenetski et al., 2003; Yu, 2006; Kleinen et al.,

2012). Obvious separation of the peatland-forming processes enables us to evaluate the litter-peat accumulation rate and the surface variation more precisely. Our findings are in accord with recent studies; however, the main focus is given to the peatland surface variation. Our results indicate that intensive litter accumulation and low decomposition rates lead to an annual surface increase of a few centimetres. This process is highly influenced by hydrometeorological conditions. A small amount of litter and (or) an intensive decomposition process in the acrotelm may cause a significant peatland surface decrease during certain years. Such a surface variation has a minor influence toward peat accumulation in the catotelm. The litter-peat accumulation rate and peatland surface variability describes different processes. The peatland surface variability depends on the annual amount of litter and aerobic decomposition of litter in the acrotelm, whereas the peat accumulation rates are likely to be related to the annual amount of material that transforms from acrotelm to catotelm and to anaerobic decomposition of this material in the catotelm.

From a hydrology point of view, peatland is usually treated as a homogeneous hydrological system (Ingram, 1983). Other research studies, which are based on relationships of the peatland vegetation and humidity conditions (Lamentowicz et al., 2015), highlight the water regime of the microrelief forms (hummocks, hollows, and lawns) (Foster and Glaser, 1986; Foster et al., 1988; Bubier et al., 1993; Namatėva, 2010;

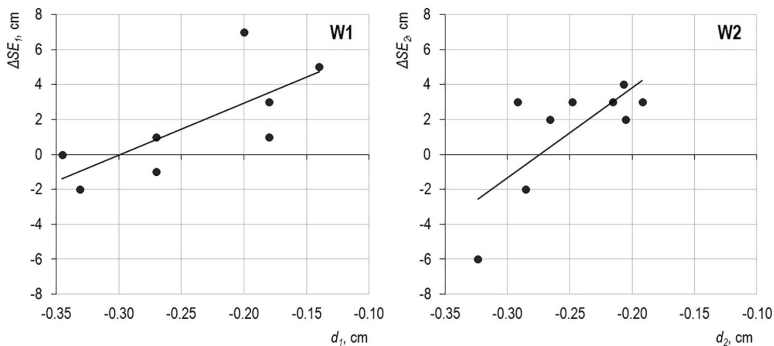


Fig. 9. Relationship between peatland annual surface elevation gradient ( $\Delta SE$ ) near W1 and W2 wells and estimated average annual water depth ( $d$ ).

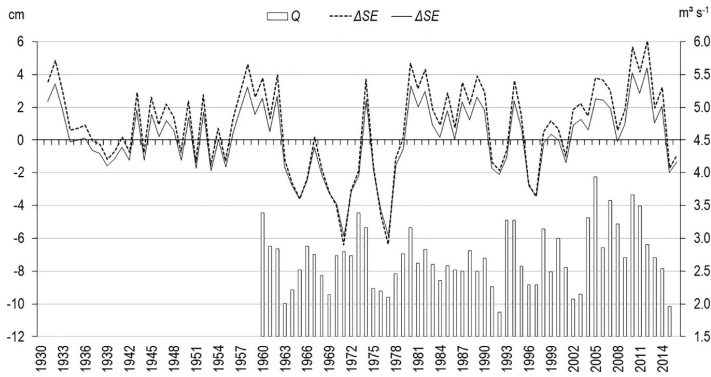


Fig. 11. Fluctuation of reconstructed peatland surface elevation gradient ( $\Delta SE_{1r}$ ,  $\Delta SE_{2r}$ ) and minimum annual 7 day Ūla River flow ( $Q_{7min}$ ).

Shi et al., 2015). Our research supports the idea that separate parts of the peatland may have an individual water regime. Peatland is divided into separate parts that could be called peatland subbasins. They are separated by microrelief forms that become watersheds for these subbasins. Subbasins involve autogenic processes that can later affect their internal hydrology, nutrient status, and vegetation succession (Hu and Davis, 1995; Swindles et al., 2012; Lavoie et al., 2013). As a result, internal hydrological changes or transitions in these subbasins influence peatland vegetation and peat formation peculiarities (Stivrins et al., 2017). Therefore, we can assume that internal hydrological conditions in the peatlands subbasin level should be taken into account during their state of evaluation, nature management projects, and in other peatland research.

As mentioned above, peatland subbasins influence vegetation succession. Recently, a desiccation of the pine trees was observed in the northwestern part of the Čepkeliai peatland. According to the map of the subbasins, this area coincides with one of them. This finding, while preliminary, suggests that individual water regime changes of this particular subbasin are the main cause of woody vegetation degradation in this area. No similar phenomena are observed in the other parts of the Čepkeliai peatland. Further field and monitoring studies are thus needed to clarify the exact interactions between climate and peatland development, hydrology, and vegetation dynamics.

Peatland surface variability is directly influenced by hydrometeorological conditions (Lamentowicz et al., 2008; Feurdean et al., 2015). Climate change consequences to the Baltic region are well analysed in prior studies (Taminskas et al., 2008a; Kažys et al., 2015; Stonevičius et al., 2017). However, in contrast, few studies (Hilbert et al., 2000) and indicators that enable the evaluation of peatland surface variability

have been detected. In regard to this question, our study found two appropriate indicators for different peatland surface variability periods (an increase or decrease). The first one is an  $\sim 200 \text{ mm y}^{-1}$  average net rainfall in the 3-year range. The second one is the average annual water depth of 25–30 cm. However, short-term measurements in the flat part of the peatland showed a 15 cm value of water depth.

The application of these indicators enabled us to reconstruct the Čepkeliai peatland surface variability during nearly an entire 100-year period. The most obvious finding to emerge from this reconstruction was that the peatland surface variability amplitude was small; however, more significant changes were detected during the shorter periods. Further studies in this and other peatlands, which take these indicators into account, will need to be undertaken before the association between these indicators and peatland surface variability is more clearly understood.

## 6. Conclusions

Significant climate changes were observed during the last century. This influenced the cyclic fluctuation of net rainfall and water storage in the studied peatland.

When 3 years of the net rainfall average and the annual water depth in a raised bog falls below the limit of the dry years, the bog surface decreases up to few cm per year and vice versa (the bog surface increases when these indicators remain above the dry years limit).

Climate change influences the significant raised bog surface variability in the short time series. However, the average annual surface eventually increases, approaching the rate of peat addition to the catotelm.

