

MAGYARORSZÁGI BÜKKÖSÖK

DENDROKLIMATOLÓGIAI VIZSGÁLATA

DIPLOMAMUNKA

Meteorológus mesterszak – éghajlatkutató szakirány



Készítette:

Garamszegi Balázs

Témavezetők:

Dr. Kern Zoltán

MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont

Földtani és Geokémiai Intézet

Dr. Matyasovszky István

ELTE Földrajz- és Földtudományi Intézet

Meteorológiai Tanszék

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Földrajz- és Földtudományi Intézet

Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2015

IN MEMORIAM

Diplomamunkámat tragikus hirtelenséggel elhunyt témavezetőm,

MATYASOVSZKY ISTVÁN

emlékének ajánlom.

Igazi tudós és igazi mentor volt,

aki a másodéves alapszakos hallgató ötleteit is felkarolva,
egyetemi éveim alatt végig önzetlenül támogatta és szakmai tudásával segítette
munkámat, ha kellett, saját kutatási témájának is fölébe helyezve azt.

Témavezetőként kevés szóból is értett és megértette magát.

A szó- és levélváltás hosszabb kimaradása után is bármikor, pillanatokon belül
fel tudtuk venni a konzultáció fonalát, rövid, de átfogó gondolatcsere során.

Megrendült szívvel vettem tudomásul,

hogy elkészült dolgozatomat már nem olvashatja...

Tartalom

1. Bevezetés: erdők és a klímaváltozás	2
2. Szakirodalmi áttekintés	5
2.1. A bükk és helye Európában (múlt és jelen)	5
2.2. A bükk és a klímaváltozás: tények és félelmek	8
2.3. Lehetőségek a jövő megértésére és az alkalmazkodásra.....	10
3. Célkitűzések és bizonytalanságok	15
3.1. Célkitűzések.....	15
3.2. Klímaadatok reprezentativitása és az adathosszúság problémája.....	16
3.3. Erdők természetessége, termőhelyi viszonyok változatossága	18
4. A mintaterületek és éghajlati jellemzésük	19
4.1. A mintaterületek kiválasztása és leírásuk	19
4.2. Éghajlati adatok és klímaindexek	20
4.3. A mintaterületek éghajlati jellemzése a bükk szempontjából	22
5. Évgyűrű adatok és feldolgozásuk	24
5.1. Mintavételezés és mérés.....	24
5.2. Adatfeldolgozás és statisztikai eszközök	25
6. Eredmények: a növekedés és az éghajlat kapcsolata.....	28
6.1. Évgyűrűszélességek	28
6.2. Körlapi növedékek	34
7. Diskusszió.....	35
8. Összefoglalás	37
Summary and Discussion.....	39
Köszönetnyilvánítás/Acknowledgements	42
Irodalom	43
Függelékek.....	54

1. Bevezetés: erdők és a klímaváltozás

Legyen szó a trópusokról, a mérsékelt vagy a poláris övről, az erdei ökoszisztémák a szárazföldi vegetáció és egyben a teljes bioszféra egyik meghatározó alapkövét jelentik. Erdőségek borítják a szárazföldek harmadát, mindenekelőtt a trópusi esőerdőknek és az északi tajgaerdőknek köszönhetően. Az elmúlt évtizedek során, az iparosodás és széleskörű természetpusztítás hozadékaként fellépő környezetvédelmi szemléletmód számos, sokszor talán kissé giccses *epitheton ornanst* aggatott az erdőkre, úgy mint „a Föld tüdeje” vagy „Gaia zöld ruhája”. Ezek közül azonban talán egyik sem olyan kifejező, mint az eredeti magyar főnév, mely eredetében, ha kissé kifordított értelmezésben is, de magában hordozza azt, amihez képest minden más jelző csak részigazság: az „er(e)dők”, a folyóvizekhez hasonlóan *eredve*, jelen földtörténeti korban a szárazföldi biodiverzitás és az Élet egyik legfontosabb forrásaként szolgálnak. Ennek a szerepkörnek ugyan nagyon fontos, de csak egy része az oxigén biogeokémiai ciklusának szabályozása vagy éppen a bolygó kinézetét meghatározó „esztétikai funkció”.

Az erdők és az (erdei) ökoszisztémák különböző fizikai, kémiai és biológiai folyamatokon keresztül szabályozzák a planetáris energetikát, a hidrológiai ciklust, a légköri összetételt és ezáltal magát a globális éghajlatot (Bonan 2008). Ezek a komplex folyamatok egyben mérsékelhetik vagy akár erősíthetik is korunk antropogén hatások miatt felgyorsult környezeti változásait, miközben annak ők maguk is rendkívül érzékeny szenvedő alanyai (Bonan 2008, IPCC 2007b, IPCC 2007c, IPCC 2014). Az „antropocén” korának hajnalán és a globális környezeti ügy történetében talán új fejezetet nyitó párizsi klímátárgyalások árnyékában azonban már nem vizsgálhatjuk ezt a kérdéskört a klímaváltozás mitigációs lehetőségei, a változásokhoz való adaptáció és végül, de semmiképp sem utolsó sorban a gazdasági (vagy tágabb értelemben vett emberi megélhetési) vonatkozások figyelembe vétele nélkül (UNEP 2014, UNFCCC 2015).

Az erdők helyzete, a hozzájuk való emberi viszonyulás és így a klímaváltozás tükrében betöltött szerepük is kontinensről kontinensre, országról országra nagyon különböző. Általánosságban elmondható, hogy a trópusi területeken (vö. „fejlődő országokban”) a közelmúltban megtörtént és még ma is zajló óriási léptékű erdőirtások következtében megbomló szén-egyensúly számottevő üvegházgáz-kibocsátónak, miközben a mérsékelt övi területeken (vö. „fejlett országokban”) a jelentős újraerdősítések fontos szénnyelőknek számítottak és számítanak (IPCC 2007b, IPCC 2014). Az erdők a szárazföldi ökoszisztémák közül a legtöbb szénet tartják megkötve, így a további erdősítések és különösképpen a még meglévő, ökológiai funkcióit jól ellátó (trópusi) erdők megőrzése a klímaváltozás ellen való küzdelem egyik kulcskérdése (UNEP 2014, Stanturf et al. 2015). Ezt felismerve, az erdők a recens klímátárgyalásoknak is

központi témáját jelentik, kiélezett vitákat vonva maguk után a finanszírozási és végrehajtási mechanizmusokat illetően (UNFCCC 2015). Potenciálisan a szárazföldi területek mintegy 15%-a alkalmas a hajdan erdővel borított tájak visszaállítására, ezzel – az adott terület környezeti/ökológiai értelemben degradált állapotának felértékelődésén és a fokozott szén-dioxid megkötésen túl – számos, a klímaváltozás negatív hatásaihoz való alkalmazkodási lehetőséget hordozva magukban (Stanturf et al. 2015). Az erdők, elsősorban párologtatásuk és ezáltal a fokozott csapadékosság révén jelentős szerepet töltenek/tölthetnek be a felmelegedés és a szárazodás akár kontinensszintű mérséklésében (Gálos et al. 2012). Ezek a közvetlen éghajlatmódosító hatások ugyanakkor csak jelentős regionális különbségek mellett igazak. Globális szinten az evapotranspiráció és más erdőkhöz köthető biogeofizikai, biogeokémiai folyamatok, valamint a magának a földhasználati mód változásainak nettó szerepe jóval összetettebb és sok bizonytalanságot rejt magában (Bonan 2008, IPCC 2014).

Ahogy az éghajlat, úgy az erdők maguk sem statikus rendszerek, hanem – az előbbivel és más környezeti hatásokkal, valamint az emberi tevékenységekkel (!) szoros kölcsönhatásban – folyamatosan változnak. Napjainkra a direkt emberi beavatkozásokon kívül, indirekt módon az antropogén eredetű klímaváltozás nőtte ki magát az erdők életének legmeghatározóbb és legdinamikusabban változó tényezőjévé (Bonan 2008, Mátyás 2010). Az erdők egyben, mint fontos élőhelyek és biodiverzitási gócpontok, meghatározzák a másodlagos flóra, a fauna és a teljes ökoszisztéma helyzetét. A globális környezeti változások bizonyos esetekben a vegetáció számára akár pozitív hozadékokkal is bírhatnak. Ilyenek például a környezetben felhalmozódó, növények számára felvehető nitrogéntöbblet és a kibocsátott szén-dioxid „trágyázó” hatása, valamint a vegetációs időszak hosszabbodása és a melegedés közvetlen növekedésserkentő szerepe. Ezek a hatások azonban nem minden esetben (lesznek) képesek érvényesülni a mind gyakoribbá váló szélsőséges időjárási és éghajlati események miatt (pl. Geßler et al. 2007). A szárazsági és a fagy által kijelölt előfordulási határokon az erdők visszahúzódása, illetve térnyerése már jelenleg is megfigyelhető, megkérdőjelezhetetlen és a jövőben is folytatódni látszó folyamat, csakúgy globálisan, mint kontinensünkön (pl. Mátyás 2010, Maier et al. 2012, Maiorano et al. 2013). A határok eltolódása mellett az erdők szerkezeti és fajösszetételbeli átrendeződése is zajló és várható következmény, ugyanakkor az egyes erdőtársulások és fajok adaptációs és migrációs képességei széles határok között mozoghatnak (Meier et al. 2012, Maiorano et al. 2013). Kérdés, hogy az idők során ugyan számos viszontagságot kiheverő erdők fel tudják-e venni – természet adta lehetőségeik révén – a versenyt a jelenleg zajló, valószínűleg a közelmúlt földtörténeti korok leggyorsabb környezeti változásaival (Mátyás 2010).

Ahogy a klímaváltozást magát sem, úgy az erdőket sem szemlélhetjük elefántcsonttoronyból, pusztán természettudományos alapokról. Gazdasági szerepük mind világ-, mind regionális szinten kiemelkedő. Természeti és kulturális örökségünk fontos részét képezik esztétikai, rekreációs, spirituális és az oktatásban betöltött vonatkozásaikon keresztül. Az erdőkre fontos feladat hárul a gyakran a klímaváltozás társproblémájaként emlegetett globális szegénység leküzdésében is, megélhetési és élelmezési lehetőségeket, alternatívákat nyújtva első sorban a „fejlődő világ” számára (UNEP 2014, Stanturf et al. 2015). „Földközelen” maradva, az erdei biomassza tudatos és fenntartható gazdálkodás mellett egyben az egyik legfontosabb és jelentős bővítési potenciállal rendelkező megújuló energiaforrásnak számít (pl. IPCC 2014). Az erősödő gazdasági és társadalmi vonatkozások nem előzmény nélküliek. Kontinensünkön, ahol a jelenlegi erdőborítás a globálishoz hasonlóan 30% körüli, az erdők nagy részét az ember az elmúlt századok során saját céljainak megfelelően alakította át. Európa erdeinek jelentős része „intenzíven művelt” és jelentős gazdasági vonatkozásokkal bír, ami egy előrevetített, az éghajlat megváltozásával bekövetkező hozam- és értékcsökkenés miatt az egész kontinens gazdaságát érintő problémaként jelentkezhet (Hanewinkel et al. 2012).

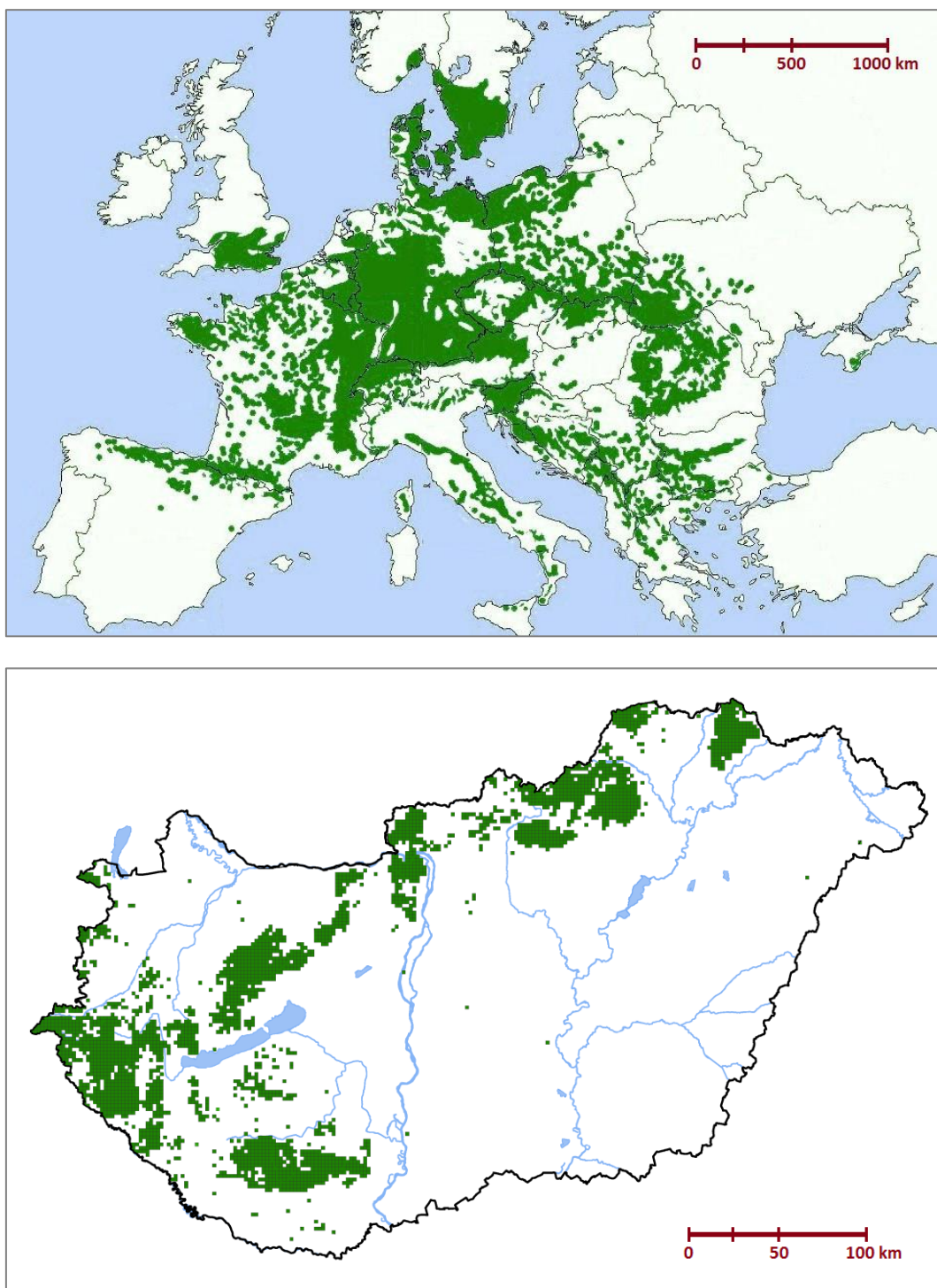
A globális folyamatok és kilátások lokális szinten, így Magyarországra is érvényesek. Erdeink és az erdőterületek további növelése fontos éghajlatszabályozó potenciállal bírnak és nem lebecsülendő a bennük rejlő fenntartható gazdasági lehetőség sem (pl. Führer 2010, Gálos et al. 2011). Ugyanakkor a környezeti változások negatív hatásai is ugyanúgy érzékelhetők, mint nagyobb léptékben. A Kárpát-medence melegedése, a szárazodás és az extrémumok gyakoribbá válása különösen érzékenyen érintheti a kiegyensúlyozottabb éghajlatot kedvelő erdőtársulásainkat, mint például a bükkösöket (*Fagetalia*) (pl. Mátyás et al. 2010). Ezeknek az erdőtársulásoknak ökológiai, gazdasági és turisztikai-rekreációs értéke mégis jelentős, nem beszélve arról, hogy a hazai vegetációs formák közül a bükkösök tartják relatíve a legtöbb szén megkötve (Führer és Jagodics 2008). Az ilyen, potenciálisan veszélyeztetett ökoszisztémák környezeti változásokra adott válaszainak és a lehetséges kölcsönhatásoknak a vizsgálata tehát kulcsfontosságú nem csak természettudományos, de egyben gazdasági és más interdiszciplináris vonatkozások tekintetében is. Az (extratropikus) fás szárú vegetációt érő környezeti hatások és hosszabbtávú változások egyik kitűnő indikátorának tekinthetjük az évgyűrűket, ami kiemelten igaz a bükk esetén (pl. Dittmar et al. 2003, Lebourgeois et al. 2005). Dolgozatomban három magyarországi bükkös erdőállománynak az éghajlat változékonyságára adott válaszát vizsgáltam évgyűrű-elemzési módszerekkel, lefektetve ezzel egy bár korlátozott érvényű, de módszertani szempontokból „úttörőnek” is tekinthető *dendroklimatológiai* tanulmány alapjait.

2. Szakirodalmi áttekintés

2.1. A bükk és helye Európában (múlt és jelen)

A bükkfélék az északi mérsékeltöv lombhullató erdeinek számos meghatározó fajáját foglalják magukba. Észak-Amerikától, Európán keresztül, Nyugat-Ázsiáig majd mindenhol megtalálhatjuk tíz fő *genusa* közül valamelyiket (Fang és Lechowicz 2006). A kört szűkítve, nevezett nemzetség tagjaként az (európai) bükk (*Fagus sylvatica* L.) kontinensünk egyik legjelentősebb erdőalkotó faja. Bár első sorban a csapadékos és hűvösebb éghajlat kedvelőjeként szokás számon tartani, a szélsőségesen száraz és szélsőségesen nedves élőhelyek kivételével, Szicíliától kezdve a mediterrán hegyvidékeken át egészen Dél-Skandináviáig csaknem mindenütt előfordul (1a. ábra) (Ellenberg 1988). Egyes közép-európai országok erdeinek uralkodó faja, melyet jól mutat a német nyelvterületen használt „Mutter des Waldes” („az erdők anyja”) elnevezés (Bolte 2005). Noha az elmúlt századok során a gazdasági szempontokból jövedelmezőbbnek ítélt fenyveseket a korabeli erdőgazdálkodási szemléletmódnak köszönhetően sok esetben a bükkösök rovására terjesztették el, napjainkban a bükk újra „reneszánszát éli”, területe jelentősen növekszik, elsősorban az elegyetlenné tett fenyvesek újrakezeltetése vagy teljes fafajcseréje során (pl. Bolte et al. 2007, Geßler et al. 2007, Jezík et al. 2011).

A fentiek egyben rámutatnak, hogy a sűrűn lakott Európában az eredeti állapotában megmaradt *természetes* bükkösökkel (és általában a *természetes* növénytakaróval is) csak a legkritikább esetben találkozhatunk a történelem során a „vén kontinens” szinte teljes területére kiterjedő emberi természet(át)alakító működés következményeként (vö. 3.3. fejezet). Nagyobb területű, (részben) érintetlen bükkösöknek első sorban a határainkhoz közeli Keleti-Kárpátok nyújtanak menedéket (Trotsiuk et al. 2012). Dél- és Kelet-Közép-Európában, így Magyarországon is elterjedésük főleg a hegységekhez kötődik, de jelentős állományai vannak pl. a Zalai-dombság területén. Szűkebb hazánk 20% körüli erősségének közel 6% adják a bükkös erdőtársulások, ami az ország teljes területére vetítve kb. 1,2% (1b. ábra) (NÉBIH 2014). A bükk szórványosan még ma is előfordul hazánk alacsonyabb fekvésű területein (1b. ábra), de számos adat és feljegyzés enged következtetni a bükk szélesebb történelmi alföldi elterjedésére is (Standovár és Kenderes 2003). A magyarországi bükkösök *természetessége* mind elterjedési területüket, mind állományszerkezetüket tekintve számos kérdést von maga után. „Őserdőnek” minősülő bükkösök csak elszórva, az ún. erdőrezervátumok területén találhatóak, legfeljebb pár száz évre visszatekintő ember nélküli fejlődéstörténettel (Horváth és Borhidi 2002).