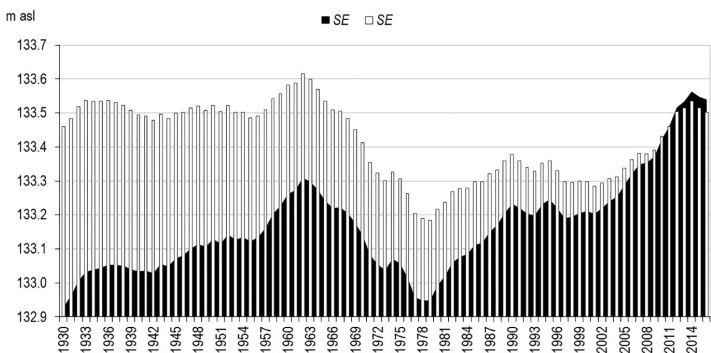


Fig. 12. Variation of the reconstructed surface elevation ( $SE_{1r}$  and  $SE_{2r}$ ).

Watersheds of short-term closed or open drainage subbasins may change because of uneven peatland surface variation in the different peatland areas. This may influence the water regime conditions in certain parts of the peatland.

## Acknowledgements

This study was supported by the Lithuanian Ministry of Education and Science (20170424/V-273) and the program (Geo-environment and its resources in conditions of climate change and anthropogenic pressure). The authors are grateful to Dzūkija National/PAN Park and the Lithuanian Hydrometeorological Service for the provided meteorological and hydrological data. We are especially grateful to the anonymous reviewers for their valuable remarks and advice.

## References

- Almendinger, J.C., Almendinger, J.E., Glaser, P.H., 1986. Topographic fluctuations across a spring fen and raised bog in the Lost River Peatland, Northern Minnesota. *J. Ecol.* **74**, 393–401.
- Almquist-Jacobson, H., Foster, D.R., 1995. Towards an integrated model for raised-bog development: theory and field evidence. *Ecology* **76**, 2503–2516.
- Baird, A.J., Milner, A.M., Blundell, A., Swindles, G.T., Morris, P.J., 2016. Microform-scale variations in peatland permeability and their ecophysiological implications. *J. Ecol.* **104**, 531–544.
- Belyea, L.R., Baird, A.J., 2006. Beyond “the limits to peat bog growth”: cross-scale feedbacks in peatland development. *Ecol. Monogr.* **76** (3), 299–322.
- Bubier, J., Costello, A., Moore, T.R., Roulet, N.T., Savage, K., 1993. Microtopography and methane flux in boreal peatlands, northern Ontario, Canada. *Can. J. Bot.* **71**, 1056–1063.
- Childs, E.C., Youngs, E.G., 1961. A study of some three-dimensional field-drainage problems. *Soil Sci.* **92**, 15–24.
- Clymo, R.S., 1984. The limits of peat growth. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B* **303**, 605–654.
- Edvardsson, J., Šimanasienė, R., Taminskas, J., Baužienė, I., Stoffel, M., 2015. Increased tree establishment in Lithuanian peat bogs – insights from field and remotely sensed approaches. *Science of Total Environment* **505**, 113–120.
- Feurdean, A., Galka, M., Kuske, E., Tantau, I., Lamentowicz, M., Florescu, G., Liakka, J., Hutchinson, S.M., Mulch, A., Hickler, T., 2015. Last millennium hydro-climate variability in Central-Eastern Europe (northern Carpathians, Romania). *The Holocene* **25**, 1179–1192.
- Foster, D.R., Glaser, P.H., 1986. The raised bogs of South-Eastern Labrador, Canada: classification, distribution, vegetation, and recent dynamics. *J. Ecol.* **74**, 47–71.
- Foster, D.R., Wright, H.E., Thelaut, M., King, G.A., 1988. Bog development and landform dynamics in Central Sweden and South-East Labrador, Canada. *J. Ecol.* **76** (4), 1164–1185.
- Franzen, L.G., 1994. Are wetlands the key to the ice age cycle enigma? *Ambio* **23** (4–5), 300–308.
- Franzen, L.G., 2006. Increased decomposition of subsurface peat in Swedish raised bogs: are temperate peatlands still net sinks of carbon? *Mires and Peat* **1** (03), 1–16.
- Franzen, L.G., Chen, D., Klinger, L.F., 1996. Principles for a climate regulation mechanism during the late Phanerozoic era, based on carbon fixation in peat-forming wetlands. *Ambio* **25** (7), 435–442.
- Glaser, P.H., Chanton, J.P., Morin, P., Rosenberry, D.O., Siegel, D.I., Ruud, O., Chasar, L.L., Reeve, A.S., 2004. Surface deformations as indicators of deep ebullition fluxes in a large northern peatland. *Global Biogeochemical Cycles* **18**, GB1003, pp. 1–15.
- Gorham, E., Rochefort, L., 2003. Peatland restoration: a brief assessment with special reference to *Sphagnum* bogs. *Wetl. Ecol. Manag.* **11**, 109–119.
- Hammond, R.F., 1984. The classification of Irish peats as surveyed by the National Soil Survey of Ireland. *Proc. 7th Int. Peat Congress Dublin*, June 18–23, 1, pp. 168–187.
- Hilbert, D.W., Roulet, N., Moore, T., 2000. Modelling and analysis of peatlands as dynamical systems. *J. Ecol.* **88**, 230–242.
- Holden, J., Burt, T.P., 2003. Hydrological studies on blanket peat: the significance of the acrotelm-catotelm model. *J. Ecol.* **91**, 86–102.
- Holden, J., Chapman, P.J., Labadz, J.C., 2004. Artificial drainage of peatlands: hydrological and hydrochemical process and wetland restoration. *Prog. Phys. Geogr.* **28** (1), 95–123.
- Howie, S.A., Meerveld, I.T., 2011. The essential role of the lag in raised bog function and restoration: a review. *Wetlands* **31**, 613–622.
- Hu, F.S., Davis, R.B., 1995. Postglacial development of a Maine bog and paleoenvironmental implications. *Can. J. Bot.* **73** (4), 638–649.
- Ingram, H.A.P., 1982. Size and shape in raised mire ecosystems: a geophysical model. *Nature* **297**, 300–303.
- Ingram, H.A.P., 1983. *Hydrology*. In: Gore, A.J.P. (Ed.), *Mires, Swamp, Bog, Fen, and Moor. A General Studies*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, The Netherlands, pp. 67–158.
- Kažys, J., Rimkus, E., Taminskas, J., Butkutė, S., 2015. Hydrothermal effect on groundwater level fluctuations: case studies of Čepkeliai and Rėkyva peatbogs, Lithuania. *Geologija* **1** (3), 116–129.
- Kleinen, T., Brovkin, V., Schuldt, R.J., 2012. A dynamic model of wetland extent and peat accumulation: results for the Holocene. *Biogeosciences* **9**, 235–248.
- Korhola, A., 1992. Mire induction, ecosystem dynamics and lateral extension on raised bogs in the southern coastal area of Finland. *Fennia* **170**, 25–94.
- Korhola, A., Alm, J., Tolonen, K., Turunen, J., Jungner, H., 1996. Three-dimensional reconstruction of carbon accumulation and CH<sub>4</sub> emission during nine millennia in a raised mire. *J. Quat. Sci.* **11**, 161–165.
- Kremenetski, K.V., Velichko, A.A., Borisova, O.K., MacDonald, G.M., Smith, L.C., Frey, K.E., Orlova, L.A., 2003. Peatlands of the Western Siberian lowlands: current knowledge on zonation, carbon content and Late Quaternary history. *Quat. Sci. Rev.* **22**, 703–723.
- Lamentowicz, M., Milecka, K., Galka, M., Cedro, A., Pawlyta, J., Piotrowska, N., Lamentowicz, L., van der Knaap, W.O., 2008. Climate and human introduced hydrological change since AD 800 in an ombrotrophic mire in Pomerania (N Poland) tracked by testate amoebae, macro-fossils, pollen and tree rings of pine. *Bores* **38**, 214–229.
- Lamentowicz, M., Slowinski, M., Marcisz, K., Zielinska, M., Kaliszczak, K., Lapshina, E., Gilbert, D., Buttler, A., Fialkiewicz-Kozielec, B., Jassey, V.E.J., Laggon-Defarge, F., Kolaczek, P., 2015. Hydrological dynamics and fire history of the last 1300 years in western Siberia reconstructed from a high-resolution ombrotrophic peat archive. *Quat. Res.* **84**, 312–325.
- Lavoie, M., Pellerin, S., Larocque, M., 2013. Examining the role of allogeneous and autogeneou factors in the long-term dynamics of a temperate headwater peatland (southern Québec, Canada). *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* **386**, 336–348.
- Linkevičienė, R., 2009. Impact of river capture on hydrography and water resources: case study of Ula and Katra catchments, south Lithuania. *The Holocene* **19** (8), 1233–1240.
- Maltby, E., Proctor, M.C.F., 1996. Peatlands: their nature and role in the biosphere. In: Lappalainen, E. (Ed.), *Global Peat Resources*. International Peat Society, Finland, pp. 12–13.
- Mažeika, J., Guobytė, R., Kibirškis, G., Petrošius, R., Skuratovič, Ž., Taminskas, J., 2009. The use of carbon-14 and tritium for peat and water dynamics characterization: case of Čepkeliai peatland, Southeastern Lithuania. *Geochronometria* **34**, 41–48.
- Morris, P.J., Waddington, J.M., 2011. Groundwater residence time distributions in peatlands: implications for peat decomposition and accumulation. *Water Resour. Res.* **47**, W02511. <https://doi.org/10.1029/2010WR009492>.
- Namatēva, A., 2010. Micro-landscapes in the Teiči Bog and the Eiduki Bog, the Austrumlatvija Lowland. In: Kļaviņš, M. (Ed.), *Mires and Peat*. University of Latvia Press, Riga, pp. 41–55.
- Nokes, S.E., 1995. Evapotranspiration. In: Ward, A.D., Elliot, W.J. (Eds.), *Environmental Hydrology*. Boca Raton, New York, pp. 91–130.
- Price, J.S., Heathwaite, A.L., Baird, A.J., 2003. Hydrological processes in abandoned and restored peatlands: an overview of management approaches. *Wetl. Ecol. Manag.* **11**, 65–83.
- Shi, X., Thornton, P.E., Riscio, D.M., Hanson, P.J., Mao, J., Sebestyen, S.D., Griffiths, N.A., Bisht, G., 2015. Representing northern peatland microtopography and hydrology within the community land model. *Biogeosciences* **12**, 6463–6477.
- Skaggs, R.W., 1980. *Drainmod Reference Report. Methods for Design and Evaluation of Drainage-Water Management Systems for Soils with High Water Tables*. North Carolina State University, Raleigh, NC 169 pp.
- Stivrins, N., Ozola, I., Galka, M., Kuske, E., Alliksaar, T., Andersen, T.J., Lamentowicz, M., Wulf, S., Reitalu, T., 2017. Drivers of peat accumulation rate in a raised bog: impact of drainage, climate and local vegetation composition. *Mires and Peat* **19** (08), 1–19.
- Stonevičius, E., Rimkus, E., Staras, A., Kažys, J., Valiuskevičius, G., 2017. Climate change impact on the Nemunas River basin hydrology in the 21st century. *Boreal Environ. Res.* **22**, 49–65.
- Sumner, D.M., Jacobs, J.M., 2005. Utility of Penman-Monteith, Priestly-Taylor, reference evapotranspiration, and pan evaporation methods to estimate pasture evapotranspiration. *J. Hydrol.* **308**, 81–104.
- Swindles, G.T., Morris, P.J., Baird, A.J., Blaauw, M., Plunkett, G., 2012. Ecophysiological feedbacks confound peat-based climate reconstruction. *Geophys. Res. Lett.* **39**, L11401. <https://doi.org/10.1029/2012GL015100>.
- Taminskas, J., Linkevičienė, R., Mažeika, J., Kibirškis, G., 2008a. The impact of global climate change for hydrometeorological conditions of Čepkeliai peatland: the elements of vertical water cycle. *Annales Geographicae* **40** (2), 50–60.
- Taminskas, J., Mažeika, A., Valiuskevičius, L., 2008b. Comparison of potential evapotranspiration estimation according to air temperature. *Annales Geographicae* **41** (1–2), 81–89.
- Taminskas, J., Pileckas, M., Šimanasienė, R., Linkevičienė, R., 2012. Wetland classification and inventory in Lithuania. *Baltica* **25** (1), 33–34.
- Taylor, S.A., Ashcroft, G.L., 1972. *Physical Edaphology: The Physics of Irrigated and Nonirrigated Soils*. W. H. Freeman and Co., San Francisco, CA 533 pp.
- Thorntwaite, C.W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.* **38**, 55–94.
- Weber, C.A., 1902. *Über die Vegetation und Entstehung des Hochmoores von Augstmal im Memeldelta*. (English translation by Couwenberg, J., Joosten H. 2002, published as “Vegetation and Development of the Raised Bog of Augstmal in Memel delta” by International Mire conservation group). *Verlagsbuchhandlung Paul Parey*, Berlin 278 pp.
- Xu, C.Y., Singh, V.P., 2001. Evaluation and generalization of temperature-based methods for calculating evaporation. *Hydrol. Process.* **15** (2), 305–319.
- Yu, Z., 2006. Holocene carbon accumulation of fen peatlands in boreal Western Canada: a complex ecosystem response to climate variation and disturbance. *Ecosystems* **9**, 1278–1288.
- Yu, Z.C., Vitt, D.H., Campbell, C., Campbell, I.D., 2000. Pattern and processes of peat accumulation in continental rich fens: hypothesis and preliminary results. In: Rochefort, L., Daigle, J.Y. (Eds.), *Proceedings of the 11th International Peat Congress*. Quebec City, Quebec, Canada, pp. 208–215.
- Yu, Z., Campbell, I.D., Vitt, D.H., Apps, J.G., 2001. Modelling long-term peatland dynamics. I. Concepts, review and proposed design. *Ecol. Model.* **145**, 197–210.