1. ábra. A bükk (*Fagus sylvatica*) európai (felül) és magyarországi (alul) elterjedése. A magyarországi elterjedési térkép a bükkös/bükkal elegyes erdőállományok előfordulását mutatja a 2x2 km-es egységterületű raszterhálón. (Forrás: EUFORGEN 2009; NÉBIH 2014)

Fig. 1. Distribution maps of beech (*Fagus sylvatica*) in Europe (top) and Hungary (below). The Hungarian distribution map shows the occurrence of (mixed) beech forest stands on a 2x2 km national grid. (Source: EUFORGEN 2009; NÉBIH 2014)

A bükk rendszertani besorolását tekintve a bükkfavirágúak (*Fagales*) rendjébe, a bükkfafélék (*Fagaceae*) családján belül a bükk (*Fagus* L.) nemzetségbe tartozó fafaj. A dolgozat szempontjából érdekes tulajdonságai közül szemezgetve megállapíthatjuk, hogy viszonylag lassú növekedésű fa, magoncai különösen az első években és az anyafák árnyékában igen visszafogottan fejlődnek. Magassági növekedési erélye általában 15-20 éves korában tetőzik, a legnagyobb éves átmérőnövekedését pedig 50-60 éves korában érheti el, noha a későbbi növedékcsökkenés igen fokozatos. Növekedését az állomány záródásviszonyai jelentősen befolyásolhatják a fa életének minden szakaszában (Gencsi és Vancsura 1992). A bükkösök természetes életciklusára az időközönként fellépő természetes összeroppanások mozaikossága és az így keletkezett lékekben való felújulás jellemző (Standovár és Kenderes 2003). A növekedésre így természetes körülmények között igen erős állományszerkezeti befolyás jellemző (Garamszegi és Kern 2015). A „fejsze élet” elkerülő példányok akár az 500 éves kort is megélhetik, azonban kb. 150 éves koruk után a bélkorhadás megindulása (vö. gazdasági érték csökkenése, vágásforduló hossza) általános folyamatnak tekinthető (Gencsi és Vancsura 1992, Trotsiuk et al. 2012, Di Filippo et al. 2015). A kontinens erdőgazdasági tevékenység alá vont erdeiben 150 évnél idősebb bükkösökkel így csak elvétve találkozhatunk.

Szintén fontos a klímaváltozás és annak mitigációja tükrében, a bevezetésben már említett tulajdonsága, hogy a mérsékelt övi erdőtársulásaink közül a bükkösök rendelkeznek a területegységre eső legnagyobb szén-rezervoárral, miközben a felhalmozott biomassa szintbeli (talaj-gyökérszövet-törzs-lomkorona) eloszlása nagy plaszticitással bír (Bolte et al. 2007, Führer és Jagodics 2008). Széles elterjedésük ellenére a különböző klimatikus viszonyok között élő állományok genetikai determinációja nem mutat jelentős eltérést, ugyanakkor az egyes állományokon belüli genetikai diverzitás igen magas lehet (Hamrick 2004, Bolte et al. 2007). A bükkösök tipizálása a termőtalaj típusa, a tengerszint feletti magasság és a biogeográfiai elhelyezkedés alapján lehetséges (Standovár és Kenderes 2003). Széles elterjedése ellenére is jó „klímajelző” fafajnak számít, a hazai erdőgazdálkodási gyakorlatban az erdősztyepp, a kocsánytalan tölgyes-cseres és a gyertyános-tölgyes „klímaövek” mellett a bükkös klíma a nyugati országrész és a hegyvidékek kiegyenlítettebb, csapadékos termőhelyi viszonyait jelzi (Führer et al. 2011a). A bükkösök előfordulásának határaihoz pontos éghajlati mutatók társítását számos munka, különböző szempontok alapján kísérelte meg (pl. Ellenberg 1988, Fang és Lechowicz 2006, Führer et al. 2011a). Ha a számok terén nem is, az aszályosság és a korai fagyok korlátozó szerepében a szakirodalom egyöntetűen egyetért.

A bükk jelenlegi és jövőbeli elterjedésének megértéséhez nélkülözhetetlen a múlt ismerete. Egy-egy fafaj posztglaciális elterjedését például pollenanalízis segítségével tudják vizsgálni, ami elsősorban különböző tavi üledékekből vett minták különböző, datált rétegeiben található fafajspecifikus pollenszemcsék megszámlálását és az így kapott idősor kiértékelését jelenti. Ezzel a módszerrel a bükk elterjedésére kb. 6-8000 évre visszamenőleg kaphatunk becsléseket, kirajzolva a holocén szétterjedésének útvonalait. A szakirodalomban fellelhető adatok alapján a bükk glaciális refúgiumait, posztglaciális géncentrumait első sorban a Kelet-Balkánon kell keresnünk, de a Duna völgyén és a Keleti-Kárpátok hegylábi területei mentén felnyúlva korai kárpát-medencei előfordulásuk is valószínűsíthető (Magyari 2002, Standovár és Kenderes 2003, Giesecke et al. 2007, Trotsiuk et al. 2012). Az elterjedés későbbi mozgatórugóit az ökológiai versengésben, az éghajlat változásainak korlátozó szerepében és az ember természet- és tájalakító ténykedésében kell keresnünk (Woodward 1987, Magyari 2002, Bolte et al. 2007, Giesecke et al. 2007). Ezek közül első közelítésben bármelyik tényező figyelmen kívül hagyása vagy alulbecslése hiba volna a jövőbeli elterjedés megértése szempontjából.

Giesecke és munkatársai (2007) modellezett történelmi éghajlati adatokkal meghajtott ökológiai modell segítségével szimulálták az elmúlt korokra a bükkösök potenciális elterjedési területét, hogy azt a pollenanalízis segítségével kapott térképekkel összehasonlítva, az éghajlat determinációs szerepét vizsgálhassák. A modell korlátozott felbontása és a modellezésben rejlő bizonytalanságok ellenére a kísérlet bizonyította az éghajlat valóban kiemelt szerepét a jégkorszakokat követő teljes időszak során. A kísérlet ugyanakkor a tagolt domborzatú területekre, így a Kárpát-medence térségére is csak elnagyolt eredményeket adott. A fafaj elterjedésének egyértelmű klímadetermináltságát nagyobb skálán is kérdésessé teszi az északnyugati előfordulási határ esete. A Baltikumban jelenleg az ökológiai modell adta eredmények és a „valós elvárások” ellenére sincsenek összefüggő bükkösök, megkérdőjelezve ezzel a potenciális előfordulás határainak meghúzhatóságát (Bolte et al. 2007).

2.2. A bükk és a klímaváltozás: tények és félelmek

Arról, hogy a klímaváltozás pontosan mennyire és hogyan érinti a bükkösöket, nagyon változatos jövőképek olvashatóak a szakirodalomban. Többségük ugyan egyetért abban, hogy a változások negatív irányúak lesznek, és csak a mértéket illetően van közöttük véleménykülönbség, akadnak azonban, amelyek az éghajlatváltozást a bükk számára esetlegesen még kedvezőnek is tekinthető folyamatként mutatják be. Természetesen sok múlik azon is, hogy az állítások hová és milyen időskálán lettek kimondva.

Annyi bizonyos, hogy az elterjedési terület nagy részén a fokozódó aszályosság, és az éghajlati extrémumok, rendkívüli időjárási események érzékenyen érintik más erdőtársulásokhoz hasonlóan a bükkösöket is, csakúgy az idős fákat, mint az újulatot (pl. Geßler et al. 2007). A szárazsági (xérikus) határon erősödő klímaérzékenység és a változások fokozott gyorsasága miatt a természetes folyamatok kompenzáló hatása elégtelen lehet, ezzel az adott területen az állományok pusztulását, visszahúzódását idézve elő (Mátyás et al. 2010). Ezzel párhuzamosan, az északi elterjedés éghajlati körülményei között a bükk épp az éghajlatváltozás miatt válhat kompetitív fafajjá (Bolte 2005). Kérdéses azonban, hogy a fafaj túlzott „elterjesztése” hosszú távon nem von-e maga után a jelenlegi, Európa jelentős részét érintő lucfenyő-pusztuláshoz hasonló következményeket (Geßler et al. 2007).

A xérikus határokon történő visszahúzódást elsők között az Ibéria-félszigeten kezdték el vizsgálni, ahol a Dél-Pireneusok lejtőin a bükkösök 1970-es évek vége óta tartó folyamatos növedékcsökkenésére hívták fel a figyelmet (Jump et al. 2006a). Peñuelas és munkatársai (2007) archív és jelenkori fényképek összehasonlításával kívánták igazolni a bükk drasztikus visszahúzódását a régióban, belátva ugyanakkor, hogy az sok esetben hathatós emberi közreműködés következtében történt meg. A probléma azóta széles körben vizsgált Közép-Európában és a Balkán-félsziget térségében is, ahol egyes tanulmányok szerint a fafaj szintén jelentős visszaszorulása várható (pl. Geßler et al. 2007, Mátyás et al. 2010, Stojanović et al. 2013). Hazai kutatások ugyancsak kimutatták, hogy a „bükkös klíma” térvessztése már jelenleg is zajló folyamat Magyarország területén is, főleg az Északi-középhegységnél alacsonyabban fekvő dunántúli területeken, melyet a jellemzésükhöz használt éghajlati mutatók alapján szárazsági határként értelmeztek (Mátyás et al. 2010, Czúcz et al. 2011). Megítélésük szerint a területen a jövőben esetlegesen tömeges pusztulások is felléphetnek, súlyos ökológiai problémákat vonva maguk után.

A tudományos érdeklődés fokozódása a bükkösök klímaváltozásbeli jövőjét illetően nagyjából a 2000-es évek közepére tehető. Közvetlenül az ezredforduló utáni aszályos évek, melyek hatása Európa-szerte 2003-ban tetőzött, szinte minden országban a bükkal foglalkozó tanulmányok egész sorát eredményezték (pl. Czajkowski et al. 2005, van der Werf et al. 2007, Molnár és Lakatos 2009, Mátyás et al. 2010, Fotelli et al. 2009, Jezík et al. 2011). A tapasztalatok és a levont következtetések ugyanakkor igen eltérőek voltak. A legtöbb, klimatikus fekvésüket tekintve széles skálát lefedő országokból (pl. Hollandia, Görögország, Szlovákia), a bükkösöknek az aszályos időszak alatt is töretlen, normális növekedéséről és csupán elenyésző károkról számoltak be (van der Werf et al. 2007, Fotelli et al. 2009, Jezík et al. 2011).

Magyarországon ezzel szemben nem múlt el nyom nélkül az új évezrednek a drasztikus klímaváltozás „előszelét” hozó kezdete. 2004-ben Zala megyében jelentős bükk-pusztulás következett be, nagy területeket érintve és gazdaságilag is számottevő károkat okozva (Molnár és Lakatos 2009). Noha a teljes kárláncolat máig sem tisztázott, az bizonyos, hogy az állományokat eleve legyengült állapotban találó, négyévi (2000-2003) szélsőségesen száraz időjárás fontos szerepet játszott a dolgok alakulásában és a 2003-ban jelentkező, másodlagos (biotikus) károsítók gradációjában. A különböző tapasztalatok miatt az aszályos évek elmúltával levont következtetések is merőben ellentétesek voltak. Míg Mátyás és munkatársai (2010) a zalai pusztulások tükrében állították, hogy a 3-4 egymást követő aszályos év már elegendő a drasztikus ökológiai következmények kialakulásához, addig pl. van der Werf és munkatársai (2007) azt a következtetést vonták le, hogy a rövid, pár éves szárazság nem jelent komolyabb problémát. Az azonban mindenképp megerősítést nyert, hogy a gyors lefolyású tömeges pusztulások során az éghajlat általában csak közvetett szerepet játszik. A kedvezőtlen klímaviszonyok miatt legyengült állományokat könnyebben támadják meg a különböző gombabetegségek, illetve a részben újonnan megjelenő károsító rovarfajok gradációi is gyakoribbá válhatnak (pl. Granata és Sidoti 2004, Csóka et al. 2009, Molnár és Lakatos 2009). A klímaváltozás előrehaladtával, a bükkösök klimatikus igényeinek határához közeledve, az éghajlat változékonysága várhatóan egyre erősebb összefüggést fog mutatni a fák növekedésével és az állományok egészségi állapotával is (pl. Mátyás 2010, Jump et al. 2010, Führer et al. 2011a). Az is elgondolkodtató, hogy míg Majer (1972) arról ír –de megemlíti Molnár és Lakatos (2009) is –, hogy a bükknek alig ismerünk biotikus károsítóit, a zalai pusztulás kimenetelében mégis több gomba és rovarfaj is aktív szerepet kapott.

2.3. Lehetőségek a jövő megértésére és az alkalmazkodásra

Honnan tudhatjuk hát meg, hogy pontosan mit is hozhat a jövő? *Pontosan* talán sehonnan, a dolgok korábbiakban vázolt komplexitása miatt, esetleg, ha türelemmel kivárjuk. Ugyanakkor, különösen a szárazsági határon vagy más, az átlagosnál gyorsabban változó környezetben lévő erdei ökoszisztémák folytonos monitorozása, a szerteágazó és sokszor interdiszciplináris kutatómunka és az előrejelzések ismételt megkísérlése rendkívüli jelentőségű (Jump et al. 2010, Mátyás 2010). Ez az egyik legfontosabb dolog, amit az ember – megkísérelve a természetes és a saját maga generálta folyamatok megértését – megtehet egy környezeti szempontból jobban funkcionáló, „fenntartható” jövő reményében (Horváth és Borhidi 2002).

A föld- és környezettudományokban, így az ökológiában is, az informatika rohamos fejlődésével a különböző komplexitású és célú modellek fejlesztése és használata vált a kutatások egyik központi témájává és eszközévé. Az egyszerűbb, ún. bioklíma modellek a fajok jelenlegi elterjedéséhez rendelt éghajlati mutatók éghajlati modellekkel szimulált megváltozásának vizsgálatán alapulnak. Ezek a modellek a bükk jelentős visszaszorulását jelzik előre a déli, délkeleti, mediterrán-kontinentális elterjedés jelentős részén, köztük Magyarországon is (pl. Czúcz et al. 2011, Stojanović et al. 2013). A Czúcz és munkatársai (2011) által használt modell 2050-re a hazai bükkösök 56-99%-át érintő változásokra utal a különböző klímaszcenáriók figyelembe vételével, 2085-re pedig a bükk számára kedvező élőhelyek gyakorlatilag teljes eltűnését jelzi az ország területéről. Ezek a modellek azonban nem képesek figyelembe venni az adaptációs lehetőségeket, pusztán a jelenlegi elterjedés referenciául vétele alulbecsülheti a valódi potenciális jövőbeni elterjedést (Czúcz et al. 2011, Maiorano et al. 2013). Célravezetőbb lehet emiatt a történelmi elterjedési adatokat (is) figyelembe vevő modellek használata (Maiorano et al. 2013).

Valamivel összetettebb, a migrációs lehetőségeket is figyelembe vevő modellkísérleteket végeztek Maier és munkatársai (2012), illetve Saltré és munkatársai (2015). A modelleknek megfelelően az eredmények is összetettebbek, lokális kihalásokat és az elterjedési terület mozaikosodását vetítve előre. Az eredmények alapján az elterjedés északi határán történő terjeszkedés is nehézségekbe ütközhet, mivel erősödő éghajlati változékonyság a kedvezőbbé váló klíma ellenére is akadályozhatja a sikeres kolonizációt (Saltré et al. 2015). Különböző növényélettani, fiziológiai folyamatok és empirikus vagy explicit összefüggéseit használó, egészen komplex modellek is léteznek, akár erdőfoltok, állományok szintjén prognosztizálva az individuális fák növekedését és ezáltal hosszabb távon a fafajösszetétel változásait (pl. Lexer et al. 2001). Sabaté és munkatársai (2002) növekedési modellje a melegedéssel meghosszabbodó tenyészidőszak akár a bükk számára is kedvezőbbé váló viszonyokat jelzett még a szárazsági határnak tekinthető Spanyolország területére is, amennyiben a csapadékmennyiség növekedése lépést tudna tartani a melegedéssel. Kramer és munkatársainak (2010) genetikai diverzitást és genetikai szintű adaptációs lehetőségeket is figyelembe vevő modellje az elterjedés jelenlegi nedves-kontinentális központi területén nem mutat figyelemre méltó változásokat, a visszaszorulási és kolonizációs határon pedig erősödő szelekciós-adaptációs folyamatokat, lehetőségeket prognosztizál, a bizonyos mértékig elkerülhetetlen visszaszorulás mellett (Kramer et al. 2010).

Ahogy az éghajlatváltozás modellezésénél, úgy az ökológiai modellek esetében is rendkívül fontosak a folyamatos mérések és megfigyelések, a modelleredmények validációja és a modellek által használt összefüggések pontosítása céljából. Az egyszerűbb, pl. fenológiai megfigyelések és a műszerigényes fiziológiai mérések egyaránt részét képezhetik a monitoringnak. A sok esetben hosszú múltra visszatekintő fenológiai megfigyelések, melyek egyben az éghajlatváltozás nyomon követésére is előszeretettel használt proxy adatok, általánosságban a bükk esetén is a vegetációs időszak hosszabbodását, illetve korábbi kezdetét jelzik, különösen a magasabban fekvő területek esetén (pl. Čufar et al. 2012, Prislan et al. 2013). A megfigyelések ugyanakkor rendkívül változatos fajon és akár állományon belüli fenológiai plaszticitásról adnak bizonyosságot, ami az egy generáción belüli, gyors változásokhoz való alkalmazkodás kulcsát jelentik, akár idősebb korban is olyan drasztikus úton, mint pl. a teljes koronaszervezet megváltozása (Chakraborty et al. 2014, Capdevielle-Vargas 2015).

A növényélettani folyamatok (pl. fotoszintézis és transpiráció) változásait fiziológiai vizsgálatok során elemezik. Fotelli és munkatársai (2009) szabad állományban ismerték fel az élettani folyamatok viszonylag zavartalan működését görögországi bükkös állományokban a 2000-es évek eleji aszályok alatt. Számos más tudományterülethez hasonlóan az egyre pontosabb, nagyobb felbontású és növekvő adatsorú műholdas és egyéb távérzékelési mérések alkalmazása is egyre elterjedtebbé válik nagyobb térségek átfogó monitoringjában, köztük a bükkösök vizsgálata szempontjából is jelentős lehetőséget hordozva magában (Hill et al. 2014).

Magyarországon az Erdészeti Tudományos Intézet (ERTI) folytat rendszeres felméréseket, többek között a bükkösök egészségi állapotáról is, az 1990-es évek eleje óta, állandó megfigyelési parcellák mellett (Csóka et al. 2009, Janik et al. 2012). A rendelkezésre álló, tájegységenként kiértékelte adatok alapján az Északi-középhegységben a '90-es évek első felében az országos szinten is legrosszabb egészségi állapotban lévő bükkösök esetén hosszan tartó, fokozatos javulás volt megfigyelhető. A 2010-es évek elejétől kezdve egy újbóli, enyhe állapotromlás következett be, így ismét észak-magyarországi bükköseink váltak a legrosszabb egészségi állapotúvá. A dunántúli területeken található bükkös állományok szintén egy kisebb, de ingadozó állapotjavuláson mentek keresztül a 20. század végére. A 2003/2004-es bükk-pusztulás hazánkban is első sorban csak a zalai bükkösöket érintette komolyabban. 2007-ben a zalai és alpokaljai területeken egy ismételt, kiugró állapotromlás következett be, melyet azonban az állományok gyorsan kiheverték. Jelenleg az alpokaljai bükkösök a legegészségesebbek az országban.