### III

#### **Precipitation and drought reconstructions for Abakan, Russia from *Pinus sylvestris* ring-width chronology**

Shah S.K., Touchan R., Meko D.M., Babushkina E., Shisov V.V.,  
Abramenko O.V., Belokopytova L.V, Hordo M., Jevsenak J., Kędziora W.,  
Kostyakova T.V., Mokshka A., Oleksiak Z., Omurova G., Ovchinnikov S.,  
Sadeghpour M., Saikia A., Sidenko T., Strantsov A., Tamkevičiūtė M.,  
Tomusiak R., Tychkov I., Zsewastynowicz L.

*Tree-Ring Research* 2015, 71(1): 37–44.

Reprinted with permission from *Journal of Tree-Ring Research*

## AUGUST TO JULY PRECIPITATION FROM TREE RINGS IN THE FOREST-STEPPE ZONE OF CENTRAL SIBERIA (RUSSIA)

SANTOSH K. SHAH<sup>1\*</sup>, RAMZI TOUCHAN<sup>2\*</sup>, ELENA BABUSHKINA<sup>3</sup>, VLADIMIR V. SHISHOV<sup>4</sup>, DAVID M. MEKO<sup>2</sup>, OLGA V. ABRAMENKO<sup>3</sup>, LILIANA V. BELOKOPYTOVA<sup>3</sup>, MARIS HORDO<sup>5</sup>, JERNEJ JEVŠENAK<sup>6</sup>, WOJCIECH KĘDZIORA<sup>7</sup>, TATIANA V. KOSTYAKOVA<sup>3</sup>, AGNIESZKA MOSKWA<sup>8</sup>, ZBIGNIEW OLEKSIK<sup>8</sup>, GULZAR OMUROVA<sup>9</sup>, SVJTOSLAV OVCHINNIKOV<sup>4</sup>, MAHSA SADEGHPOUR<sup>10</sup>, ANUP SAIKIA<sup>11</sup>, ŁUKASZ ZSEWASTYNOWICZ<sup>8</sup>, TATIANA SIDENKO<sup>4</sup>, ARGO STRANTSOV<sup>12</sup>, MARIJA TAMKEVIČIŪTĖ<sup>13,14</sup>, ROBERT TOMUSIAK<sup>15</sup>, and IVAN TYCHKOV<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Birbal Sahni Institute of Palaeobotany, 53- University Road, Lucknow – 226 007, India

<sup>2</sup>Laboratory of Tree-ring Research, The University of Arizona, 1215 E. Lowell Street, Box 210045, Tucson, AZ, 85721, USA

<sup>3</sup>Khakas Technical Institute, Branch of Siberian Federal University, 27 Shchetinkina St., Abakan, 655017, Russia

<sup>4</sup>Siberian Federal University, 79 Svobodny Prospekt, Krasnoyarsk, 660041, Russia

<sup>5</sup>Department of Forest Management, Estonian University of Life Sciences, Kreutzwaldi 5, 51014 Tartu, Estonia

<sup>6</sup>University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Forestry and renewable forest resources, Vecna pot 83, 1000 Ljubljana, Slovenia

<sup>7</sup>Department of Forest Management Planning, Geomatics and Forest Economics; Faculty of Forestry, Warsaw University of Life Sciences – SGGW, 02-787 Warsaw, Nowoursynowska St. #166, Poland

<sup>8</sup>Scientific Association of Forestry Students, Faculty of Forestry, Warsaw University of Life Sciences – SGGW, 02-787 Warsaw, Nowoursynowska St. #166, Poland

<sup>9</sup>National Academy of Sciences, Institute of Forest, Kyrgyz Republic, 720015, Kyrgyz Republic, Bishkek, Karagachovaya Roshka 5

<sup>10</sup>University of Tehran, College of Agriculture & Natural Resources, Iran

<sup>11</sup>Department of Geography, Gauhati University, Guwahati, Assam, 781014, India

<sup>12</sup>Institute of Forestry and Rural Engineering, Department of Forest Management, Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 5, Tartu 51014, Estonia

<sup>13</sup>Institute of Geology and Geography, T. Ševčenkos Str. 13, LT-03223 Vilnius, Lithuania

<sup>14</sup>Vilnius University, M.K. Čiurlionio Str. 21/27, LT-03101, Vilnius, Lithuania

<sup>15</sup>Laboratory of Dendrometry and Forest Productivity; Faculty of Forestry, Warsaw University of Life Sciences – SGGW, 02-787 Warsaw, Nowoursynowska St. #166, Poland

### ABSTRACT

The goal of this research report is to describe annual precipitation reconstruction from *Pinus sylvestris* trees on three sites in the Abakan region, located in the Minusinsk Depression, at the confluence of the Yenisei and Abakan Rivers, Russia. The study was performed during the 4<sup>th</sup> annual international summer course “Tree Rings, Climate, Natural Resources and Human Interaction” held in Abakan, 5-19 August 2013. The reconstruction, for the 12-month total precipitation ending in July of the growth year, is based on a reliable and replicable statistical relationship between precipitation and tree-ring growth, and shows climate variability on both interannual and interdecadal time scales. The regional tree-ring chronology accounts for 56% of the variance of observed annual precipitation in a linear regression model, with the strongest monthly precipitation signal concentrated in May and June of the current growing season. Composite 500 mb height-anomaly maps suggest that the tree-ring data from this site, supplemented by other regional tree-ring data, could yield information on long-term atmospheric circulation variability over the study area and surrounding region.

*Keywords:* dendroclimatology, drought, detrending, SEASCORR.

\*Lead and correspondence authors: [santoshk.shah@gmail.com](mailto:santoshk.shah@gmail.com); [rtouchan@ltrr.arizona.edu](mailto:rtouchan@ltrr.arizona.edu)

## INTRODUCTION

Dendroclimatology is the science of determining past climate variability from tree rings. Time series of tree-ring measurements spanning several centuries serve as proxy records of past climatic conditions (Cook *et al.* 1999). Such records provide us with knowledge of the past frequency and severity of climatic anomalies, such as drought and wet periods, and can be used to help anticipate the probability of such events in the future.