Összességében a több évtizedes tapasztalok alapján megállapítható az ismert biotikus károk növekvő trendje, ugyanakkor az is látható, hogy a mintaállományok egészségi állapota mégis felülmúlta a 2010-es évek elején a két évtizeddel azelőtti megfigyeléseket. A zalai állományok állapotának a többinél jóval periodikusabb ingadozása jól mutatja a bükk-pusztulás által is érintett terület kiemelt érzékenységét a rövidtávú változásokra (Csóka et al. 2009).

Az időről időre elvégzett fenológiai és állapotfelmérések mellett és azokat kiegészítve igen széles területet ölelnek fel az évgyűrűk elemzésében, illetve általában a fák vastagsági növekedésének tartamos mérésében rejlő lehetőségek. A dendrokronológiai módszerek nagy előnye, hogy expedíció-szerű mintavételezés során olyan helyeken is lehetővé teszik a hosszabbtávú folyamatok vizsgálatát, ahol nem zajlottak régebbre visszanyúló megfigyelések. A viszonylag egzakt módon számszerűsíthető évgyűrű-adatok ráadásul jól összehasonlíthatóvá teszik a különböző kutatási eredményeket. A bevezetésben említetteknek megfelelően ráadásul a bükk klimatikus hatások függvényében erősen változó évgyűrűszélességei különösen alkalmasak a hosszú távú változások dendrokronológiai, dendroklimatológiai módszerekkel történő elemzésére (Dittmar et al. 2003, Lebourgeois et al. 2005). Dittmar és munkatársai (2003) Európa különböző részeiről származó minták alapján hasonlították össze a különböző éghajlatú területek bükkfáinak növekedését. Eredményeik a múlt század végére Európa nagy részére a bükkösök gyorsuló növekedési ütemét jelezték, az éves növekedés visszaesése érdekes módon a magasabban fekvő területek esetén volt elsősorban megfigyelhető, feltehetően a troposzférikus ózonszennyezésnek köszönhetően. Vizsgálataikkal rámutattak arra is, hogy az eleve szárazabb körülmények között élő fákat kevésbé érzékenyen érinti az aszály, mint a humid körülményekhez szokott állományokat.

A különböző állományok növekedésének összehasonlítása mellett az évgyűrű-adatok alkalmazásának másik kézenfekvő módja a növekedés éghajlati adatokkal való összevetése és az egyes időszakok, éghajlati mutatók szerepének kiértékelése (pl. Di Filippo et al. 2007, Kern és Popa 2007, Čufar et al. 2008a). Ez az állomány „bioklimatológiai” értékeléséhez is hasznos eszköz lehet, alapot szolgáltatva például hatékony klímaindexek kidolgozására. A szakirodalomban alapvetően (élőhelytől függetlenül) a május-június hónapokat tekintik a fő növekedési időszaknak (pl. Lebourgeois et al. 2005, van der Werf et al. 2007, Čufar et al. 2008a). Számos tanulmány enged ugyanakkor következtetni az éves növekedésben kulcsszerepet játszó hónapok jelentős flexibilitására, változékonyságára (van der Werf et al. 2006, Di Filippo et al. 2007, Jezík et al. 2011, Garamszegi és Kern 2014, Tegel et al. 2014). A vegetációs időszak korábbi kezdete, a növekedési hónapok flexibilitása egyben lehetőséget nyújt a nyár közepi aszálytolerancia megerősödésére (Tegel et al. 2014).

Az évgyűrűkben esetenként megfigyelhető az éghajlati ingadozások korábbiakban említett, éves növekedésre való erősödő befolyása (Garamszegi és Kern 2014), illetve ezzel összefüggésben az akár távolabbi állományok éves növekedése is egyre szinkronizáltabb lehet (Latte et al. 2015). A csapadékosság és a hőmérséklet megváltozása mellett az évgyűrűk olyan nagy skálájú éghajlati folyamatok hatásvizsgálatára is alkalmasak, mint például a felhőzet ENSO jelenségkörhöz kapcsolódó változásai a spanyolországi bükkösök esetén (Rozas et al. 2015). Az évgyűrűszélességek mellett számos alkalmazása van az azokból származtatott körlapnövédékeknek is, melyek jó indikátorai az állomány növekedési viszonyainak, így az esetleges növedécsökkenésnek és a fák halandóságának is (pl. Piovesan et al. 2005, Jump et al. 2006a, Gillner et al. 2013). Emellett az évgyűrűszélességekhez hasonlóan a körlapi növedékek alakulásának éghajlatfüggése is vizsgálható (Sidor és Popa 2015, Führer et al. 2015). Az évgyűrűk és különösen a körlapi növedékek elemzése hasznos alkalmazásokat rejt a növekedési modellekben használt függvények és a fák halandóságának (mortalitásának) parametrizációja során (pl. Cailleret et al. 2015, Das és Stephenson 2015).

A különböző élőhelyen található fák növekedésének vizsgálata és összehasonlítása egyben átvezet a származási kísérletek és ezzel érintőlegesen a genetika területére. A származási kísérletek a különböző országokból, régiókból, különböző éghajlati körülmények közül származó egyedek meghatározott, azonos helyre történő telepítését és az így megváltozott körülmények között a származásra jellemző növekedés és/vagy fenológiai, fiziológiai paramétereik vizsgálatát jelentik. Elsődleges céljuk a magas produktivitású és ellenálló szaporítóanyag gazdasági célból való kiválasztása, aminek a céljára vagy attól függetlenül lehetőségek kínálnak a bükk esetében például a különböző eredetű csemeték aszálytoleranciájának vizsgálatára (pl. Czajkowski és Bolte 2006, Knutzen et al. 2015).

Szerte Európában, így a xérikus határhoz közel fekvő országokban is számos nagy nemzetközi származási kísérletet állítottak fel, amelyek a kísérlettel szemben támasztott igények változásával napjainkra egyedülálló lehetőséget kínálnak az éghajlatváltozás hatásainak vizsgálatára (Mátyás et al. 2009, Stojnić et al. 2010, Robson et al. 2013, Horváth és Mátyás 2014). Robson és munkatársai (2013) egy spanyolországi, valóban a szárazsági határon lévő nemzetközi származási kísérletben folytatott megfigyelések alapján igazolták az eleve szárazabb környezetből érkezett származások aszályal szembeni jóval magasabb tűrőképességét, felhívva ezzel a figyelmet a szélsőséges helyzetben lévő populációk génmegőrzésének fontosságára (vö. Mátyás 2010). Ugyan a genetikai diverzitás a xérikus határokon az éghajlat további szárazodásával egyre csökken, bizonyos ideig és mértékig jelentős genetikai adaptációs potenciál áll a bükkösök rendelkezésére (pl. Jump et al. 2006b, Kramer et al. 2010).

A jövő megértésének és befolyásolásának reményében a röviden bemutatott, különböző ökológiai, fiziológiai, növekedési és egyéb vizsgálatok eredményeit összegezve újra és újra felül kell vizsgálni a kérdést (Bolte 2005, Geßler et al. 2007). Párhuzamosan kell vizsgálnunk a múltbeli és jelenkori elterjedés okait, szem előtt tartva a fenológiai plaszticitás és az evolúciós, genetikai adaptáció reális lehetőségeit (Hamrick 2004, Bolte et al. 2007, Giesecke et al. 2007). A bükkösök fennmaradásának kulcskérdése, hogy a változások hogyan érintik a faj reprodukciós képességeit, azaz fel tud-e újulni a megváltozott körülmények között is (Bolte 2005, Czajkowski et al. 2005, Bílek et al. 2014). Megfontolandó álláspont, miszerint a mai értelemben vett, sok esetben elegyetlen vagy elenyésző számú elegyfajjal tarkított bükkösök szorulhatnak ki első sorban a xérikus határhoz közeli területekről (Führer et al. 2011b). A fajgazdag, elegyes erdők kialakulása/kialakítása egyben csökkenheti az erdőgazdasági kockázatot (Geßler et al. 2007). Szintén erdőgazdasági szempontból lehet előnyös néhány gondosan kiválasztott szárazságtűrő származás behozatala (Bolte 2005). Ugyanakkor biztos, hogy a természetes folyamatoknak (is) utat engedő erdőgazdálkodás, a minden területen megtalálható szárazságtűrő csemeték és elegyfajok természetes szelekciója és az állomány mikroklímájának védelme révén a legkézenfekvőbb és legkisebb kockázatot rejtő utak egyike a klímaváltozáshoz való alkalmazkodás elősegítésére (Standovár és Kenderes 2003, Bolte 2005, Bílek et al. 2014).

3. Célkitűzések és bizonytalanságok

3.1. Célkitűzések

A diplomamunkám céljai között fontos szerepet töltött be az eddigiekben taglalt, átfogó szakirodalmi áttekintés. A tudományos folyóiratokban, könyvekben megjelent információkat a mesterképzés ideje alatt megjárt nemzetközi konferenciákon szerzett tapasztalatokkal és benyomásokkal átítatva, és azok szerint rendszerezve igyekeztem keretbe foglalni. A globális vonatkozásokat tárgyaló *Bevezetés* és az európai szintű *Szakirodalmi áttekintés* után a továbbiakban az erdő és a klímaváltozás komplex problémakörét egy szűkebb, magyarországi metszeten keresztül kívánom bemutatni egy égető, a tudomány és a gyakorlat szakembereit egyaránt foglalkoztató témán keresztül. A vizsgálatok alapvető célkitűzése annak felderítése volt, hogy a mintaterületeken, a vizsgálatba bevont éghajlati elemek közül melyek és miként befolyásolják leginkább a bükk vastagsági növekedését, illetve, hogy miként változnak, erősödnek vagy éppen gyengülnek ezek a hatások a klímaváltozással párhuzamosan – feltehetőleg annak következményeként – maguk után vonva a vegetációs időszak, és így

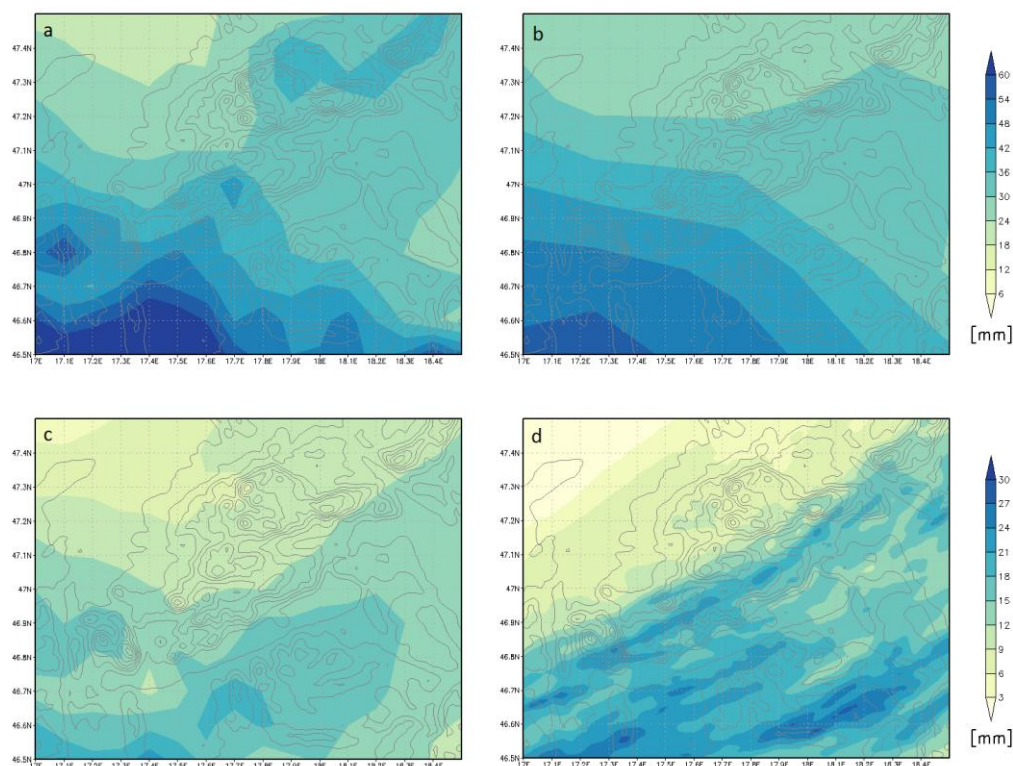
a fák „bioritmusának” megváltozását. A rendelkezésre álló adatok birtokában igyekeztem arra a kérdésre is választ adni, hogy a mintaterületeken romlottak-e a bükk ökológiai (és gazdasági) értelemben vett esélyei. A továbbiakban, a felhasznált adatok és eredmények ismertetése előtt, azok kimenetelétől függetlenül, igyekszem néhányat ismertetni az eredmények általánosíthatóságának korlátai közül.

3.2. Klímaadatok reprezentativitása és az adathosszúság problémája

A jelen munkához hasonló dendroklimatológiai kutatások fontos alapját képezi a megfelelő éghajlati adatok kiválasztása. Hagyományosan a vizsgálatok a sokszor távolabb fekvő meteorológiai állomások méréseire támaszkodtak (pl. Čufar et al. 2008a; Jezík et al. 2011). A különböző rácshálós meteorológiai és éghajlati adatbázisok elterjedésével azonban jobbra ezek veszik át a klimatológus és nem klimatológus felhasználók számára való adatszolgáltatást. Sokszor nehéz azonban a számos lehetőség közül a megfelelő adatbázis kiválasztása. Általánosságban igaz, hogy megfelelő inter- és extrapolációs technikákat és kellő mennyiségű bemenő adatot feltételezve a nagyobb rácsfelbontásúak egyben pontosabb információkat is szolgáltatnak az adott helyre. Bizonyos határon túl az egyre finomabb felbontás azonban már nem biztos, hogy érdemben tud újat mondani egy olyan területre, ahol a rendkívül változatos szubgrid domborzati, talajborítottsági, lejtőkitettségi stb. viszonyok egyre nagyobb szerepet kapnak a mikroklimatikus viszonyok befolyásolásában, miközben a rendes meteorológiai mérőhálózat mérései ezt a skálát már nem tudják követni (Daly 2006). Erdők esetében ráadásul ezek a mikroskálájú hatások még határozottabban jelentkezhetnek (Lookingbill és Urban 2003). Ugyan a távérzékelési mérések egyre pontosabb adatokat szolgáltatnak a földi mérőállomásoktól távoli helyekre is, azonban az adatsorok rövidege miatt ezek egyelőre nem alkalmasak hosszabbtávú környezeti vizsgálatok céljára.

Mindezek ellenére a korábbi és itt bemutatott tapasztalatok alapján az általánosan használt éghajlati adatbázisok rácsfelbontástól függetlenül sem mutattak szignifikáns eltérést az éves növekedéssel való kapcsolatukban. Ennek oka alapvetően abban rejlik, hogy az alkalmazott korrelációs vizsgálatok sokkal jobban függtek az adatsorok hosszútávú kovarianciájától, mintsem a területre reprezentatív, pontos adatoktól. Ebből kifolyólag indokolhatóvá vált az esetenként kevésbé reprezentatív, de hosszabb időszakot lefedő adatsorok használata. Néhány esetben, különösen a sokkal nagyobb területi változékonysággal rendelkező csapadékadatok terén mégis érezhető a különböző felbontású és több vagy kevesebb mérőállomás méréseire támaszkodó adatsorok közötti jelentős területi különbség. Különösen igaz ez az aszályosság és a növényzet

szempontjából kritikus tavasz végi, nyár eleji hónapokra, amikor a csapadék jelentős része konvektív eredetű. Erre szolgáltat példát egy esettanulmányon keresztül a 2. ábra, a 2000-es évek elejének aszályos időszakairól, amely a zalai állományok mellett a Keszthelyi-hegységet is érintette, ahol az egyik általam vizsgált mintaterület is elhelyezkedik.



2. ábra. A 2000 május havi csapadékösszeg területi eloszlásának reprezentativitása a 0,1°-os CARPATCLIM (a) és a 0,5°-os GPCC (b) adatsorok mellett a Bakony-Balaton-felvidék térségére. A napi felbontású CARPATCLIM adatok alapján egyes gridpontokban a május-júniusi kéthavi csapadék több, mint negyede május 22-én hullott (c). A CARPATCLIM napi csapadékösszeg mellett összehasonlításképpen ARW (WRF) modellel 1 km-re (kb. 0,01°) „dinamikusan leskálázott” ECMWF analízis adatok állnak (d). (Interpoláció: GRADS v2.0.1)

Fig. 2. Areal variability of May 2000 precipitation over the Lake Balaton region, represented by the different grid resolutions of 0.1° Carpat Clim (a) and 0.5° GPCC (a) datasets. Over several grid-points more than 25% of May-June bimonthly precipitation fell on the single day of 22th May, according to the highly reliable CARPATCLIM dataset (c). By comparison, results of a convection-solving dynamical downscaling ARW (WRF) model experiment are shown with 1 km (ca. 0.01°) resolution and ECMWF analysis input data (d).

3.3. Az erdők természetessége, termőhelyi viszonyok változatossága

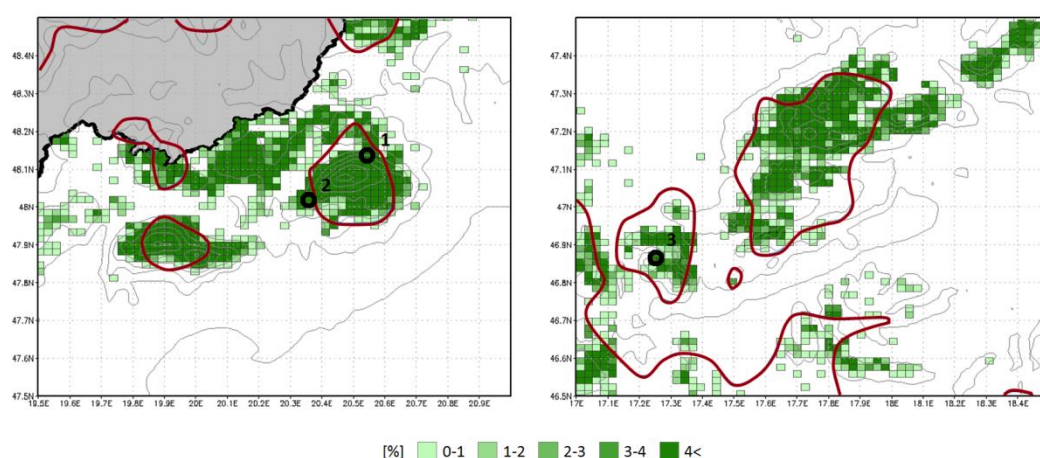
A bükkösök és általában az európai erdők nagy részének fafajösszetételi (elegyesség) és állományszerkezeti (koreloszlás, mozaikosság) természetessége a szakirodalom alapján erősen megkérdőjelezhető (Horváth és Borhidi 2002, Standovár és Kenderes 2003, Geßler et al. 2007, Hanewinkel et al. 2012). Ebből kifolyólag kérdéses az is, hogy az ember által, elsősorban gazdasági céllal létrehozott *féltermészetes* erdők vizsgálata mennyiben reprezentatív egy fafaj vagy erdőtársulás sorsát illetően. Természetesen az erdőket a környezeti változások jelen állapotukban érik, a gazdasági erdőket gazdasági erdőkként, az őserdőket őserdőkként, azonban ahogy a természet- és környezetvédelem esetén, úgy a környezeti hatásvizsgálatoknál is szem előtt kell tartanunk a valódi célokat és a korlátokat.

Mivel Magyarország bükköseit nagy része (köztük a dolgozat során vizsgált mintaállományok is) emberi tevékenység által érintettek, így jogos, hogy a kutatási eredményeket egyben bizonyos mértékig a bükk „sorsával” is összekössük. Ugyanakkor nem szabad megfedkezünk a párhuzam megvonásának jelentős mértékig emberközpontú voltáról. A vizsgálatokba eredetileg a MTA Ökológiai Kutató Intézetétől kapott, a Kékes Erdőrezervátumból származó bükk korongokat is be akartunk vonni. Az állományviszonyok növekedésre gyakorolt befolyása miatt azonban a többi, erdőgazdasági művelésbe bevont bükkössel szemben, hasonló mintaelemszám mellett nem tudtunk reprezentatív kronológiát létrehozni (Garamszegi és Kern 2015). Az évgyűű minták származása mellett a mintaterületenként egy-egy generációból való származásuk és viszonylag rövid adatsorok is megkérdőjelezzik a levonható, hosszútávú következtetések általánosítását (vö. Di Filippo et al. 2007). Szintén megemlítendő, hogy bár a termőhelyi viszonyok közül valóban az éghajlat az, ami a legfontosabb és egyben jelenleg leggyorsabban változó tényező, ugyanakkor mások, köztük elsősorban a termőtalaj tulajdonságai is rendkívül fontosak és erősítik vagy gyengítik a klimatikus változások, szélsőségek lokális hatásait (pl. Czajkowski et al. 2005, Geßler et al. 2007).

4. A mintaterületek és éghajlati jellemzésük

4.1. A mintaterületek kiválasztása és leírásuk

A mintaterületek kiválasztásánál fontos szempont volt, hogy kis számosságuk ellenére reprezentálják a hazai bükk előfordulás több területét is, különös tekintettel az előfordulási határra. Végül három mintaterület szolgált a dolgozatban is felhasznált évgyűű adatok forrásául, kettő az Északi-középhegységből, egy pedig a Keszthelyi-hegységből (3. ábra; részletesebb térképek az 1. függelékben)



3. ábra. Az északi-középhegységi (jobbra) valamint a dunántúli (balra) mintaterület(ek) (1: Mályinka, 2: Bélapátfalva, 3: Rezi) elhelyezkedése a bükkösök jelenlegi elterjedéséhez és az Ellenberg-féle klimatikus határérték 1961-1990-es időszakra vett átlagos izovonalaihoz (vörössel) képest. (Adatok forrása: NÉBIH 2014; CARPATCLIM).

Fig. 3. Study sites in the Northern Mts. (left) and Balaton Uplands regions (right) (1: Mályinka, 2: Bélapátfalva, 3: Rezi) in comparison with the present local distribution of beech stands and contours of average state of the Ellenberg climatic limit for beech (red line) for the period of 1961-1990. (Data source: NÉBIH 2014; CARPATCLIM).

Mályinkai mintaterület (továbbiakban Mály): A Bükk-fennsík (Kis-fennsík) kövei alatti bükkös állományok (Mályinka 16/J, 17/A, 17/B) 500 m t.sz.f. magasságban, északias lejtőn, az É.sz. 48°8'24", K.h. 20°32'24" földrajzi koordináták környékén találhatók. Jobbára vegyeskorú, idős bükkösök borítják, csupán egyetlen erdőrészletben található elegyfajként kevés kocsánytalan tölgy (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.). A terület uralkodó talajtípusa a barnaföld (Ramann-féle barna erdőtalaj), melyet néhol az agyagbemosódásos barna erdőtalaj vált fel. (Fotók: 2a. függelék)

Bélapátfalvi mintaterület (továbbiakban Béfa): Az erdőrészlet (Bélapátfalva 52/A) szintén kb. 500 m t.sz.f. magasságban, ÉNy-i lejtésű hegyoldalon helyezkedik el, az É.sz. 48°1'12" és a K.h. 20°21'36" földrajzi köreitől elmet szve. Kocsánytalan tölgyel és gyertyánnal (*Carpinus betulus* L.) elegyes a mályinkainál fiatalabb, egykorú bükkös állomány, mely a bükkös és a gyertyános tölgyes erdőtársulások zonális klímahatárát jelzi. A bükk ugyanakkor az elegyfajokkal szemben mind magasság, mind vastagság tekintetében uralkodó, így az állományviszonyok torzító hatása a bükk növekedésére az elegyesség ellenére sem szükségképpen erősebb az átlagosnál. A talajtípus barnaföld. (Fotók: 2b. függelék)

Mindhárom mintaterület talaj-, lejt- és hidrológiai viszonyai hasonlóak. A talajok vízvisszatartó képessége, ill. a bükkí mintaterületek esetén a meredek völgyek alján található kisebb vízfolyások szerepe a talajnedvesség szinten tartásában igen korlátozott, így elvárhattuk a fák növekedésének a csapadék rövidtávú változékonyságával való erős kapcsolatát.

A mintaterületek éghajlati jellemzését és az évgyűű adatokkal folytatott vizsgálatokat az alábbi rácshálós adatbázisok nyújtotta éghajlati adatokkal, első sorban havi átlaghőmérsékletekkel és csapadékösszegekkel végeztem:

CRU TS3.22 (továbbiakban CRU) (Harris et al. 2013): A CRU éghajlati adatbázisok a nem modellezői célokra talán legelterjedtebben használt globális rácshálós adatbázisok. Ugyanakkor a távoli rácspontok miatt egy-egy cella túl nagy területet fed le a szubgrid viszonyok pontosabb jellemzésére. Az általam használt, $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ -os rácsfelbontású adatbázis 1901-2014 között szolgált havi átlaghőmérsékleti adatokkal.

GPCC V7 analysis (továbbiakban GPCC) (Schneider et al. 2014): A teljes múlt századot lefedő, csapadékadatok mind térbeli, mind időbeli felbontásukban a CRU adatbázishoz hasonlítanak, azonban az interpolációhoz figyelembe vett mérőállomások sűrűsége felülmúlja azt. A GPCC csapadékadatok 1901-2013 között, a CRU-val megegyező cellákra álltak rendelkezésemre.

FORESEE (Dobor et al. 2015): Az adatbázis elsődleges célja a különböző éghajlatváltozási hatástanulmányok meteorológiai adatokkal való kiszolgálása. Ennek értelmében a múltbeli adatok mellett 10 különböző regionális éghajlati modell által A1B scenárió mellett realizált jövőre vonatkozó napi csapadékösszegek, minimum- és maximumhőmérsékleti adatsor érhető el a Kárpát-medence tágabb környezetére $1/6^\circ \times 1/6^\circ$ -os rácssűrűséggel, egészen 2100-ig. A 10 elérhető modellezett adatsor közül az átlagközeli eredményeket adó REMO-ECHAM5 modellpáros szimulálta adatokat használtam a mintaterületek egy lehetséges, lokális jövőbeli éghajlatváltozási scenárióját bemutatandó.

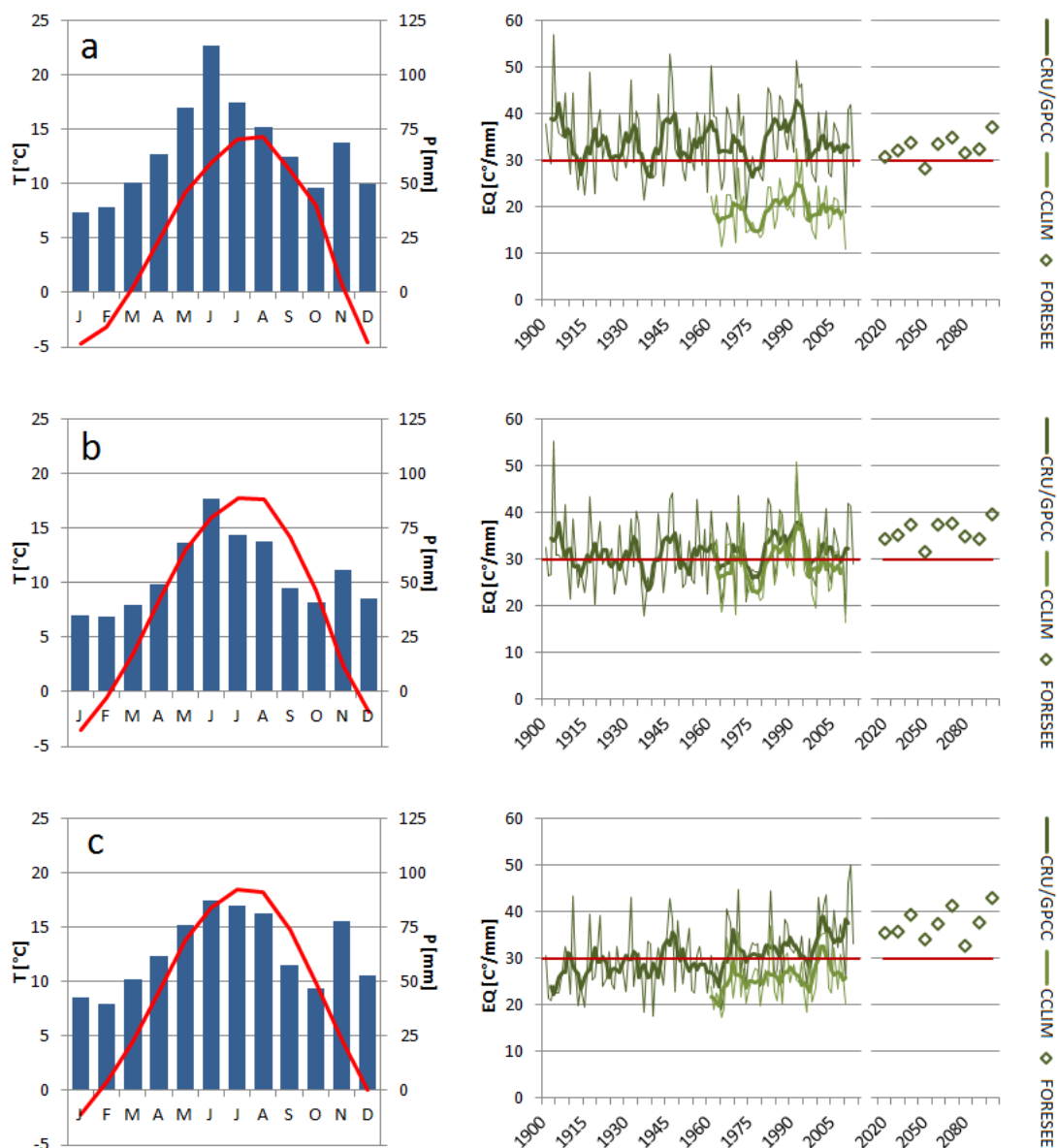
A mintaterületek éghajlati jellemzése során felmerült különböző aszály- és klímaindexek használata is. A vegetáció és így a fák életét ugyanis a hőmérséklet és csapadékviszonyok együttesen befolyásolják, ráadásul a két állapothatározó alakulása meteorológiai szempontból sem független. Az aszály a klimatológia igen változatos szempontok szerint, sokféle módon számszerűsített fogalma, aminek használata sokszor elsődlegesen az agrometeorológiához (beleértve az erdészeti meteorológiát) köthető (pl. Dunkel 2009). A dolgozatban igyekeztem olyan indexeket használni, melyek egyrészt viszonylag egyszerűen számíthatóak, másrészt használatosak az erdészeti-klimatológiai szakirodalomban többek között a bükkal kapcsolatban, eredményeimet ezáltal más kutatásokkal összevethetővé téve. Így esett választásom mindenekelőtt a júliusi középhőmérséklet és az éves csapadékösszeg hányadosából (1000-es szorzóval) származtatott, a dolgozat során már számos alkalommal említett Ellenberg-hányadosra (EQ) (Ellenberg 1988). Emellett a hazai erdészeti gyakorlat számára fejlesztett, a vegetációs időszak havi csapadék- és hőmérsékletadatainak kombinációjából számolt FAI erdei aszályindexet is figyelembe vettem mintaterületek jellemzése során (Führer et al. 2011a).

Az Ellenberg-index széleskörű használata és a FAI precíz, valóban a növekedés szempontjából fontos időszakot jellemző volta ellenére a későbbiekben e két jelzőszám használata mégis első sorban csak a mintaterületek jellemzésére szorítkozik. Tekintve, hogy az elemzések egyik legfőbb célja a pontos éghajlat–növekedés kapcsolatok feltárása volt, a rögzített indexek helyett az éghajlati adatok független, havi értékeken alapuló használata előnyösebbnek bizonyult (vö. Garamszegi és Kern 2014).

4.3. A mintaterületek éghajlati jellemzése a bükk szempontjából

A szakirodalmi áttekintésnek megfelelően a bükk, mint jó klímajelző és klímfüggő fafaj számára kedvező klimatikus körülményeket, mégha az éles határok meghúzását fenntartásokkal kezelve is, de viszonylag jól definiálhatjuk különböző éghajlati mutatók segítségével. Ennek megfelelően mind a leginkább elterjedt Ellenberg-hányadoshoz ($EQ < 30$), mind a FAI indexhez ($FAI < 4,75$) megadhatjuk a „bükkös klíma” határértékeit. A 4. ábrán a mintaterületek éghajlati diagramjai (1961-1990) mellett az Ellenberg-féle index alakulását láthatjuk a feltüntetett $EQ=30$ határértékhez viszonyítva.

A grafikonok tanúsága szerint mindhárom mintaterületen az EQ átlagos értékei a bükkös határ közelében ingadoztak, mind a CRU/GPCC, mind a CCLIM adatok alapján, amelyek egyébként meglehetősen jól követik egymást. A mályinkai mintaterületen észlelt számottevő különbség annak köszönhető, hogy a nagyobb területi felbontásból adódóan a klimatikus elemek magasságfüggését jobban figyelembe vevő CCLIM adatbázis a Bükk-fennsík legmagasabban fekvő rácspontjához sorolja azt. A csupán 500 méter magasán fekvő állomány klimatikus viszonyai azonban ennél minden bizonnyal melegebbek. A CRU/GPCC adatokra illesztett lineáris regressziós egyenesek a Mály, Béfa és Rezi területek esetén rendre 0,001, 0,028 és 0,451 R^2 értékek mellett mutatnak növekvő tendenciát a múlt század során. Ez alapján levonhatjuk a következtetést, hogy a bükk szempontjából a klimatikus viszonyok leggyorsabb ütemű romlása a rezi állomány esetén következett be a 20. század korai szakaszának kedvező viszonyai ellenére. A belpátfalvi terület mindkét adatbázis szerint a teljes múlt század során a szárazsági határon helyezkedett el, a mályinkai területhez hasonlóan az Ellenberg-hányados átlagainak szignifikánsabb trendje nélkül.



4. ábra. A mályinkai (a), a bélapátfalvi (b) és a rezi (c) mintaterületek éghajlati jellemzése. Mintaterületi klímadiagramok az 1961-1990-es CARPATCLIM standard klimatológiák alapján; az Ellenberg-index 5 éves mozgóátlagának múltbeli alakulása CRU/GPCC (1901-2013) és CARPATCLIM (1961-2010) adatokból számítva, valamint a jövőre vonatkozó évtizedes projekciók A1B szcenárió mellett (REMO-ECHAM5; FORESEE). A grafikonokon vörössel a bükkös klíma alsó határát jelző Ellenberg-féle klimatikus határérték látható.

Fig. 4. Climate characteristics for Mályinka (a), Bélapátfalva (b) and Rezi (c) study areas. Climate diagrams are based on CARPATCLIM 1961-1990 standard climatology. 5-year moving averages of past Ellenberg quotient values calculated from CRU/GPCC (1901-2013) and CARPATCLIM (1961-1990) datasets and future projections of decadal means with A1B scenario are shown on right-hand side graphs (REMO-ECHAM5; FORESEE). The Ellenberg climatic limit for beech is indicated on the graphs (red horizontal line).

A globális klímaváltozáshoz kapcsolódóan a 21. századra (Kelet-)Közép-Európa és a Kárpát-medence területére globális és leskálázott, regionális modelleredmények egyaránt az éves középhőmérsékletek további növekedését, relatív szárazodást, valamint az általános tendenciához hasonlóan az éghajlati szélsőségek gyakoribbá válását vetítik előre (IPCC 2007a, IPCC 2013; Bartholy et al. 2007). Az éves csapadék tekintetében a jelzett változások ugyan kevésbé szignifikánsak és sokszor előjelük is bizonytalan, ennek ellenére a csapadékoság éven belüli átrendeződése és a felmelegedés következtében fellépő fokozott párolgás miatt az aszályos időszakok gyakorisága és intenzitása jelentősen növekedhet (Bartholy et al. 2013). A FORESEE adatbázis A1B scenárióval vett projekciói alapján a 4. ábra mellett az 1. táblázat nyújt összehasonlítást lokálisan, az egyes mintaterületekre várható jövőbeni változásokról néhány, ökológiai szempontból (is) fontosnak ítélt éghajlati állapothatározó segítségével, az 1961-1990-es standard klimatológiai időszakhoz viszonyítva.

1. táblázat. A mintaterületekre vonatkozó választott éghajlati mutatók 21.századra várt alakulása (A1B, REMO-ECHAM5; FORESEE) az 1961-'90-es időszak értékeihez képest (CCLIM).

Table 1. Changes in selected climate variables for the 21th century over the study areas (A1B, REMO-ECHAM5; FORESEE) compared to the standard period of 1961-1990 (CARPATCLIM).

	1961-1990			2021-2050			2071-2100		
	Mály	Béfa	Rezi	Mály	Béfa	Rezi	Mály	Béfa	Rezi
P(ann)	780	643	759	646	591	618	659	615	649
P(MJ)	198	157	163	146	130	143	122	114	132
T(Jan)	-4,8	-3,5	-2,2	-2,2	-1,9	-0,1	1,5	1,6	3,5
T(Jul)	14,1	17,7	18,5	19,3	19,4	21,3	21,8	21,8	23,9
EQ	18,8	28,7	25,1	31,4	34,5	37,7	34,1	36,6	38,5
FAI	3,17	4,78	4,42	5,64	6,40	6,67	7,49	8,23	8,55

5. Évgyűrű adatok és feldolgozásuk

5.1. Mintavételezés és mérés

Mindhárom mintaállomány esetén, annak kiemelkedő, (ko)domináns bükkfái közül rendszeres fakitermelés során gyűjtött, közel mellmagasságból származó hét-hét korong állt a rendelkezésemre. A mályinkai, bélapátfalvi és rezi bükkfákat rendre 2014/2015 telén és 2012, illetve 2014 késő őszen döntötték ki. A mályinkaiak közül 4 korong a többinél régebből (2009/2010-ből), más kutatási projektből származott (Janovics et al. 2011). Ezeknek eleve, a már korábban lemerített évgyűrű-adatsorához jutottam hozzá.