Dendroclimatology studies in the Khakasian region of southern Siberia began with an investigation by Vaganov *et al.* (1985) of a wide range of ecological factors and climatic factors influencing tree-ring formation. This work was followed by other dendroclimatological and ecological studies (Magda *et al.* 2002, 2004, 2011; Block *et al.* 2003; Vaganov *et al.* 2006; Knorre *et al.* 2010), culminating in a reconstruction of June temperature in the forest-steppe of the Republic of Khakassia by Babushkina *et al.* (2011).

This report describes dendroclimatological aspects of the 4<sup>th</sup> annual international summer course “Tree Rings, Climate, Natural Resources and Human Interaction” (Figure S1). The main purpose of the course was training of participants in basic dendrochronology and in dendroclimatic application of tree-ring data. As part of the course, we produced a regional tree-ring chronology of *Pinus sylvestris* from the Abakan region, investigated the seasonal climatic signal of the chronology with correlation methods, and applied the chronology to reconstruct annual precipitation for the monthly grouping of previous August to current July (prior August-current January = PA-CJ). A 138-year reconstruction for the Abakan region is analyzed for time series features of variability relevant to water resources planning. The association between unusually dry years and wet years in Abakan, with broad-scale atmospheric circulation anomalies, is summarized by analysis of 500 mb height reanalysis data.

## MATERIALS AND METHODS

### Study Area

Three sites near Abakan were selected (Figure 1). The site GRN (53.66°N latitude and 91.59°E

longitude) is 11 km southwest Abakan at an elevation of 273 m a.s.l. MAM and MIN (53.75°N latitude and 92.04°E longitude) are 30 km east of Abakan at 497 m a.s.l. and 506 m a.s.l., respectively. At the GRN site *Pinus sylvestris* forms pure stands but in MAM and MIN it grows in association with *Betula pendula*. The soil is similar at all three sites and is sandy with a humus layer at 10–15 cm. However, soil density at GRN is higher as compared to the other two sites, MAM and MIN. The relief of GRN has small depressions with slopes 2–15° whereas sites MAM and MIN are on a hill with slopes of 2–45°.

### Chronology

Increment cores were taken from living trees at all sites. A total of 128 cores were taken from 67 trees. Samples were fine-sanded and crossdated using standard dendrochronological techniques (e.g. Stokes and Smiley 1968). The width of each annual ring was measured to the nearest 0.01 mm using TSAP-LINTAB (Rinntech 2011). In addition, CooRecorder and CDendro software (<http://www.cybis.se/forfun/dendro/>) were used to obtain measurements from digital scans of core samples. Crossdating and measurement accuracy were verified using COFECHA (Holmes 1983; Grissino-Mayer 2001).

Each tree-ring width series was fit with a cubic smoothing spline having a 50% frequency response cutoff equal to 67% of the series length to remove the non-climatic trends caused by tree age, size, and the effects of stand dynamics (Cook and Briffa 1990). The detrended series were then prewhitened with low-order autoregressive models to remove persistence, which was observed to be appreciably higher in the tree-ring series than in seasonal and annual precipitation. The resulting series is called a “residual” index. Combining of individual indices into the regional chronology was done using a bi-weight robust estimate of the mean (Cook 1985), designed to minimize the influence of outliers.

We used expressed population signal (EPS) to assess the adequacy of replication in the early years of the chronology (Wigley *et al.* 1984). We limited our analysis to the period with an EPS of





Figure 1. Locations of tree-ring sites (▲) and climate station (●).

at least 0.85 to ensure the reliability of the reconstructed precipitation. These thresholds correspond to a sample depth of 6 trees (12 series), and allow for reconstructing the period A.D.1875–2012 (Figure 2A).

### Climate Data

Monthly precipitation (P) and temperature (T) were obtained from the Minusinsk meteorological station (Khakassian Centre of Hydrometeorology and Environmental Monitoring) (Figure 3). The period of availability of monthly data for the station is 1935–2012 for P and T.

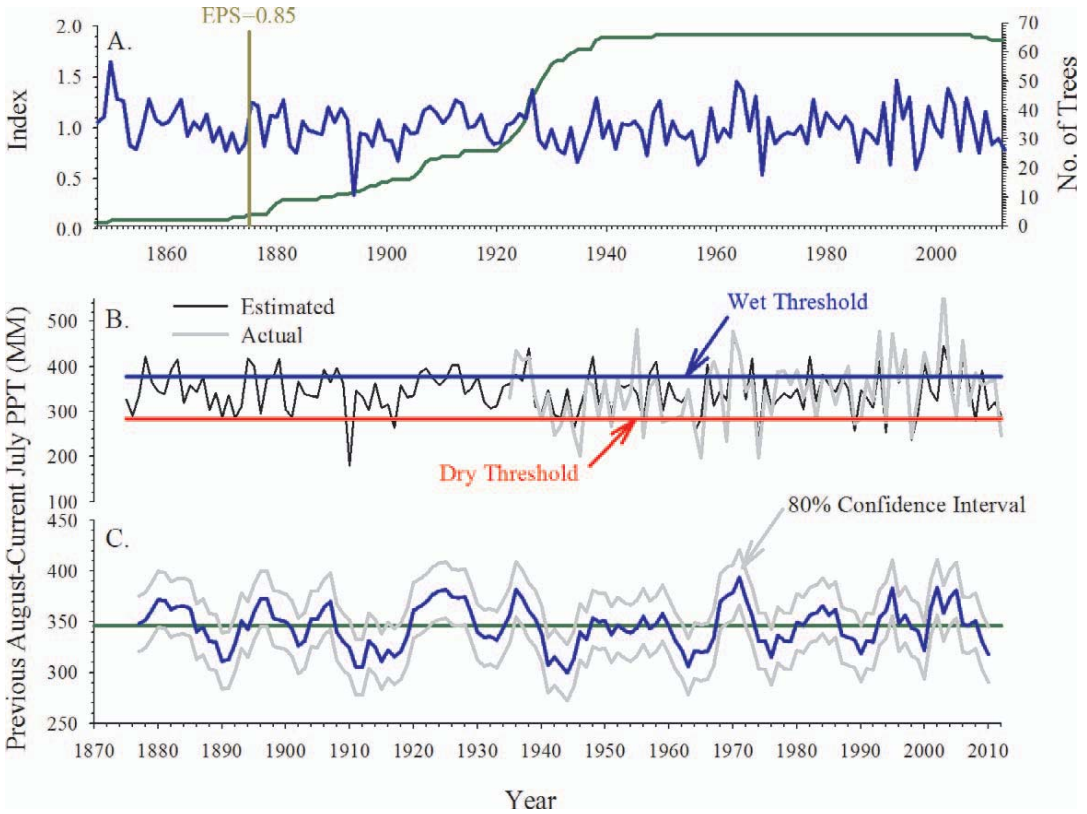
We conducted correlation analysis of the residual ring-width chronology against the climate data using the seasonal correlation (SEASCORR) procedure developed by Meko *et al.* (2011). We used individual months as well as seasonal values integrating 3, 6, and 12 months. We considered a 14-month window starting in the August prior to the growth year and ending in the current September.