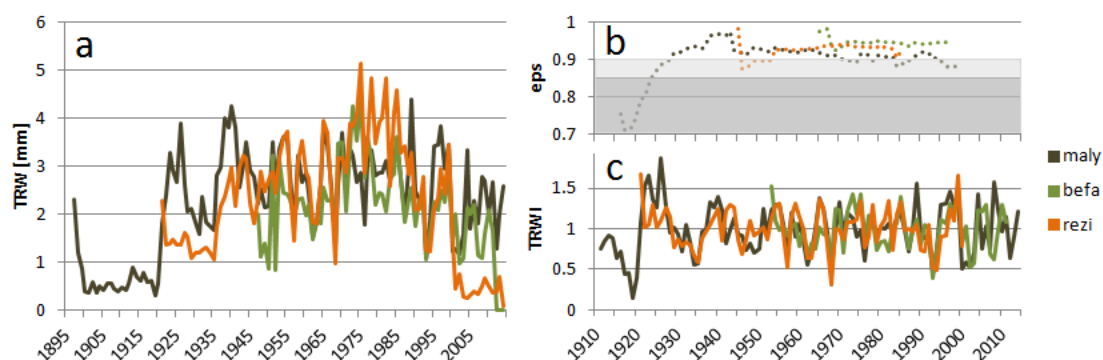
A minták feldolgozását és a hibás adatok kiszűrését standard dendrokronológiai módszerek szerint végeztem (Stokes és Smiley 1968, Majer 1972, Holmes 1983). A korongokat az Eötvös Loránd Tudományegyetem Őslénytani Tanszékén található Budapest Tree-Ring Laboratory laborkörülményei között vizsgáltam (Kázmér és Grynaeus 2003). Az évgűrűszélességeket Rinntech TSAP-Win 4.67 szoftver segítségével, LINTAB mérőasztalon, 2-2 sugár mentén, századmilliméteres pontossággal rögzítettem.

A nyers kronológiák különböző hosszúságú időszakokat fedtek le. A mályinkai fák együttesen az 1897-2014, a belpátfalvaiak az 1947-2011, a reziek pedig az 1921-2014 közötti évekről adták „tanúbizonyosságukat” (5a. ábra). A rezi mintákról a mérések során kiderült, hogy mindegyiküket drasztikusan érintette a korai 2000-es évek aszályait követő lokális bükk-pusztulás. A fák jelentős része a kitermelés előtti, akár 5-6 év során már nem növesztett mikroszkóp alatt felismerhető évgűrűket, vagy éppen burjánzó, a gombakárosítóktól elszíneződött szövetű növedéket rakott magára. A rezi méréseket így a továbbiakban csak 2000-ig tekintettem, ami ugyan majdnem másfél évtizeddel rövidítette meg az adatsort, de a mintaterületek egységes interpretációjához ez a lépés mégis elkerülhetetlen volt.

5.2. Adatfeldolgozás és statisztikai eszközök

Az évgűrűk növekedésében a klimatikus hatások mellett jelentős szerepet játszanak az állomány- és egyéb környezeti viszonyok (vö. 2.1. és 3.4. fejezetek), illetve ezeken felül is minden fa esetén jelentős biológiai növekedési trend érvényesül, aminek minél pontosabb kiszűrése és ezzel a „klímaszignál” felerősítése a célravezető környezeti vizsgálatok fontos alapfeltétele. A nyers mérésekben meglévő nem éghajlati vonatkozású trend(ek), valamint az esetleges autokorreláció kiszűrése és ezáltal az adatsorok dendrokronológiai értelemben vett standardizációja kiemelkedő feladat a vizsgálatok hatékonysága érdekében (Cook et al. 1990, Cook és Peters 1997). Az említett biológiai trend kiszűrésére ún. növekedési görbéket alkalmazhatunk. A nyers adatokra való rátekintés alapján a bükk esetén a vastagsági növekedés becslésére olyan függvényeket kell választanunk, amelyek képesek akár többszörös „harang-alak” felvételére. Ez a meglátás egyben az elméletileg várt növekedésmenettel is összhangban van (Gencsi és Vancsura 1992). Korábbi munkánk során többféle, széles körben használt növekedési függvénnyel és ígéretes standardizációs eljárással próbálkoztunk, de a különböző módon származtatott adatsorok nem mutattak vizsgálati céljaink szempontjából szignifikáns eltérést (Garamszegi és Kern 2014).

A több, hasonló eredményt adó módszer közül végül a legrugalmasabb nemparaméteres regressziós módszert választottam, 30 éves sávszélesség mellett illesztett lokális harmadfokú polinomokkal. Ennek a módszernek volt a vártnak megfelelően a legerősebb simító hatása, és így ez fogta meg leginkább a számomra érdekes évről évre történő rövidtávú változékonyságot (Cook és Peters 1981, Garamszegi és Kern 2014). Az adatfeldolgozást ARSTAN 4.1b (Cook és Crusic 2006) évgyűrű-statisztikai szoftverrel végeztem. A program segítségével a hosszúság dimenziójú évgyűrűszélességek és a (mintánként és mérési sugaranként) illesztett növekedési görbék hányadosaként ún. index-adatsorokat származtattam. A fák éves növekedése öregedésükkel nem csak csökken, de egyre kevésbé ingadozóvá is válik, részben emiatt, részben a különböző egyedek eltérő viselkedése miatt csak a fenti standardizációs eljárás után várható el a kapott idősorok egyenletes szórása (Cook et al. 1990, Osborn et al. 1997). A programmal ezen túlmenően elvégeztettünk az esetlegesen az adatokban megmaradt autokorreláció kiszűrésére egy további vizsgálatot, ám az Akaike-féle kritériumok nem indokolták, hogy a standardizált adatsorokat autoregresszív folyamatként értelmezzük, igazolva ezzel a bükk növekedésének korábbi ismert tulajdonságát (van der Werf et al. 2007).



5. ábra. A nyers mérési adatokból kapott évgyűrű-kronológiák (a) és az elemzésekhez használt index adatsorok (c). A végső kronológiákba bevont évek kiválasztását és minták állománybeli reprezentativitásának ellenőrzését segítő eps statisztika alakulása 30 éves mozgóablak mellett, az általános 0,85 és a szigorúbb 0,9 elfogadási határok figyelembevételével (b).

Fig. 5. Mean TRW chronologies of the raw measurements (a) and the subsequently used derived index chronologies (c). Expressed population signal (eps) statistics with 30-year running windows were used for evaluation of the analyzed samples. Traditional 0.85 and more rigorous 0.90 critical levels were considered for site-representativeness (b).

Az elemzések megkezdése előtt a korlátozott mintaelemszám területi reprezentativitását az eps („expressed population signal”; Wigley et al. 1984) statisztikával ellenőrizhettük (5b. ábra). Az eps értékeket és a szélső évekre egyes mintaterületek esetén sok esetben nagyon kevés korongra korlátozódó, lecsökkent mintaszámot figyelembe véve az évgyűrű adatsorokat

a továbbiakban az alábbi terjedelmükben (és rövidítéseikkel) használtam: Mályinka (maly) 1911-2014, Belpátfalva (befa) 1953-2011, Rezi (rezi) 1921-2000 (5c. ábra). Ezekre az időszakokra az eps statisztika javarészt 0,9-0,95 között ingadozó, de mindenütt 0,85 feletti értéke alapján a kronológiák a mintaterületekre reprezentánsnak, stabil kronológiáknak tekinthetők (Mérian et al. 2013). Az évgűrűket szabályos körvgűrűkként közelítve, az évgűrűszélességekből a TSAP program segítségével származtathattam a fák mellmagassági (körlap)területi növedékének adatsorát is. Az átlagos körlapi növedékek, magasabb dimenziójú változók lévén más jellegű következtetések levonására voltak alkalmasak (lásd 6.2. fejezet).

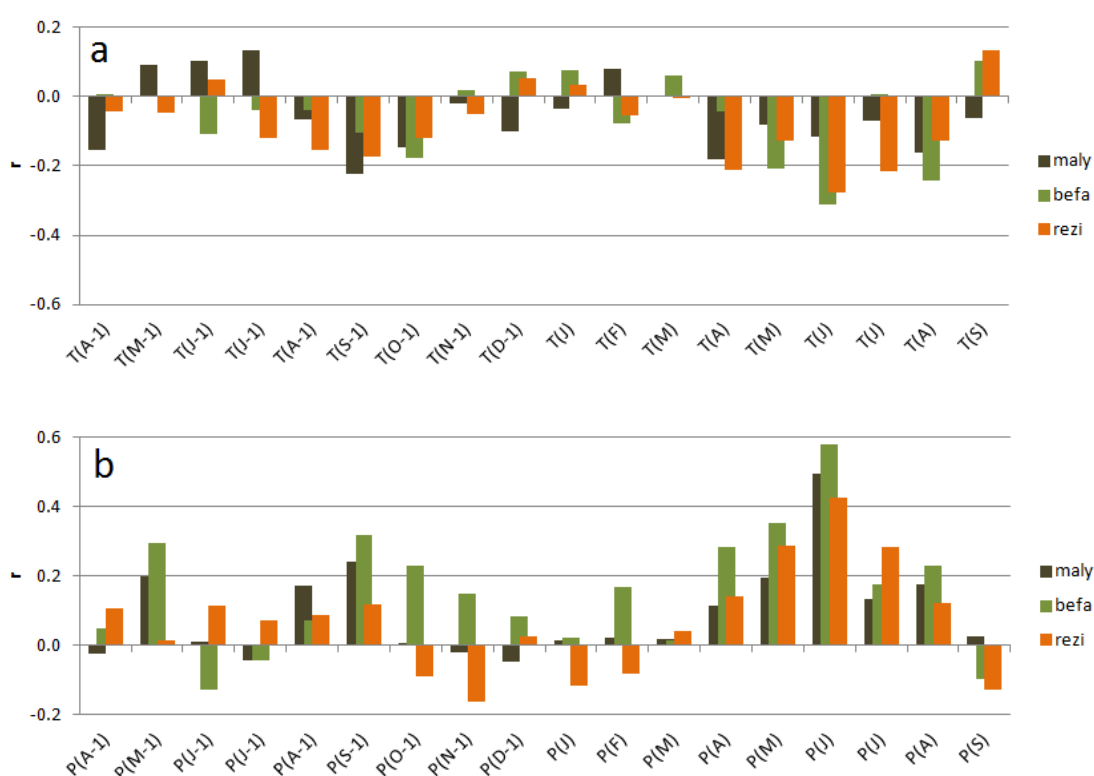
A vizsgálatok alapját egy viszonylag egyszerű és bevett statisztikai eszköz, a (Pearson-féle) korrelációanalízis adta. Az éves növekedésnek a havi klímaadatokkal vett kapcsolatát kutattam, a korrelációs együtthatókat minden esetben a statisztikában bevett szignifikancia-vizsgálatnak alávetve. Lévén mind a klíma, mind az erdő változó rendszer, a teljes idősorra végzett korrelációanalízisnél sokszor célravezetőbb és beszédesebb a korrelációs kapcsolatokban bekövetkező változások kimutatása. Ez a szemlélet egyre inkább bevett rutinnak számít a dendrokronológiában, dendroklimatológiában is, különösen az olyan változékony növekedésű fajok esetén, mint amilyen a bükk is (pl. Beck et al. 2013, Garamszegi és Kern 2014, Tegel et al. 2014). Az éghajlat éves növekedésre gyakorolt hatásának (esetleges) változásait munkám során 30 éves (mozgó) ablakok mellett vizsgáltam.

A Pearson-féle korrelációanalízis egyszerűsége és hatékonysága ellenére számos hibaforrást és félreértelmezési lehetőséget hord magában. A prediktor adatok halmazában sok esetben meglévő összefüggések miatt olyan változók között is szignifikáns kapcsolatot mutathatunk ki, amelyek nyilvánvalóan nem valós relációkon alapulnak (pl. egy tűz oltásában résztvevő tűzoltók száma és a bekövetkezett anyagi kár nagysága). A havi klímaadatok között is jelentős keresztkorrelációk állhatnak fent, csakúgy az egymást követő hónapok hőmérséklete, csapadékossága, mint ugyanannak a hónapnak az átlaghőmérséklete és csapadékösszege között. Az ebből fakadó pontatlanságokat kiszűrendő és az éghajlat-növekedés felvázolt kapcsolatrendszerét finomítandó, az alapkorrelációk alapján kijelölt fontosabb hónapok esetén további, ún. parciális korrelációanalízist végeztem el. A parciális korrelációk a különböző (prediktor) változók közötti keresztkorrelációkat figyelembe véve kiszűrik a fennálló, jelen esetben az éghajlati/időjárási kontinuum véges havi adatokba „darabolásából” fakadó kusza összefüggések befolyását a kapott eredményekre (pl. Kleinbaum et al. 1988).

6. Eredmények: a növekedés és az éghajlat kapcsolata

6.1. Évgyűrűszélességek

Az alapvető növekedés–éghajlat kapcsolatok feltárására, bár alapvetően a tárgyév vegetációs időszakának időjárásával várható a legerősebb korreláció, az előző év hónapjait is be szokás vonni a kezdeti vizsgálati intervallumba (pl. Di Filippo et al. 2007; Kern és Popa 2007; Tegel et al. 2014). Az egyes mintaterületek évgyűrű-adatsoraival a teljes vizsgálati időszakra kapott korrelációs együtthatók a 6. ábrán láthatóak.



6. ábra. Éghajlat-növekedés „alapkorrrelációk” az előző év vegetációs időszakának kezdetétől (előző év áprilisától) a tárgyév szeptemberéig, CRU hőmérsékletadatok (a) és GPCC csapadékatatok (b) alapján, a meghatározott indexsorok teljes hosszára.

Fig. 6. Climate-growth correlations for the entire study periods (1911-2014 for maly, 1953-2011 for befa, 1921-2000 for rezi series) with CRU mean temperature (a) and GPCC precipitation (b) data from previous April to current September.

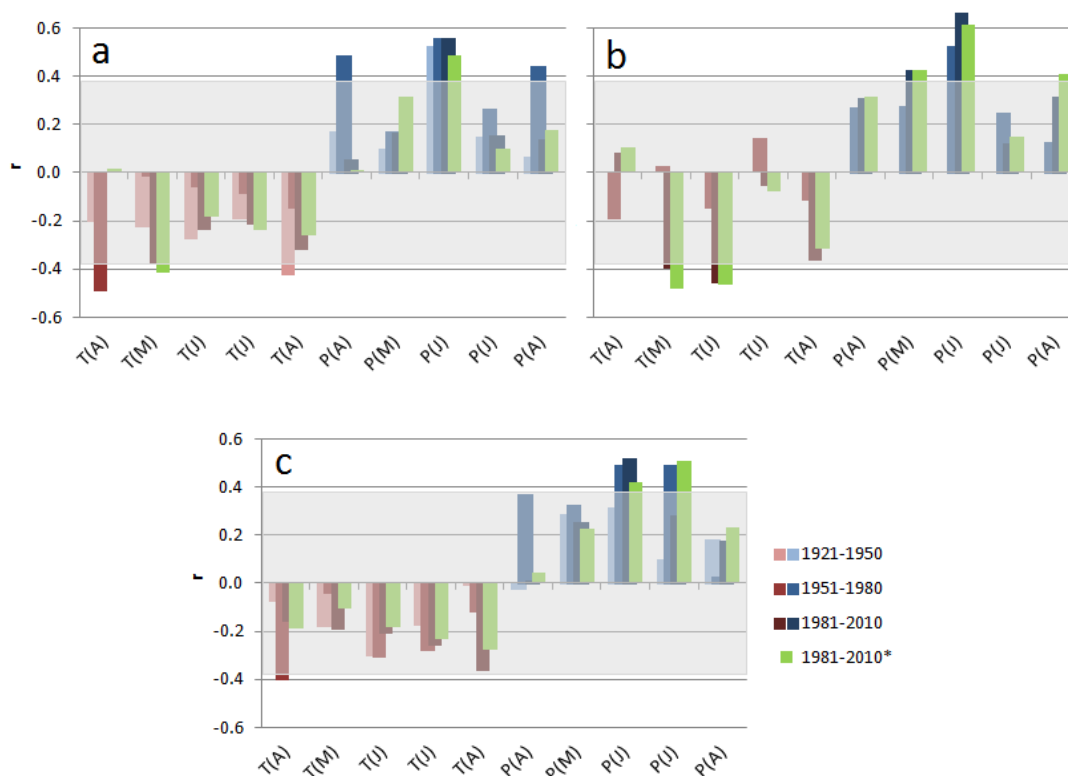
A diagramokról jól látszik, hogy a csapadék, azon belül is első sorban a növekedési év kora nyarának csapadékossága mutatja mindhárom bükkös növekedésére gyakorolt legerősebb kontrollt (Ellenberg 1988, Geßler et al. 2007, van der Werf et al. 2007). Emellett az azonos hónapok középhőmérsékletei is jelentős negatív korrelációt mutatnak az éves növekménnyel

(6. ábra), amit a hőmérséklet aszályosságban betöltött szerepe magyarázhat (Čufar et al. 2008a, Čufar et al. 2008b). A korrelációs együtthatók nagysága és az általuk kijelölt időszakok is hasonlóak az összes mintaterület esetében, ugyanakkor az éves növekedés erős éghajlati determináltsága mégis a legfiatalabb belpátfalvi állomány esetén a legszembetűnőbb. Itt az április, május, június havi csapadék növekedést befolyásoló fő szerepe megkérdőjelezhetetlen, az áprilisi csapadékösszeggel kapott erős korreláció egyben a vegetációs időszak másik két területnél korábbi kezdetét jelezheti. Ugyancsak ez a bükkös mutatta a legszignifikánsabb negatív kapcsolatot május-június és augusztus hőmérsékletével is, bizonyítva az állomány teljes vizsgálati időszak alatt klimatikus határhelyzetben való fekvését. Július hónap időjárásának a rezi bükkösre gyakorolt, átlagosnál erősebb befolyása a dunántúli állomány egyedi karakterjegyének tűnik. A növekedési év késő tavasza, nyara mellett a növekedés jól megfigyelhető összefüggést mutatott az előző év őszeének időjárásával is (vö. Čufar et al. 2008a).

A 6. ábra és korábbi tapasztalatok alapján a további vizsgálatokat a tárgyév áprilisától augusztusáig terjedő időszakra, mint a növekedés szempontjából legfontosabb időszakra szűkítettem, noha az általánosan alkalmazott $p < 0,05$ -ös szignifikanciaszintet nem minden hónap és éghajlati mutató esetén haladták meg a korrelációs együtthatók. Az éghajlatváltozás következtében változó, szárazodó állományklíma mellett (4. ábra) ésszerűnek tűnt, hogy a növekedés-éghajlat kapcsolatokat részidőszakonként vizsgáljam, ezáltal mutatva ki a kapcsolatok erősségének és minőségének változásait, egyben közös szignifikanciavizsgálat mellett összehasonlíthatóvá téve a különböző mintaterületek növekedési viszonyait is. A legtöbb hónap esetén az éves növekedéssel való korreláltság, ha különböző mértékben is, de nőtt a múlt század során a vizsgált 30 éves időszakok mellett (7. ábra).

A kapcsolat különösen szignifikáns erősödése volt megfigyelhető a Béfa bükkös növekedése és a májusi, júniusi, valamint augusztusi középhőmérsékletek között, miközben júliusi hőmérséklet szerepe végig elenyésző volt. Az idősebb mályinkai és rezi állományok esetén mind a hőmérséklet, mind a csapadékoság terén április hónap befolyásának rendkívüli megugrása volt megfigyelhető az 1951 és 1980 közötti időszak során, azonban az együtthatók nagysága jelentősen visszaesett a múlt század végére. Szintén látványos a júliusi csapadék szerepének erősödése a rezi bükkös növekedésére nézve. Az utolsó 1981-2010-es időszakra a hosszabb CRU/GPCC adatsorokkal összehasonlíthattam a pontosabb CARPATCLIM adatokkal kapott korrelációkat is. A különböző felbontású éghajlati adatbázisok használata a 3.2. fejezetben írtaknak megfelelően nem mutatott igazán szignifikáns különbséget az esetek többségében. Kivételt képez ezalól a mályinkai bükkösök növekedésének áprilisi és augusztusi csapadékkal vett korrelációja. A rövid, 30 éves részvizsgálatok miatt a $p < 0,05$ kritérium meglehetősen magas

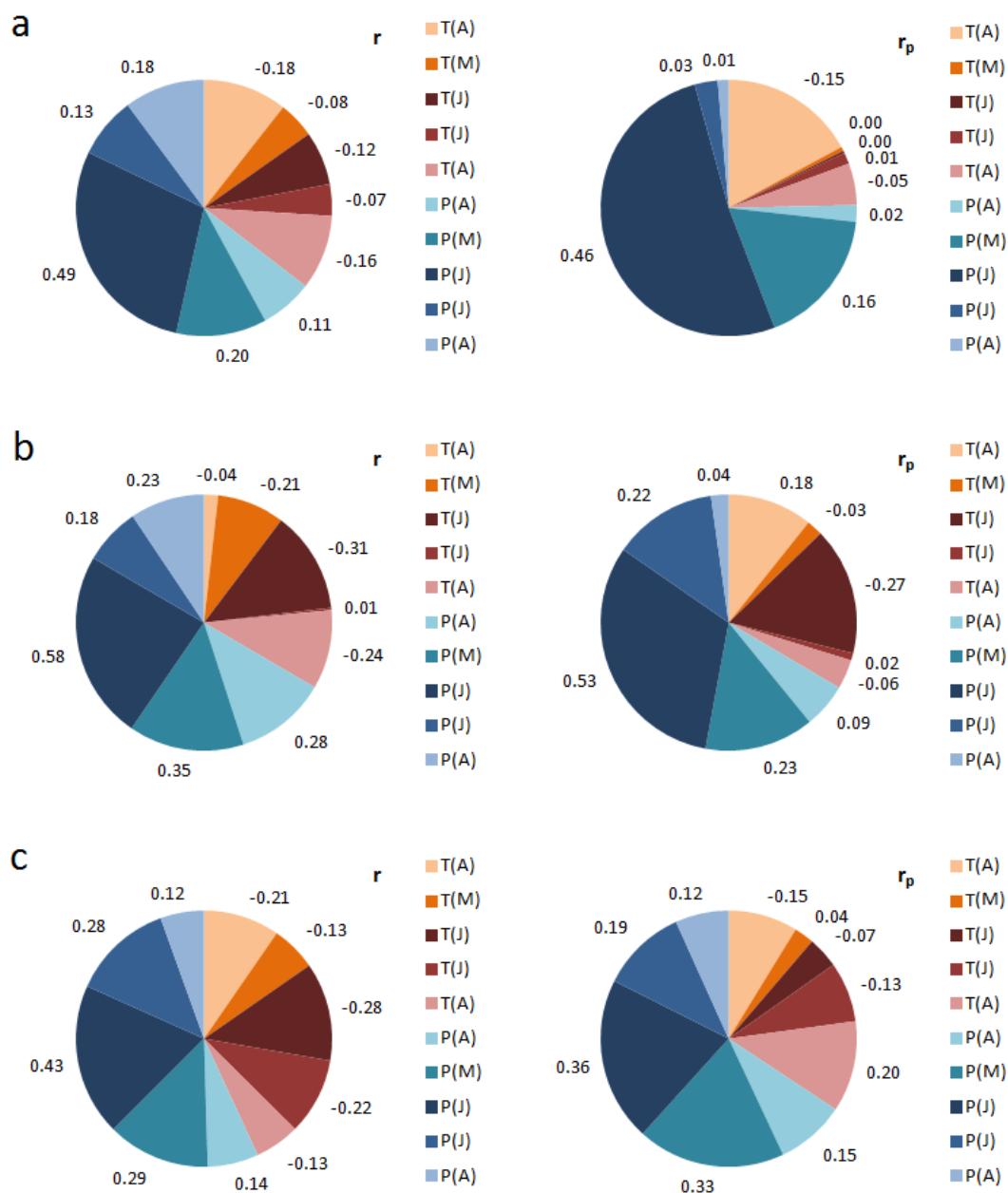
elvárásokat támasztott a korrelációs kapcsolatok szignifikanciájával szemben, ennek ellenére elmondható, hogy a szűkített vizsgálatokba bevont hónapok közül több esetben is kimutatható volt az időjárás növekedésre gyakorolt jelentős (és erősödő) hatása.



7. ábra. A főbb növekedési hónapokra kapott éghajlati korreláció változása a három magyarországi bükkös állományban (a: maly, b: befa, c: rezi), különböző időszakok esetén. A szürke sávon túlnyúló oszlopdiagramok jelölik a szignifikáns kapcsolatot ($p < 0,05$). Az 1980-2010 időszakra a CRU/GPCC mellett összehasonlításul a CARPATCLIM (*) adatokkal való értékek is fel vannak tüntetve. (Az 1951-1980, illetve az 1981-2010 időszakok a befa és rezi adatsorok esetén értelemszerűen rövidebbek.)

Fig. 7. Changes of climate-growth correlation for selected months and periods for the three Hungarian beech stands (a: maly, b: befa, c: rezi). Gray shading indicates the $p < 0.05$ significance level. For the latter 1980-2010 period the higher resolution CARPATCLIM (*) data were used by comparison to the CRU/GPCC data. (Periods of 1951-1980 and 1981-2010 mean 1953-1980 and 1981-2000 for befa and rezi, respectively, limiting therefore the representativeness of the significance level in this two cases.)

A különböző hónapok, időszakok egymástól független, pontosabb szerepének megértéséhez kördiagramokon ábrázoltam a (Pearson-féle) korrelációs együtthatók és a parciális korrelációs együtthatók teljes időszakra (abszolútértékben) vett relatív nagyságát (8. ábra).

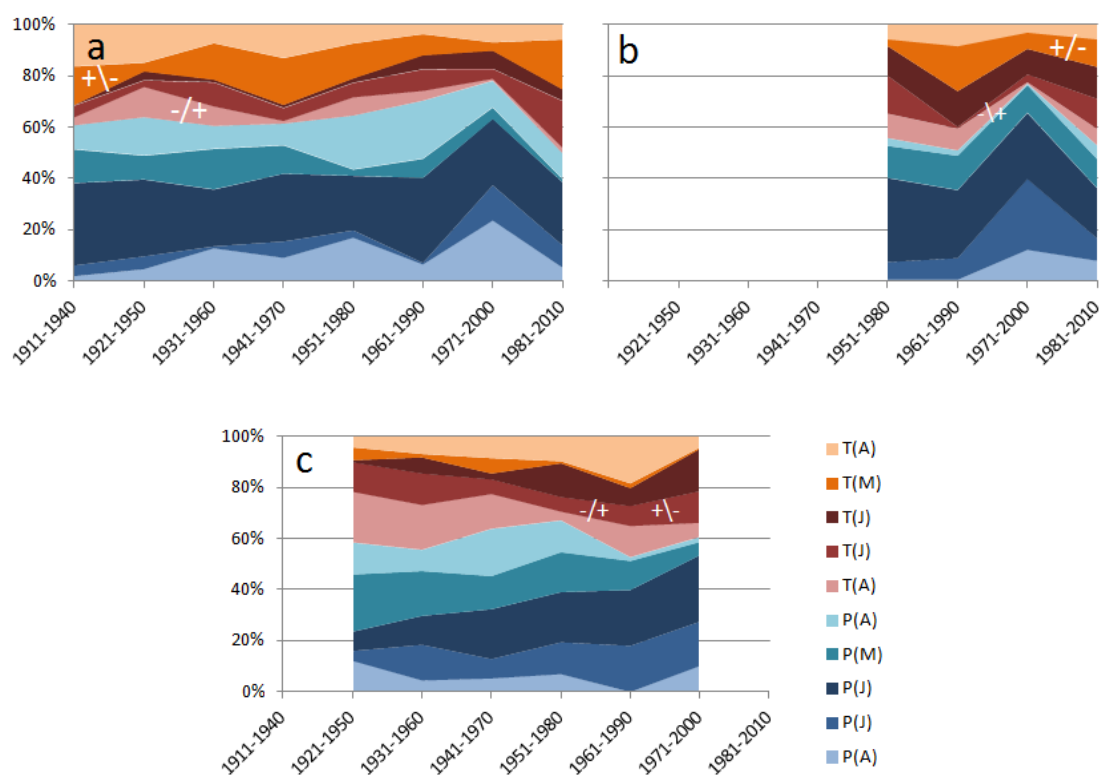


8. ábra. A teljes adatsorokra kapott korrelációs (bal oldal) és parciális korrelációs (jobb oldal) kapcsolatok erősségének relatív megoszlása kördiagramokon ábrázolva, a főbb növekedési hónapok hőmérséklet- és csapadékadatainak figyelembevételével a három magyarországi bükkös állományban (a: maly, b: befa, c: rezi; klímaadatok: CRU/GPCC).

Fig. 8. Pie charts represent the relative magnitudes and the differences between Pearson (left hand side) and partial (right hand side) correlation coefficients among selected months' mean temperature and rainfall data with the entire TRW index series of the three Hungarian beech stands (a: maly, b: befa, c: rezi; climate data: CRU/GPCC).

Az új vizsgálati módszer alkalmazása jelentős különbségeket eredményezett. Különösen a júniusi (és májusi) csapadékoság fokozott jelentősége nyert megerősítést, de árnyalódott a hőmérséklet szerepéről alkotott kép is. Első sorban az áprilisi középhőmérséklet szerepe bontakozott ki, érdekes módon az idősebb mályinkai és rezi bükkösök esetén negatív, míg a fiatalabb belpátfalvi állomány esetén inkább növekedésserkentő vonatkozásban.

A parciális korrelációk segítségével szintén 30 éves időszakokra, 10 éves eltolással vizsgáltam az egyes hónapok és éghajlati változók növekedésre gyakorolt relatív szerepét (9. ábra). (A 100%-ig halmozott, relatív nagyságot mutató diagramok jól illusztrálják az egyes hónapok szerepének változásait, ugyanakkor nem mutatja a (hónaponkénti) abszolút klímfüggést és így nem alkalmas a kapcsolatok erősödésének kimutatására sem.)



9. ábra. Az éves növekedés és az éghajlat kapcsolatának változásai a 30 éves időszakokra, 10 éves lépésközzel vett parciális korrelációs együtthatók abszolútértékeinek relatív nagysága alapján a három magyarországi bükkös állományban (a: maly, b: befa, c: rezi; klímaadatok: CRU/GPCC). A jelentősebb előjelváltások +/-, illetve -/+ jelekkel vannak feltüntetve.

Fig. 9. Periodic changes of climate-growth relationships represented by the relative magnitude of partial correlation coefficients in absolute values with 30-year time-windows and 10-year overlap for the three Hungarian beech stands (a: maly, b: befa, c: rezi; climate data: CRU/GPCC). Major changes in signs are marked with +/- and -/+ symbols.

Látható, hogy az egyes hónapok szerepe erősen ingadozó volt az időszak során, a hőmérséklet növekedésre gyakorolt hatása számos esetben előjelet is váltott (9. ábra). Amellett, hogy a csapadékösszegekkel vett együttthatók (különösen június esetén) végig igen erősek és végig pozitívak voltak, látványos a nyári melegek korlátozó hatásának utolsó időszakra (1981-2010) vett megerősödése. A csapadék korlátozó szerepe az ezt megelőző 30 éves ciklusban volt a legerősebb. A korrelációs kapcsolatok változásai mintaterületenként is jelentősen különböznek egymástól. Az bükk-hegységi állományok esetén augusztus hónap csapadékosságának szerepe egyértelműen felértékelődött a fák élete során. A rezi állomány növekedésére nézve ugyanez júliusról mondható el, ami viszont a másik két mintaterület esetén a növekedés egyik legingadozóbb és legkevésbé szignifikáns prediktora volt. A tavaszi csapadék szerepének erősödése (7. ábra) a többi hónappal való relatív összehasonlításban már nem számottevő, sőt mindhárom mintaterület esetén enyhébb vagy látványosabb csökkenésbe hajlik.

Az éghajlati viszonyokkal való összehasonlítás mellett vizsgálhatjuk az egyes mintaterületek növekedése között fennálló kapcsolatokat is (2. táblázat). Az éves növekmények az állományok közötti távolság ellenére erősen korreláltak voltak, és a különböző időszakokra elvégzett összehasonlítások értelmében a kapcsolat erősödött is az elmúlt évtizedek során. Érdekes eredmény, hogy az öregebb, hasonló korú mályinkai és rezi bükkös állományok növekedése a közöttük lévő jelentős távolság ellenére is szorosabb összefüggést mutatott, az egymáshoz jóval közelebbi élőhelyről származó maly és befa idősorokénál.

2. táblázat. A mintaterületek évgyűű index-adatsorai között fennálló keresztkorrelációk különböző időszakokra. A relatíve magas együttthatók a bükkösök éves növedék-ingadozásainak jelentős korreláltságára utalnak az ország területén, távolságtól függetlenül. A szürkével írt értékek nem a teljes 30 éves időszakra vonatkoznak az adatsorok hossza miatt.

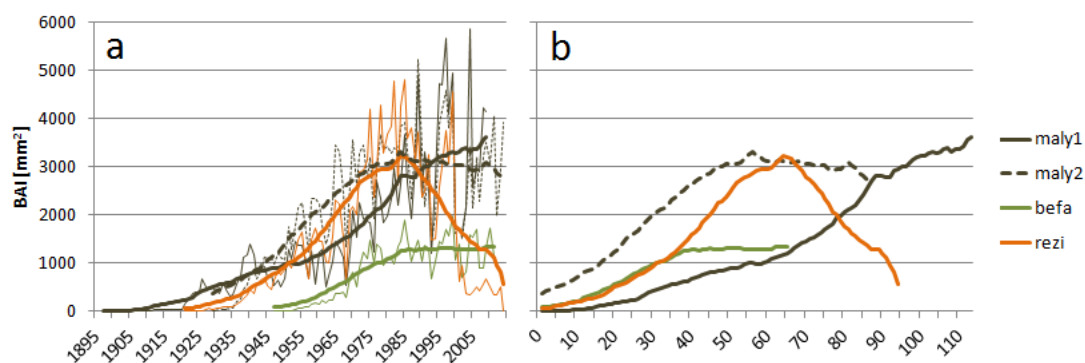
Table 2. Cross correlations between TRW index series of each sample plot for selected periods. The relatively high coefficients indicate a strong correlativity among the increment variability of the selected beech forests, even when being further from each other. The grey values are not estimated from the entire 30-year periods due to limited series length.

	1953-2000	1921-1950	1951-1980	1981-2010
maly befa	0,65		0,53	0,56
maly rezi	0,72	0,45	0,78	0,65
befa rezi	0,61		0,56	0,67

6.2. Körlapi növedékek

A mellmagassági körlapnövedékek számítása és használata magasabb dimenziójuk révén az évgűrűszélességeknél jobban közelítik az erdőállományok fatömegének gyarapodását, így alkalmazásuk hagyományosan a művelés alá vont erdők növedék- és gazdasági hozamának meghatározásában játszott fontos szerepet (pl. Király 1964, Kállay 1965). Ezen tulajdonságuk a környezeti változásoknak és az erdők azokra adott válaszainak monitoringjára is rendkívül alkalmassá teszi őket, egyben a gyakorlatban is jobban alkalmazható következtetések levonására adva lehetőséget (pl. Jump et al. 2006a, Gillner et al. 2013). A körgyűrűk területszámítására használt képlet értelmében az egymásra rakódó évgűrűk a fatörzs középpontjából vont sugár folytonos növekedése miatt még a fa öregedésével fokozatosan csökkenő évgűrűszélességek mellett is folyamatosan növeked(het)nek. A körlapnövedékek gyarapodásának lassulása és/vagy csökkenése optimális körülmények között csak az adott fa élete vége felé közeledve áll csak be (Gillner et al. 2013).

A 10. ábrán a dolgozatban vizsgált mintaterületekre vonatkozó körlapi növekedési görbék, illetve azok mozgóátlaggal simított menete látható, egyrészt kronologikus skálán, másrészt az állományok korához viszonyítva. A mályinkai bükkösökből származó kétszeri mintagyűjtés különböző korú fáit külön-külön vizsgáltam, hiszen célom az egy állományból való, közel azonos korú fák teljes növekedéstörténetének vizsgálata volt, a nagyobb mintaelemszámot igénylő, pontosabb évközi változások figyelmen kívül hagyásával.



10. ábra. Az átlagos körlapi növedékek alakulása mintaterületenként kronologikusan (a) és a növekedési kezdőponttól számítva (b), 30 éves mozgóátlaggal simítva. A növedék-görbék kulminációja 2000-es évek eleji aszályok alatt és azokat követően a szakirodalom alapján egy esetleges bükk-pusztulást vetíthetnek előre a mintaterületekre.

Fig. 10. Mean basal area increments, plotted chronologically (a) and starting from the “growth origo” (b), smoothed with 30-year moving average. Culmination of curves and low relative growth rates during and after the early 2000s droughts might indicate a future beech decline for the sample sites, suggested by some scientific literature.

Amellett, hogy az éves növekmények nagysága a fák öregedésével egyre ingadozóbbá vált a múlt század végére mindhárom mintaterületre, az állományok korától függetlenül a növekedés lassulása volt megfigyelhető. A rezi bükkfák növekedési üteme nem csak lassult, de az 1980-as évektől drasztikus csökkenést mutatott, jóval megelőzve ezzel az állomány 2000-es évek elejére tehető pusztulását, de még az 1990-es évek eleji száraz éveket is. Az ezredfordulót követő kedvezőtlen évek, ha nem is szembetűnő, de kisebb visszaesést eredményezve mindegyik bükkös növekedésgörbéjében nyomott hagytak. A növekedés 20. sz. végi lassulása a vizsgált mintaállományok történetében gyakorlatilag precedens nélküli, egyedül az öregebb maly1 adatsorban figyelhető meg egy sikeresen átvészelt, korábbi, 20. század közepi visszaesés.

7. Diskusszió

A korrelációanalízis eredményei mindhárom területre igazolták a hazai bükkösök éves növekedésének erősödő klimatikus befolyásoltságát (pl. Csóka et al. 2009, Garamszegi és Kern 2014, Führer et al. 2015). Megfigyelhető ugyankor az is, hogy az erősödő éghajlati kényszer térbeli, időbeli, illetve éven belüli eloszlása egyaránt igen változatos. Ez egyben a vizsgált állományokra is igazolhatja a bükk magas fenológiai plaszticitását (pl. Prislan et al. 2013). A fő növekedési időszaknak kétségkívül a szakirodalomban említett május-június hónapok felelnek meg (Lebourgeois et al. 2005, van der Werf et al. 2007, Čufar et al. 2008a), amit a parciális korrelációs vizsgálatok is alátámasztottak. Felismerhetőek voltak a vegetációs időszak melegebb tavaszok miatti, korábbi kezdetének jelei (vö. pl. Čufar et al. 2012, Prislan et al. 2013), ám a kambiális aktivitás korábbi kezdeténél mégis jóval látványosabb az éves növekedés elhúzódása, kitolódása (vö. van der Werf et al. 2006, Jezík et al. 2011, Garamszegi és Kern 2014, Tegel et al. 2014, Führer et al. 2015). Utóbbit a rezi bükkös esetén a júliusi csapadékösszeggel kapott erősödő korreláció, a bükki mintaterületek esetén pedig az augusztusi csapadék és hőmérséklet kritikus szerepe jelez. Az éves növekedés július hónap időjárásától, első sorban annak hőmérsékletétől való nagyfokú függetlenedése, amiben egy kialakuló aszálytolerancia, a gyakoribbá váló aszályokhoz való alkalmazkodás jelei ismerhetők fel (Dittmar et al. 2003, Tegel et al. 2014), első sorban a múlt század során végig xérikus helyzetben lévő béalápátfalvi állomány esetén számottevő (Garamszegi és Kern 2014).