A transfer function analysis (TFA) was conducted between the regional tree-ring chronology and the seasonal climate series identified by SEASCORR. A regression equation of seasonal precipitation on the regional tree-ring chronology for the calibration period 1935–2012 was developed. The validity of this equation as a transfer function model for converting tree-ring values to precipitation values was examined using regression

statistics ( $R^2$  and adjusted  $R^2$ ), and the PRESS procedure for cross-validation (Weisberg 1985; Fritts *et al.* 1990; Meko 1997; Touchan *et al.* 2011). A split-sample procedure (Snee 1977; Meko and Graybill 1995; Touchan *et al.* 2011) that divides the full period (A.D. 1935–2012) into two subsets (1935–1973 and 1974–2012) was also used to verify model stability. In the two verification periods, the reduction of error statistic (RE) was calculated as a measure of reconstruction skill (Fritts 1976). An RE value greater than 0 indicates positive skill. The calculated transfer function was then applied to the regional residual chronology to produce the time series of reconstructed PA-CJ total precipitation for as many years as the adequately-replicated portion of the chronology allowed.

Dry years and wet years were defined as reconstructed precipitation below or above specified thresholds corresponding to percentiles of the observed precipitation for the base period 1935–2012. Percentiles for the thresholds were based on exploratory scatter plots of reconstructed precipitation on observed precipitation, recognizing the threshold must be high enough to represent a significant departure from average conditions. A five-year moving average of reconstructed precipitation was used as an alternative summary measure of drought severity.

The association of extremely dry or wet years in Abakan with atmospheric circulation anomalies



**Figure 2.** (A) Tree-ring residual chronology of *Pinus sylvestris* along with number of trees; (B) Time series plot of reconstructed PA-CJ precipitation; (C) Five-year average of reconstructed PA-CJ precipitation. Values are plotted at the center of each 5-year period. Uncertainty values are shown at 80% confidence interval.

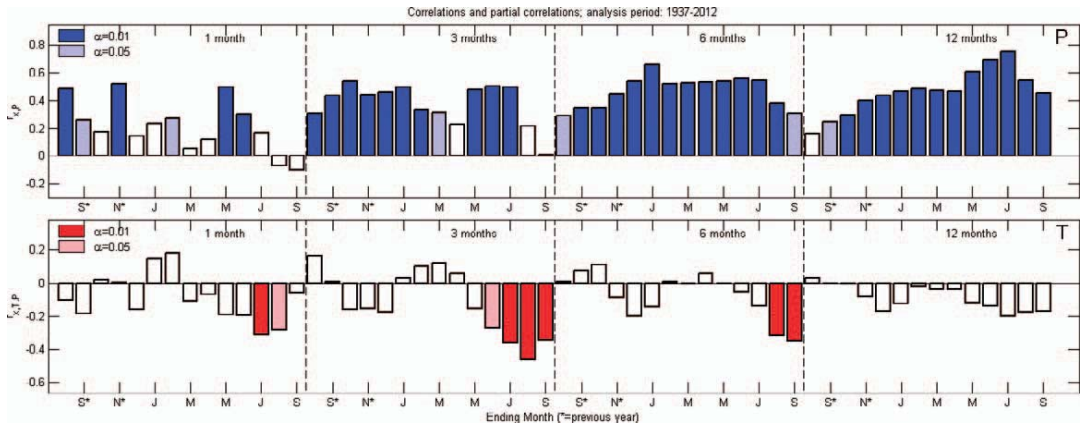
in the warm season was studied with the aid of composite maps of 500 mb geopotential height anomaly drawn with the mapping tool provided by NOAA/ESRL Physical Sciences Division (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/>) using NCEP/NCAR Re-analysis data (Kalnay *et al.* 1996).

## RESULTS AND DISCUSSION

A regional chronology was built using material from three sites in Abakan (Figure 1). The tree-ring series of the three sites show strong similarities in terms of visual crossdating of the wood and computer-based quality control. The high degree of common variation in trees is supported by the EPS, which reaches a critical value of 0.85 at a sample size of 6 trees (Figure 2A).

The combined chronology is 138 years long (A.D. 1847–2012), which is slightly longer than the period deemed suitable for climate interpretation (A.D. 1875–2012). Average series inter-correlation among all radii is 0.51. The mean sample segment length (MSSL) of the regional chronology is 97 years and is adequate to investigate multi-decadal climate variability (Cook and Peters 1997).

PA-CJ total precipitation was selected as a reconstruction target (predictand for the reconstruction model) based on program SEASCORR results relating the residual chronology, 1935–2012, to P and T (Figure 3). The analysis identifies the strongest annual P signal as a 12-month total from previous August to current July. Individual months with most significant P correlation are previous August, previous November, current



**Figure 3.** Program Seascorr summary of seasonal climatic signal in the residual chronology data. Climatic variables are monthly precipitation and temperature of Minusinsk meteorological station. (Top) Correlation of tree-ring variable with monthly, 3-month total, 6-month total, and 12-month total precipitation for ending months from August preceding the growth year through September of the growth year. (Bottom) Partial correlations (controlling for precipitation) of tree-ring variable with monthly average temperature. Colors indicate Monte-Carlo-derived significance of correlation or partial correlation (Meko *et al.* 2011) for  $\alpha$ -levels 0.01 and 0.05. Analysis period is tree-ring years 1937–2012.

May and current June. Temperature's influence, summarized by partial correlations in SEASCORR, is significant for the single months of current July and August. The negative sign of partial correlations for those months indicates that high temperature exacerbates the negative tree-growth anomaly associated with a given precipitation deficit.