Az egyes hónapok szerepének egy szűk évszázad alatt is jelentős tér- és időbeli változékonysága és a vegetációs időszak gyors átrendeződései egyben felvethetik a kérdést, hogy a rögzített éghajlati változókból származtatott klímaindexek mennyire reprezentatívak az erdők jellemzése és a bükk elterjedési határainak kijelölése szempontjából. A fenti érvekkel szembeállítható az

erdők állapotának erősödő általános éghajlati befolyásoltsága és ezzel párhuzamosan a különböző élőhelyeken található állományok növekedésének fokozódó szinkronizáltsága (Latte et al. 2015), mely részben a vizsgált mintaterületekre is igazolást nyert. A klímaindexek használata és az élőhelyek pusztán éghajlati szempontú osztályozása tehát sok szempontból igen előnyös és akár egyre hatékonyabb lehet, azonban a különböző időszakok különböző meteorológiai állapothatározóinak megfelelő súlyozása és azok szerepének időnkénti felülbírálata, valamint a már meglévő indexek használatának célja és korlátainak szem előtt tartása fokozott körültekintést igényelnek (Dunkel 2009, Führer et al. 2011a).

A fentiekől drámaibb következtetések vonhatóak le a körlapi növekedési görbék menetének értékeléséből. Az összes vizsgált bükkös állomány esetén, kortól és élőhelytől függetlenül a területalapi növekedés lassulása volt megfigyelhető, a spanyol elterjedési határhoz hasonlóan már az 1970-es évek végétől kezdődően (Jump et al. 2006a). A növekedés lassulásáról számoltak be az általam vizsgált állományok mellett a csapadékosabb éghajlatú Soproni-hegységből is (Führer et al. 2015). A feltételezett xerikus határt nagyjából az '70-es évekre átlépő Reziből származó fák esetén a növekedési üteme hamar erőteljes csökkenésbe váltott át, ami előre vetíthette az állomány rohamos gyengülését és a fák később bekövetkezett pusztulását (vö. Gillner et al. 2013). A növekedés múlt század végi lassulása a vizsgált bükkösök élete során ugyan valóban példa nélküli, azonban a rezihez hasonló mértékű csökkenés a másik két állomány esetén nem következett be. Némi reményre adhat okot a legidősebb, maly1 adatsorban megfigyelhető 20. század közepi kisebb visszaesés, amelyet az akkor a vizsgált bélapátfalvihoz hasonló korú állomány sikeresen átvészelt. Az itt leírtak tükrében érdekes tény, hogy a szintén déli elterjedési határhoz tartozó balkáni bükkösök esetén a növekedésnek éppen a múlt század végére felgyorsult ütemét figyelték meg (Tegel et al. 2014).

Az eredmények interpretációjuktól függetlenül alátámasztják a környezeti változások erdőkre, köztük a bükkösökre gyakorolt hatását, igazolva ezzel a különböző kutatások fontosságát és létjogosultságát. Ennek ellenére is szem előtt kell tartanunk, hogy valós és érdemi következtéseket csak a különböző kutatási eredmények együttes értékelésével vonhatunk le (Bolte 2005, Geßler et al. 2007). Nagy bizonyossággal állítható, hogy a változások erélye és sebessége messze túlmutat a pusztán tudományos érdekeltségen, szükség van tehát a tudományos eredményeknek a gyakorlat számára is jól hasznosítható közzétételére, hogy a félígazságok és bizonytalanságok félretolmácsolását elkerülve, *valódi* támogatást jelenthessenek a *megfelelő* gazdasági és természetvédelmi döntések meghozatalához (Mátyás 2015).

8. Összefoglalás

Az erdei ökoszisztémák a szárazföldi vegetáció meghatározó alapkövét jelentik. Számos más funkciójuk – pl. a biológiai sokféleség fenntartása vagy akár a gazdasági és egyéb közjóléti, emberi vonatkozások – mellett, a bioszféra részeként különböző fizikai, kémiai és biológiai folyamatokon keresztül szabályozzák saját környezetüket, beleértve a (globális) éghajlatot is. Emiatt az erdők szerepe a klímaváltozás hatásainak mérséklésében és a szélsőségek enyhítésében igen jelentős, noha az esetleges pozitív visszacsatolások sem zárhatóak ki. Ahogy azonban maga az éghajlat, úgy az ökoszisztémák sem statikus rendszerek, a környezettel kölcsönhatásban, a változásoknak maguk is érzékeny szenvedő alanyai. Napjainkra a direkt emberi bolygatás mellett a klímaváltozás nőtte ki magát az élőhelyek legmeghatározóbb és egyben legdinamikusabban változó tényezőjévé. A vegetációs zónák eltolódása és az erdők szerkezeti és fajösszetételbeli átrendeződése jelenleg is zajló, és a jövőben fokozottan várható következmény, miközben az egyes társulások és fafajok alkalmazkodási és migrációs képességei jelentősen különbözhetnek egymástól.

Regionális/lokális skálán európai és hazai erdeink is fontos éghajlat-szabályozó és egyben jelentős gazdasági potenciállal bírnak. A környezeti változások negatív hatásai azonban ugyanúgy éreztetik hatásukat, mint nagyobb léptékben. A Kárpát-medence melegedése, a szárazodás és a gyakoribbá váló szélsőséges időjárási helyzetek különösen érzékenyen érinthetik a kiegyensúlyozottabb éghajlatot kedvelő erdőtársulásainkat. A bükkösök nem csak a hazai, de az európai szakirodalomban is kiemelt figyelmet kapnak a klímaváltozás miatt számos térségben kedvezőtlenebbé váló éghajlati viszonyok miatt. Dolgozatomban három magyarországi (két északi-középhegységi és egy dunántúli) bükkös állomány növekedésének az elmúlt 60-100 év éghajlati változékonyságára adott válaszát vizsgáltam dendrokronológiai módszerek segítségével. A vizsgált éghajlati mutatók alapján elmondható, hogy mindhárom mintaterület a bükk számára optimális klimatikus viszonyok határa közelében ingadozott a teljes múlt század során. A klimatikus körülmények szignifikáns romlásáról egyedül a dunántúli, keszthelyi-hegységi állomány esetén beszélhetünk. A különböző korú állományokból, fákból vett évgűrű minták az elmúlt 60-100 év felgyorsult klímaváltozásának időszakát fedték le.

A vizsgálatok alapját különböző időszakokra vett hagyományos (Pearson-féle) és parciális korrelációanalízis adta. A korrelációanalízis eredményei mindhárom területre igazolták a hazai bükkösök éves növekedésének erősödő klimatikus befolyásoltságát. Megfigyelhető ugyanakkor az is, hogy az erősödő éghajlati kényszer térbeli, időbeli, illetve éven belüli eloszlása egyaránt igen változatos volt, melyet alátámaszthat a bükk korábról ismert,

magas fenológiai plaszticitása. Felismerhetőek voltak a vegetációs időszak melegebb tavaszok miatti, korábbi kezdetének jelei, ám ennél is látványosabb az éves növekedés elhúzódása, kitolódása. Az éves növekedés július hónap időjárásától, első sorban annak hőmérsékletétől való nagyfokú függetlenedése, amiben a gyakoribbá váló aszályokhoz való alkalmazkodás jelei ismerhetőek fel, első sorban a múlt század során végig xérikus helyzetben lévő bélapátfalvi állomány esetén számottevő.

A mellmagassági körlapnövedékek használata magasabb dimenziójuk révén az évgűrű-szélességeknél jobban közelítik az erdőállományok fatömegének gyarapodását, alkalmassá téve őket a gyakorlatban is jobban alkalmazható következtetések levonására. Az összes vizsgált magyarországi bükkös állomány esetén, kortól és élőhelytől függetlenül a területalapi növekedés lassulása volt megfigyelhető az elmúlt évtizedek során. A feltételezett xérikus határt nagyjából az 1970-es évekre átlépő dunántúli mintaterületről származó fák esetén a növekedési üteme hamar erőteljes csökkenésbe váltott át, ami az állomány rohamos gyengülését és a fák később bekövetkezett pusztulását vetíthette előre. A növekedés múlt század végi lassulása a vizsgált bükkösök élete során ugyan valóban példa nélküli, azonban a dunántúlihoz hasonló mértékű csökkenés a másik két állomány esetén nem következett be.

Az eredmények interpretációjuktól függetlenül alátámasztják a környezeti változások erdőkre, köztük a bükkösökre gyakorolt hatását, igazolva ezzel a különböző kutatások fontosságát és létjogosultságát. Nagy bizonyossággal állítható, hogy a változások erélye és sebessége messze túlmutat a pusztán tudományos érdekeltségen, szükség van tehát a tudományos eredményeknek a gyakorlat számára is jól hasznosítható közzétételére, hogy a féligazságok és bizonytalanságok félretolmácsolását elkerülve, valódi támogatást jelenthessenek a megfelelő gazdasági és természetvédelmi döntések meghozatalához.

Summary and Discussion

Dendroclimatological assessment of selected Hungarian beech forests

Among various other ecosystems services, forests serve an emphasized role in regulating their own environment and habitat factors, including the (global) climate (Bonan 2008). Considering this and the highlighted sustainable (green) economical and other social relations of them, forests do and can play a key role in the mitigation and adaptation of human induced climate change (e.g. Gálos et al. 2012; IPCC 2014; Stanturf et al. 2015; UNFCCC 2015). On the other hand forests are not – just like the climate itself – static systems, but under continuous change tightly interacting with their environment (e.g. Meier et al. 2012, Maiorano et al. 2013). Therefore, changing climatic (i.e. environmental) conditions are currently one of the most severe threats and limiting factors, first of all to forests at marginal places of their distribution and/or with reduced ecological functionality (e.g. Mátyás 2010). This threat also implies several feedbacks to mitigation, adaptation and economic potential lying in them (e.g. Bonan 2008; Hanewinkel et al. 2012).

In the anthropogenically heavily affected forests of Europe, the present and forecasted distribution changes of beech (*Fagus sylvatica* L.) due to climate change generated xeric limit shifting is one of the greatest debates of the interdisciplinary forestry science. Being the beech one of the most dominant tree species across forest stands of the continent (Fig. 1), a possible mass decline could cause significant ecological changes (Geßler et al. 2007, Mátyás et al. 2010). Although the decline has been already shown at the southern edge of distribution (Jump et al. 2006a; Peñuelas et al. 2007), the topic has (recently) gained remarkable attention after a multiannual drought period of the early 2000s that affected major part of Europe (Czajkowski et al. 2005; van der Werf et al. 2007; Mátyás et al. 2010; Fotelli et al. 2009; Jezík et al. 2011). The huge variety of different studies also implies different conclusions and opinions about the future and adaptability of beech (e.g. Sabaté et al. 2002; Dittmar et al. 2003; Jump et al. 2006b; van der Werf et al. 2007; Mátyás et al. 2009; Kramer et al. 2010; Stojnić et al. 2010; Czúcz et al. 2011; van der Maaten 2012; Robson et al. 2013; Stojanović et al. 2013; Tegel et al. 2014; Latte et al. 2015; Saltré et al. 2015).

Dendrochronological (or more precisely dendroclimatological) methods are among the wide range of research tools to track the effects of changing habitat conditions on extratropical tree species. In case of beech these methods can be particularly useful due to the announced high

variability of tree-ring widths connected to climatic variations (Dittmar et al. 2003; Lebourgeois et al. 2005). To contribute to the on-going discussions growth response to climatic conditions of three Hungarian (mixed) beech stands were investigated in the thesis work (Fig. 3; Annexes), each of them situated near the xeric edge of their distribution during the last century (Fig. 3; Fig. 4; Ellenberg 1988). Although the realized changes in environmental conditions varies site to site even within the relatively small and integrated region represented by Hungary (Fig. 4; Table 1), tree-ring series covered the past 60-100 years of accelerated climatic change (Fig. 5).

As a main basis of the investigations Pearson and partial correlation analysis were carried out between tree-ring width (TRW) indices and site representative climate data on a monthly basis and for several (30-year) periods to recover climate-growth relations and also to track any potential shifts in them (Fig. 6; Fig. 7; Fig. 8.; Fig. 9). Likely connected to unfavorable (trends of) climatic conditions, a significant increase in climate impact on growth has been detected as also described by several other studies (Fig. 7; e.g. Csóka et al. 2009; Jump et al. 2010; Mátyás et al. 2010; Führer et al. 2015).

Growth-climate correlations with 30-year windows revealed that strengthening climate impact was not uniform among the study stands and for the considered months and climate elements, rooting probably in the high intra-specific phenological plasticity of beech (Fig. 7; Fig. 9; Prislan et al. 2013). The found tendencies probably indicate an earlier beginning of the vegetation season (e.g. Čufar et al. 2012; Prislan et al. 2013), however, a wider share of delayed intra-annual increment formation and later growing season end is even more remarkable (van der Werf et al. 2006; Jezík et al. 2011; Tegel et al. 2014; Garamszegi and Kern 2014; Führer et al. 2015). Appearance of a second growing peak after midsummer (July) slowdown (that can be considered as a short-term response and physiological adaptation to drought) seems to play a significant role first of all in case of the stand that developed under the most consistently xeric conditions during the past century (Dittmar et al. 2003; Jezík et al. 2011; Tegel et al. 2014; Garamszegi and Kern 2014).

The differentiating role of growing months between different sites also raises the question whether drought indices are useful for accurate projection of the distribution of beech. On the other hand increasing growth synchronization between different sites (Table 2; Latte et al. 2015), and increasing climate impact on growth in general can confirm them. It is difficult though to find the appropriate weight on monthly climate elements to derive a proper drought quotient (Führer et al. 2011a). Use of more flexible indices and revision of the widely used ones may lead to better understanding of the climatic limitation of beech distribution.

More dramatic conclusions can be made through evaluating the course of basal area increments (BAI) which can be easily derived from TRW measurements. They are better approximators of real (volume) increment and so of the vitality, competitiveness and mortality of forest stands (e.g. Jump et al. 2006a; Gillner et al. 2013; Das and Stephenson 2015; Führer et al. 2015). Each three of the studied Hungarian beech stand showed a clear slowdown in BAI growth rates for the latter decades of the 20th century, regardless of age and site conditions (Fig. 10; cf. Jump et al. 2006a; Führer et al. 2015). Beech trees from the Balaton region, those were affected by the drought induced mortality event of early 2000s (Molnár and Lakatos 2009), showed a significant growth decline beyond the mentioned slowdown that could be a predicting sign of mortality tracking back decades earlier than the outbreak of the fatal drought period (Gillner et al. 2013). Neither of the other two stands from Northern Hungary have undergone a BAI setback comparable to that one.

Independently of any interpretation, the results gave an evidence of climate change impact on beech (forests) and highlight the importance and relevancy of any research work dealing with the topic. However, it must be emphasized that any findings should be considered only in a broader context of related (interdisciplinary) works and data and through reviewing diverse scientific literature. That should be the way forward to communicate scientific findings to stakeholders and support any economical and/or conservational decisions (Bolte 2005; Geßler et al. 2007; Mátyás 2015).

Köszönetnyilvánítás/Acknowledgements

Köszönöm témavezetőim munkáját és szakmai útmutatását. Első sorban Kern Zoltán tanácsai, de Matyasovszky István statisztikai tudása nélkül sem születhetett volna meg a jelen diplomamunka. Hálásan köszönöm egykori témavezetőmnek, Kázmér Miklósnak, valamint Árvai Mátyásnak és az ELTE Őslénytani Tanszéken található Évgyűrű Laboratóriumnak a minták vizsgálatához szükséges eszköz- és tudásbeli háttér biztosítását. Köszönöm Dobor Laurának és Barcza Zoltánnak az éghajlati adatok terén való értékes tapasztalataik megosztását és a FORESEE adatbázishoz való hozzáférést. Hálás vagyok Pieczka Ildikónak és általában az ELTE Meteorológiai Tanszéknek a mesterképzés évein átívelő folytonos támogatásért.

A bükk minták beszerzését és néha kalandos logisztikájának lebonyolítását Rosta Katalinnak és édesapámnak, Garamszegi Istvánnak, valamint az Egererdő Zrt. Egri, az Északerdő Zrt. Mályinkai Erdészetiének, Palcsu Lászlónak (MTA ATOMKI) és a Bakonyerdő Zrt. Bakonybéli, Pápai és Keszthelyi Erdészeteinek köszönhetem, noha a dolgozat során sajnos végül nem sikerült az összes mintaterület feldolgozása. Köszönöm Csóka Györgynek az ERTI állapotfelméréseinek frissebb adatait, Wisnovszky Károlynak és a NÉBIH munkatársainak a bükk elterjedési térképét, valamint Horváth Ferenc és az MTA Ökológiai Kutató Intézet szíves támogatását.

Köszönöm nagyapámnak, Varga Bélának és édesapámnak azt a tudományos hivatkozásokban nem mérhető tudást és ismeretanyagot, amiben az Erdőről alkotott képem és a hozzá való kötődésem gyökeredzik. Hálás vagyok családomnak szakadatlan támogatásukért és a dolgozat megírásához szükséges nyugodt légkör megteremtéséért. Köszönöm Huszár Kristófnak a szakirodalom felkutatásában, valamint öcsémnek, Garamszegi Péternek és Csomós Patriknak a térképek szerezésében nyújtott segítségét.

I gratefully acknowledge the possibility of attending that many interesting lectures at the University of Vienna and at the BOKU University of Life Sciences during my Erasmus semester, those broadened my horizons remarkably. Special thanks to Dr. Stefano Serafin for his kind help and overwork with the WRF downscaling simulation. Many thanks to the kind colleagues during my unforgettable months of internship at the IUFRO Headquarters and to the community of “Pyrker College” in Vienna, who witnessed and motivated the first steps of writing. And at last but not least thanks to all those wonderful friends, students and young scientists/professionals from all over the world I have met and inspired by a lot during the past two years.