The final regression statistics for the 1875–2012 precipitation reconstruction, obtained from the relationship between the regional tree-ring chronology (predictor) and precipitation record (predictand), are highly significant (Figure 2B). The predictor variable accounts for 56% of observed precipitation. Cross-validation using the PRESS procedure indicates the model performs adequately in estimating precipitation data not used to produce the model (prediction  $R^2 = 0.54$ ). The split-sample calibration-validation exercise indicated stability of the relationship over halves of the available instrumental data period. The computed RE statistics indicated skill of reconstruction in the calibration/validation exercises using different sub-periods. On this evidence, the full calibration period (1935–2012) was then used for the final reconstruction model (Table S1).

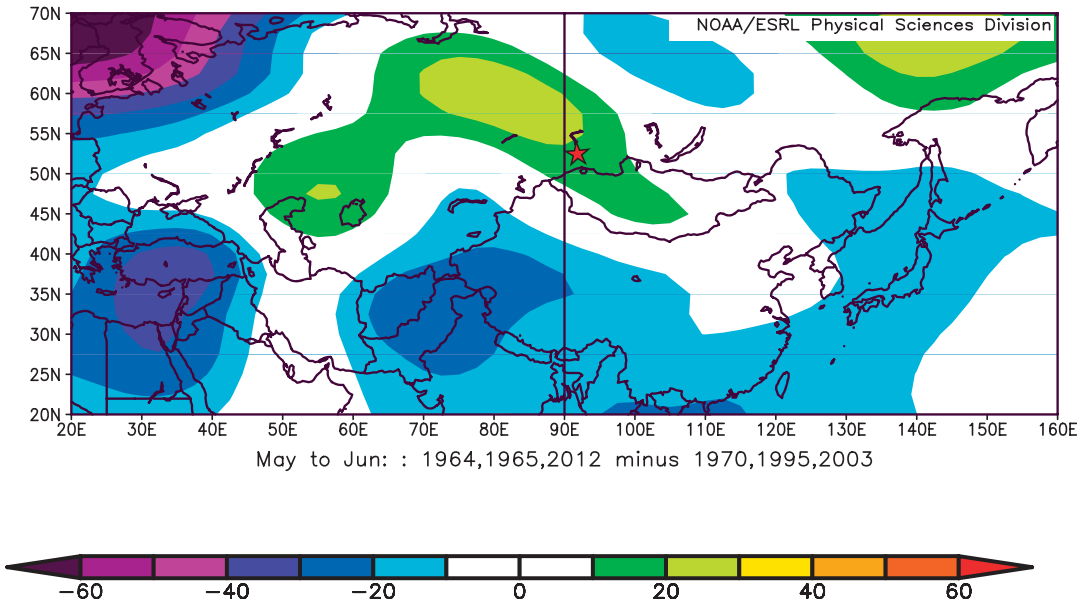
Empirical thresholds for the dry and wet events defined the 30<sup>th</sup> percentile of the observed P

as 320 mm and the 70<sup>th</sup> percentile as 366 mm (Figure 2B). The long-term reconstruction for the period 1875–2012 contains 41 dry years according to these criteria. Twenty-two events have duration of one year, eight have duration of two years, and one has duration of three years (1915–1917). The driest single year of the reconstruction is 1910 (179.9 mm). The driest year in the instrumental data is 1965 (197.8 mm; reconstructed is 283.9 mm).

The reconstruction contains 41 wet years. The wettest year in the reconstruction was 1995 (472.9 mm; reconstructed is 469.8 mm). The wettest year during the instrumental data was 2003 (566.5 mm; reconstructed is 445.9). Nineteen wet events had duration of one year, five a duration of 2 years, and four lasted 3 years (1897–1899, 1921–1923, 1925–1927, and 1936–1939).

A five-year moving average of the reconstruction demonstrates multi-annual to decadal variation in PA-CJ precipitation and suggests several prolonged dry and wet events (Figure 2C). The driest five-year reconstructed period is 1940–1946 (300 mm). The second and third driest periods are 1910–1914 and 1961–1965. The wettest five-year reconstructed period is 1969–1973 (393 mm). Two other wet periods were 2000–2004 and 1993–1997.

The association of dry and wet years with circulation anomalies was studied with composite



**Figure 4.** Composite map of difference in May-June 500 mb height anomalies in dry years and wet years. Years for composites are among driest (or wettest) ten years both in the precipitation reconstruction and in May-June observed precipitation at Minusinsk. Dry years are 1965, 1964 and 2012. Wet years are 1970, 1995 and 2003. Anomalies (color bar) are departures (m) from 1981–2010 climatology. Map drawn with online mapping tool from the NOAA Earth System Research Laboratory (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/getpage.pl>).

maps of the difference of average 500 mb geopotential height anomalies in dry and wet years (dry minus wet), 1949–2012 (Figure 4). To avoid mixing seasons with different characteristic circulation patterns, we focused this analysis on height anomaly and precipitation in the two-month season May-June: May and June are the only two consecutive months in the annual (PA-CJ) period for which the correlation between precipitation and tree-ring index is highly significant ( $p < 0.01$ ).

First, the precipitation record was examined to identify the 10 driest and wettest observed and reconstructed years, 1949–2012. Second, the subset of years among the driest 10 by both observed and reconstructed data was identified. A subset of common wet years was likewise identified. These subsets focus on wet and dry years effectively captured by the tree-ring data. The procedure yielded three common dry years (1964, 1965, 2012) and three common wet years (1995, 1970, 2003).

The composite difference (dry-wet) 500-mb anomaly map for those subsets of years shows that the tree-ring site (red star) is located at the eastern edge of an anomalous high (Figure 4). This position is climatologically consistent in indicating a more stable atmosphere and more northerly flow at the site in dry years than in wet years.

## CONCLUSIONS

The report represents the first precipitation reconstruction for the Abakan region. It demonstrates that tree-ring reconstruction provides a baseline for studying past climate variability beyond the instrumental data. The reconstruction can help natural resource managers apply low-risk and long-term plans to use, conserve, and sustain water and other natural resources that are the foundations of social, political, and economic systems in the region. Additional tree-ring collections from this region, combined with tree-ring datasets elsewhere, may be useful in studying

long-term variability of atmospheric circulation anomalies, especially in the warm season.

### ACKNOWLEDGMENTS

This International Summer School was carried out in collaboration with the Laboratory of Tree-Ring Research (LTRR), University of Arizona, from the United States; Siberian Federal University (SFU)-Krasnoyarsk-Russia; and Khakass Technical Institute (KHTI)-branch of SFU-Abakan-Russia. We would like to thank Professor Eugene Vaganov, Rector of SFU, and Dr. Natalya V. Dulesova, Director of KTI, for making this course possible. We would like to thank the staff of KTI (G. Semikova, E. Ulturgasheva, I. Tonkoshkurova, and others) for their hard work in making this course successful. We also thank Vagif A. Guseinov, Director of Khakassian Centre of Hydrometeorology and Environmental Monitoring for providing climate data. Funding was provided by SFU, LTRR, US National Science Foundation under grant ATM-GEO/ATM-Paleoclimate Program 0758486 and AGS-Paleo-Perspectives on Climate Change Program 1103314, Russian presidential program for support of leading scientific schools (NSH-3297.2014.4), Russian Foundation for Basic Research (RFBR-12-04-00542-a) and State assignment - 2014 of the Ministry of Education and Science of Russian Federation, and the Ministry of education and science of The Republic of Khakassia. Finally, we thank Dr. Tatyana G. Krasnova, Minister of Economics of The Republic of Khakassia for her great support to the course.

### REFERENCES

- Babushkina, E. A., A. A. Knorre, E. A. Vaganov, and M. V. Bryukhanova, 2011. Transformation of climatic response in radial increment of trees depending on topoecological conditions of their occurrence. *Geography and Natural Resources* 32(1):80–86. doi:10.1134/S1875372811010148.
- Block, J., V. N. Magda, and E. A. Vaganov, 2003. Temporal and special variability of tree growth in mountain-forest steppe in Central Asia. IN *TRACE. Tree rings in Archaeology, Climatology and Ecology. Proceedings of the DENDROSYMPOSIUM 2003*. 2:46–53.
- Cook, E. R., 1985. *A Time-Series Analysis Approach to Tree-Ring Standardization*. Ph.D. dissertation. Dept. of Geosciences, The University of Arizona, Tucson.
- Cook, E. R., and K. R. Briffa, 1990. A comparison of some tree-ring standardization methods. In *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*, edited by E. R. Cook, and L. A. Kariukstis, pp. 153–162. Kluwer, Dordrecht.
- Cook, E. R., and K. Peters, 1997. Calculating unbiased tree-ring indices for the study of climatic and environmental change. *The Holocene* 7(3):361–370.
- Cook, E. R., D. M. Meko, and D. W. Stahle, 1999. Drought reconstructions for the continental United States. *Journal of Climate* 12(4):1145–1162.
- Fritts, H. C., 1976. *Tree Rings and Climate*. Academic Press, London; 567 pp.
- Fritts, H. C., J. Guiot, and G. Gordon, 1990. Verification. In *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*, edited by E. R. Cook, and L. A. Kariukstis, pp. 178–184. Kluwer, Dordrecht.
- Grissino-Mayer, H. D., 2001. Evaluating crossdating accuracy: A manual and tutorial for the computer program COFCHA. *Tree-Ring Research* 57:205–221.
- Holmes, R. L., 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43:68–78.
- Kalnay, E., M. R. Kanamitsu, W. Kistler, D. Collins, L. Deaven, M. Gandin, S. Iredell, G. Saha, J. White, Y. Woollen, M. Zhu, W. Chelliah, W. Ebisuzaki, J. Higgins, K. C. Janowiak, C. Mo, J. Ropelewski, A. Wang, R. Leetmaa, R. J. Reynolds, and J. Dennis, 1996. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society* 77(3):437–471.
- Knorre, A. A., R. T. W. Siegwolf, M. Saurer, O. V. Sidorova, E. A. Vaganov, and A. V. Kirilyanov, 2010. Twentieth century trends in tree ring stable isotopes ( $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$ ) of *Larix sibirica* under dry conditions in the forest steppe in Siberia. *Journal of Geophysical Research* 115:G03002. doi:10.1029/2009JG000930.
- Magda, V. N., and A. V. Zelenova, 2002. Radial growth of the Scots pine as an indicator of atmospheric humidity in Minusinsk hollow. *Izv. Russ. Geogr. Obs* 134(1):73–79.
- Magda, V. N., O. Ch. Oidupaa, and I. Blok, 2004. Geographic features analysis of climate signal in tree-ring chronologies by methods of cluster analysis. *Proceedings of Russian Geographical Society* 136(1):46–52.
- Magda, V. N., J. Block, O. Ch. Oidupaa, and E. A. Vaganov, 2011. Extraction of the climatic signal for moisture from tree-ring chronologies of Altai-Sayan Mountain forest-steppes. *Contemporary Problems of Ecology* 4(7):716–724.
- Meko, D. M., 1997. Dendroclimatic reconstruction with time varying predictor subsets of tree indices. *Journal of Climate* 10:687–696.
- Meko, D. M., and D. A. Graybill, 1995. Tree-ring reconstruction of upper Gila River discharge. *Journal of the American Water Resources Association* 31:605–616.
- Meko, D. M., R. Touchan, and K. J. Anchukaitis, 2011. Seascorr: a MATLAB program for identifying the seasonal climate signal in an annual tree-ring time series. *Computers & Geosciences* 37:1234–1241. doi:10.1016/j.cageo.2011.01.013.
- Rinntech, 2011. LINTAB. Precision Ring by Ring. <http://www.rinntech.com/Products/Lintab.htm>.

- Snee, R. D., 1977. Validation of regression models: Methods and examples. *Technometrics* 19:415–428.
- Stokes, M. A., and T. L. Smiley, 1968. *An Introduction to Tree-Ring Dating*. University of Arizona Press, Tucson.
- Touchan, R., C. Woodhouse, D. M. Meko, and C. Allen, 2011. Millennial precipitation reconstruction for the Jemez Mountains, New Mexico, reveals changing drought signal. *International Journal of Climatology* 31:896–906. doi:10.1002/joc.2117.
- Vaganov, E. A., A. V. Shashkin, I. V. Sviderskaya, and L. G. Vysotskaya, 1985. *Gyrometric Analysis of Tree-Ring Growth*. Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Novosibirsk; 102 pp.
- Vaganov, E. A., M. K. Hughes, and A. V. Shashkin (editors), 2006. Growth dynamics of conifer tree rings: Images of past and future. *Ecological Studies Vol. 183*. Springer, Berlin; 368 pp.
- Weisberg, R., 1985. *Applied Linear Regression*. John Wiley and Sons, New York.
- Wigley, T. M. L., K. R. Briffa, and P. D. Jones, 1984. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23:201–213.

Received 14 February 2014; accepted 1 October 2014.

Supplementary Material is available at <http://www.treering-society.org/TRBTRR/TRBTRR.htm>

## UŽRAŠAMS

Vilniaus universiteto leidykla  
Universiteto g. 1, LT-01513 Vilnius  
El. p. [info@leidykla.vu.lt](mailto:info@leidykla.vu.lt),  
[www.leidykla.vu.lt](http://www.leidykla.vu.lt)  
Tiražas 20 egz.