Irodalom

- Bartholy J., Gelybó Gy., Pongrácz R. (2007). Regional climate change expected in Hungary for 2071-2100. *Applied Ecology and Environmental Research* 5: 1-17.
- Bartholy J., Pongrácz R., Hollósi B. (2013). Analysis of projected drought hazards for Hungary. *Advances in Geosciences* 35: 61-66.
- Beck W., Sanders T. G., Pofahl U. (2013). CLIMTREG: detecting temporal changes in climate – growth reactions – a computer program using intra-annual daily and yearly moving time intervals of variable width. *Dendrochronologia* 31: 232-241.
- Bílek L., Remeš J., Podrázský V., Rozenberger D., Diaci J., Zahradník D. (2014). Gap regeneration in near-natural European beech forest stands in Central Bohemia – the role of heterogeneity and micro-habitat factors. *Dendrobiology* 71: 59-71.
- Bolte A. (2005). Zur Zukunft der Buche in Mitteleuropa. *AFZ-Der Wald* 20: 1077-1078.
- Bolte A., Czajkowski T., Kompa T. (2007). The north-eastern distribution range of European beech – a review. *Forestry* 80: 413-429.
- Bonan G. B. (2008). Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science* 320: 1444-1449.
- Cailleret M., Bigler C., Bugmann H., Davi H., Minunno F., Peltoniemi M., Martínez-Vilalta J. (2015). Towards a common methodology to simulate tree mortality based on ring-width data. (poszter). *Geophysical Research Abstracts* Vol. 17, EGU General Assembly 2015, Bécs, 2015. április 12-17.
- Capdevielle-Vargas R., Estrella N., Menzel A. (2015). Multiple-year assessment of phenological plasticity within a beech (*Fagus sylvatica* L.) stand in southern Germany. *Agricultural and Forest Meteorology* 211: 13-22.
- Chakraborty T., Saha S., Reif A. (2014). European beech trees have developed an adaptive strategy of survival through crown die-back under stress of drought and plant competition. (poszter). XXIV IUFRO World Congress. Salt Lake City, USA, 2014. október 5-11.
- 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., Briffa K., Shiyatov S., Mazepa V. (1990). Tree-ring standardization and growth-trend estimation. *Methods of Dendrochronology. Applications in the Environmental Sciences* (szerk. Cook E., Kairiukstis L.). Kluwer Academic Publishers
- Cook E. R., Peters K. (1997). Calculating unbiased tree-ring indices for the study of climatic and environmental change. *The Holocene* 7: 361-370.
- Čufar K., Prislán P., de Luis M., Gričar J. (2008a). Tree-ring variation, wood formation and phenology of beech (*Fagus sylvatica*) from a representative site in Slovenia, SE Central Europe. *Trees* 22: 749-758.
- Čufar K., De Luis M., Horvat E., Prislán P. (2008b). Main patterns of variability in beech tree-ring chronologies from different sites in Slovenia and their relation to climate. *Zbornik gozdarstva in lesarstva* 87: 123-134.
- Čufar K., De Luis M., Saz M. A., Črepinšek Z., Kajfež-Bogataj L. (2012). Temporal shifts in leaf phenology of beech (*Fagus sylvatica*) depend on elevation. *Trees* 26: 1091-1100.
- Czajkowski T., Kühling M., Bolte A. (2005). Einfluss der Sommertrockenheit im Jahre 2003 auf das Wachstum von Naturverjüngungen der Buche (*Fagus sylvatica* L.) im nordöstlichen Mitteleuropa. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 176: 133-143.
- Czajkowski T., Bolte A. (2006). Unterschiedliche Reaktion deutscher und polnischer Herkünfte der Buche (*Fagus sylvatica* L.) auf Trockenheit. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 177: 30-40.
- Czúcz B., Gálhidy L., Mátyás Cs. (2011). Present and forecasted xeric climatic limits of beech and sessile oak distribution at low altitudes in Central Europe. *Annals of Forest Science* 68: 99-108.
- Csóka Gy., Koltay A., Hirka A., Janik G. (2009). Az aszályosság hatása kocsánytalan tölgyesek és bükkösök egészségi állapotára. „*Klíma-21*” Füzetek 57: 64-73.
- Daly C. (2006). Guidelines for assessing the suitability of spatial climate data sets. *International Journal of Climatology* 26: 707-721.
- Das A. J., Stephenson N. L. (2015). Improving estimates of tree mortality probability using potential growth rate. *Canadian Journal of Forest Research* 45: 920-928.

- Di Filippo A., Biondi F., Čufar K., De Luis M., Grabner M., Maugeri M., Saba E. P., Schirone B., Piovesan G. (2007). Bioclimatology of beech (*Fagus sylvatica* L.) in the Eastern Alps: spatial and altitudinal climatic signals identified through a tree-ring network. *Journal of Biogeography* 34: 1873-1892.
- Di Filippo A., Pederson N., Baliva M., Brunetti M., Dinella A., Kitamura K., Knapp H. D., Schirone B., Piovesan G. (2015). The longevity of broadleaf deciduous trees in Northern Hemisphere temperate forests: insights from tree-ring series. *Frontiers in Ecology and Evolution* 3: 46.
- Dittmar C., Zech W., Elling W. (2003). Growth variations of common beech (*Fagus sylvatica* L.) under different climatic and environmental conditions in Europe – a dendroecological study. *Forest Ecology and Management* 173: 63-78.
- Dobor L., Barcza Z., Hlásny T., Havasi Á., Horváth F., Ittész P., Bartholy J. (2015). Bridging the gap between climate models and impact studies: the FORESEE Database. *Geoscience Data Journal* 2: 1-11.
- Dunkel Z. (2009). Brief surveying and discussing of drought indices used in agricultural meteorology. *Időjárás* 113: 23-37.
- Ellenberg H. (1988). Vegetation ecology of Central Europe. Cambridge University Press
- EUFORGEN (2009). Distribution map of Beech (*Fagus sylvatica*). www.euforgen.org
- Fang J., Lechowicz M. J. (2006). Climatic limits for the present distribution of beech (*Fagus* L.) species in the world. *Journal of Biogeography* 33: 1804-1819.
- Fotelli M. N., Nahm M., Radoglou K., Rennenberg H., Halyvopoulos G., Matzarakis A. (2009). Seasonal and interannual ecophysiological responses of beech (*Fagus sylvatica*) at its south-eastern distribution limit in Europe. *Forest Ecology and Management* 257: 1157-1164.
- Führer E. (2010). Forestry and climate change. *Climate change and Hungary: mitigation the hazard and preparing for the impacts. The „VAHAVA” Report.* (szerk. Faragó T., Láng I., Csete L.). Budapest
- Führer E., Jagodics A. (2009). A klímajelző fafajú állományok szénkészlete. *„Klíma-21” Füzetek* 57: 43-55.

- Führer E., Horváth L., Jagodics A., Machon A., Szabados I. (2011a). Application of new aridity index in Hungarian forestry practice. *Időjárás* 115: 205-216.
- Führer E., Marosi Gy., Jagodics A., Juhász I. (2011b). A klímaváltozás egy lehetséges hatása az erdőgazdálkodásban. *Erdészettudományi Közlemények* 1: 17-28.
- Führer E., Edelényi M., Horváth L., Jagodics A., Jereb L., Kern Z., Móring A., Szabados I., Pödör Z. (2015). Effect of weather conditions on annual and intra-annual basal area increments of a beech stand in Sopron Mountains in Hungary. *Időjárás* (in press)
- Gálos B., Mátyás Cs., Jacob D. (2011). Regional characteristics of climate change altering effects of afforestation. *Environmental Research Letters* 6: 044010.
- Gálos B., Hänsler A., Kindermann G., Rechid D., Sieck K., Jacob D. (2012). The role of forests in mitigating climate change – a case study for Europe. *Acta Silv. et Lign. Hung.* 8: 87-102.
- Garamszegi B., Kern Z. (2014). Climate influence on radial growth of *Fagus sylvatica* growing near the edge of its distribution in Bükk Mts., Hungary. *Dendrobiology* 72: 93-102.
- Garamszegi B., Kern Z. (2015). A Kékes Erdőrezervátumból származó bükk-korongok dendrokronológiai vizsgálatának eredményeiről. Kézirat, Bécs-Budapest (Erdőrezervátum Program Archívuma, Vácrátót)
- Gencsi L., Vancsura R. (1992). Dendrológia. Mezőgazda Kiadó, Budapest
- Geßler A., Keitel C., Kreuzwieser J., Matyssek R., Seiler W., Rennenberg H. (2007). Potential risks for European beech (*Fagus sylvatica* L.) in a changing climate. *Trees* 21: 1-11.
- Giesecke T., Hickler T., Kunkel T., Sykes M. T., Bradshaw R. H. (2007). Towards an understanding of the Holocene distribution of *Fagus sylvatica* L. *Journal of Biogeography* 34: 118-131.
- Gillner S., Rüger N., Roloff A., Berger U. (2013). Low relative growth rates predict future mortality of common beech (*Fagus sylvatica* L.). *Forest Ecology and M.* 302: 372-378.
- Granata G., Sidoti A. (2004). *Biscogniauxia nummularia*: pathogenic agent of a beech decline. *Forest Pathology* 34: 363-367.
- Hamrick J. L. (2004). Response of forest trees to global environmental changes. *Forest Ecology and Management* 197: 323-335.

- Hanewinkel M., Cullmann D. A., Schelhaas M. J., Nabuurs G. J., Zimmermann N. E. (2013). Climate change may cause severe loss in the economic value of European forest land. *Nature Climate Change*, 3: 203-207.
- Harris I., Jones P. D., Osborn T. J., Lister D. H. (2014). Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3. 10 Dataset. *International Journal of Climatology* 34: 623-642.
- Hill J., Stellmes M., Stoffels J., Buddenbaum H., Werner W., Langshausen J. (2014). An Idea of Things to Come: Using Satellite Observations for Assessing site-Specific Sensitivities of European Beech to Excessive Drought Conditions. (poszter). XXIV IUFRO World Congress. Salt Lake City, USA, 2014. október 5-11.
- Holmes R. L. (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-ring Bulletin* 43: 69-75.
- Horváth F., Borhidi A. (szerk.) (2002) (Bartha D., Bidló A., Borhidi A., Bölöni J., Czájlik P., Esztó P., Forró E., Hahn I., Horváth F., Kovács G., Maglóczky Zs., Mázsza K., Oroszi S., Siller I., Somogyi Z., Standovár T., Temesi G., Traser Gy.). A hazai erdőrezervátum-kutatás célja, stratégiája és módszerei. TermészetBÚVÁR Alapítvány Kiadó, Budapest
- Horváth A., Mátyás Cs. (2014). Növedékcsökkenés előrejelzése egy bükk származási kísérlet alapján. *Erdészettudományi Közlemények* 4: 91-99.
- IPCC (2007a) (Christensen J. H., Hewitson B., Busuioc A., Chen A., Gao X., Held I., Jones R., Kolli R.K., Kwon W-T., Laprise R., Magaña Rueda V., Mearns L., Menéndez C. G., Räisänen J., Rinke A., Sarr A., Whetton P.). Regional Climate Projections. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (szerk. Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K. B., Tignor M., Miller H. L.). Cambridge University Press
- IPCC (2007b) (Nabuurs G. J., Masera O., Andrasko K., Benitez-Ponce P., Boer R., Dutschke M., Elsiddig E., Ford-Robertson J., Frumhoff P., Karjalainen T., Krankina O., Kurz W. A., Matsumoto M., Oyhantcabal W., Ravindranath N. H., Sanz Sanchez M. J., Zhang X.). Forestry. *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (szerk. Metz B., Davidson O. R., Bosch P. R., Dave R., Meyer L. A.). Cambridge University Press

- IPCC (2007c) (Fischlin A., Midgley G. F., Price J. T., Leemans R., Gopal B., Turley C., Rounsevell M. D. A., Dube O. P., Tarazona J., Velichko A. A.). Ecosystems, their properties, goods, and services. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (szerk. Parry M. L., Canziani O. F., Palutikof J. P., van der Linden P. J., Hanson C. E.). Cambridge University Press
- IPCC (2013) (szerk. van Oldenborgh G.J., Collins M., Arblaster J., Christensen J. H., Marotzke J., Power S. B., Rummukainen M., Zhou T.). Annex I: Atlas of Global and Regional Climate Projections. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (szerk. Stocker T. F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S. K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P. M.). Cambridge University Press
- IPCC (2014) (Smith P., Bustamante M., Ahammad H., Clark H., Dong H., Elsiddig E. A., Haberl H., Harper R., House J., Jafari M., Masera O., Mbow C., Ravindranath N. H., Rice C. W., Robledo Abad C., Romanovskaya A., Sperling F., Tubiello F.). Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (szerk. Edenhofer O., Pichs-Madruga R., Sokona Y., Farahani E., Kadner S., Seyboth K., Adler A., Baum I., Brunner S., Eickemeier P., Kriemann B., Savolainen J., Schlömer S., von Stechow C., Zwickel T., Minx J.C.). Cambridge University Press
- Janik G., Koltay A., Hirka A., Csóka Gy. (2012). Long-term health trends in beech stands of Hungary. (előadás). IUFRO WP 7.03.06 and WP 7.03.10 Joint Meeting. Palanga, Litvánia, 2012. szeptember 10-14.
- Janovics R., Bihari Á., Papp L., Palcsu L., Major Z., Sárkány K. E., Bujtás T., Veres M. (2011). A paksi atomerőmű gamma-sugárzó izotóp és trícium kibocsátásnak ellenőrzése folyóvízi és szárazföldi élőlényekben. 7. *Kárpát-medencei Környezettudományi Konferencia* (szerk. Mócsy I. A.). Ábel Kiadó, Kolozsvár
- Ježík M., Blaženec M., Střelcová K., Ditmarová L. (2011). The impact of the 2003-2008 weather variability on intra-annual stem diameter changes of beech trees at a submontane site in central Slovakia. *Dendrochronologia* 29: 227-235.

- Jump A. S., Hunt J. M., Peñuelas J. (2006a). Rapid climate change-related growth decline at the southern range edge of *Fagus sylvatica*. *Global Change Biology* 12: 2163-2174.
- Jump A. S., Hunt J. M., Martínez-Izquierdo J. A., Peñuelas, J. (2006b). Natural selection and climate change: temperature-linked spatial and temporal trends in gene frequency in *Fagus sylvatica*. *Molecular Ecology* 15: 3469-3480.
- Jump A. S., Cavin L., Hunter P. D. (2010). Monitoring and managing responses to climate change at the retreating range edge of forest trees. *Journal of Environmental Monitoring* 12: 1791-1798.
- Kállay Á. (1965). A maximális növedék elérésének problémája. *Az erdő* 14 / *Erdészeti Lapok* 100: 25-23.
- Kázmér M., Grynaeus A. (2003). The Budapest Tree-Ring Laboratory. *Association for Tree-Ring Research, Newsletter* 1: 5-6.
- Kern Z., Popa I. (2007). Climate-growth relationship of tree species from a mixed stand of Apuseni Mts., Romania. *Dendrochronologia* 24: 109-115.
- Király L. (1964). Néhány szó a növedékről. *Az erdő* 13 / *Erdészeti Lapok* 99: 105-107.
- Kleinbaum D. G., Kupper L. L., Muller K. E. (1988). Applied Regression Analysis and Other Multivariable Methods. PWS-KENT Publishing Company, Boston
- Knutzen F., Meier I. C., Leuschner C. (2015). Does reduced precipitation trigger physiological and morphological drought adaptations in European beech (*Fagus sylvatica* L.)? Comparing provenances across a precipitation gradient. *Tree physiology* 00: 1-15.
- Kramer K., Degen B., Buschbom J., Hickler T., Thuiller W., Sykes M. T., de Winter W. (2010). Modelling exploration of the future of European beech (*Fagus sylvatica* L.) under climate change – Range, abundance, genetic diversity and adaptive response. *Forest Ecology and Management* 259: 2213-2222.
- Lakatos F., Molnár M. (2009). Mass mortality of beech (*Fagus sylvatica* L.) in South-West Hungary. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica* 5: 75-82.
- Lakatos M., Szentimrey T., Bihari Z., Szalai S. (2013). Creation of a homogenized climate database for the Carpathian region by applying the MASH procedure and the preliminary analysis of the data. *Időjárás* 117: 143-158.

- Latte N., Lebourgeois F., Claessens H. (2015). Increased tree-growth synchronization of beech (*Fagus sylvatica* L.) in response to climate change in northwestern Europe. *Dendrochronologia* 33: 69-77.
- Lebourgeois F., Bréda N., Ulrich E., Granier A. (2005). Climate-tree-growth relationships of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in the French Permanent Plot Network (RENECOFOR). *Trees* 19: 385-401.
- Lexer M. J., Hönninger K. (2001). A modified 3D-patch model for spatially explicit simulation of vegetation composition in heterogeneous landscapes. *Forest Ecology and Management* 144: 43-65.
- Lookingbill T. R., Urban D. L. (2003). Spatial estimation of air temperature differences for landscape-scale studies in montane environments. *Agricultural and Forest Meteorology* 114: 141-151.
- Magyari E. (2002). Holocene biogeography of *Fagus sylvatica* L. and *Carpinus betulus* L. in the Carpathian-Alpine Region. *Folia Historico-Naturalia Musei Matraensis* 26: 15-35.
- Maiorano L., Cheddadi R., Zimmermann N.E., Pellissier L., Petitpierre B., Pottier J., Singarayer J.S. (2013). Building the niche through time: using 13,000 years of data to predict the effects of climate change on three tree species in Europe. *Global Ecology and Biogeography* 22: 302-317.
- Majer A. (1972). Évgyűrű-kronológia. *Az erdő* 21 / *Erdészeti Lapok* 107: 164-171.
- Mátyás Cs. (2010). Forecasts needed for retreating forests. *Nature* 464: 1271.
- Mátyás Cs. (2015). Az alkalmazkodó erdőművelés támogatása. *Erdészeti Lapok* 150: 102-104.
- Mátyás Cs., Božič G., Gömöry D., Ivanković M., Rasztoivits E. (2009). Transfer analysis of provenance trials reveals macroclimatic adaptedness of European beech (*Fagus sylvatica* L.). *Acta Silvatica Lignaria Hungarica* 5: 47-62.
- Mátyás Cs., Berki I., Czucz B., Gálos B., Mórnicz N., Rasztoivits E. (2010). Future of beech in Southeast Europe from the perspective of evolutionary ecology. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica* 6: 91-110.

- Meier E. S., Lischke H., Schmatz D. R., Zimmermann N. E. (2012). Climate, competition and connectivity affect future migration and ranges of European trees. *Global Ecology and Biogeography* 21: 164-178.
- Mérian P., Pierrat J-C., Lebourgeois F. (2013). Effect of sampling effort on the regional chronology statistics and climate-growth relationships estimation. *Dendrochronologia* 31: 58-67.
- NÉBIH (2014). Erdővagyon és erdőgazdálkodás Magyarországon. Nemzeti Élelmiszerlánc-biztonsági Hivatal, Erdészeti Igazgatóság, Budapest
- Osborn T. J., Briffa K. R., Jones P. D. (1997). Adjusting variance for sample-size in tree-ring chronologies and other regional-mean time-series. *Dendrochronologia* 15: 89-99.
- Peñuelas J., Ogaya R., Boada M., Jump A. S. (2007). Migration, invasion and decline: changes in recruitment and forest structure in a warming-linked shift of European beech forest in Catalonia (NE Spain). *Ecography* 30: 829-837.
- Piovesan G., Di Filippo A., Alessandrini A., Biondi F., Schirone B. (2005). Structure, dynamics and dendroecology of an old-growth *Fagus* forest in the Apennines. *Journal of Vegetation Science* 16: 13-28.
- Prislan P., Gričar J., de Luis M., Smith K. T., Čufar K. (2013). Phenological variation in xylem and phloem formation in *Fagus sylvatica* from two contrasting sites. *Agricultural and Forest Meteorology* 180: 142-151.
- Robson T. M., Rasztoivits E., Aphalo P. J., Alia R., Aranda I. (2013). Flushing phenology and fitness of European beech (*Fagus sylvatica* L.) provenances from a trial in La Rioja, Spain, segregate according to their climate of origin. *Agricultural and Forest Meteorology* 180: 76-85.
- Rozas V., Camarero J. J., Sangüesa-Barreda G., Souto M., García-González I. (2015). Summer drought and ENSO-related cloudiness distinctly drive *Fagus sylvatica* growth near the species rear-edge in northern Spain. *Agricultural and Forest Meteorology* 201: 153-164.
- Sabaté S., Gracia C. A., Sánchez A. (2002). Likely effects of climate change on growth of *Quercus ilex*, *Pinus halepensis*, *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris* and *Fagus sylvatica* forests in the Mediterranean region. *Forest Ecology and Management* 162: 23-37.

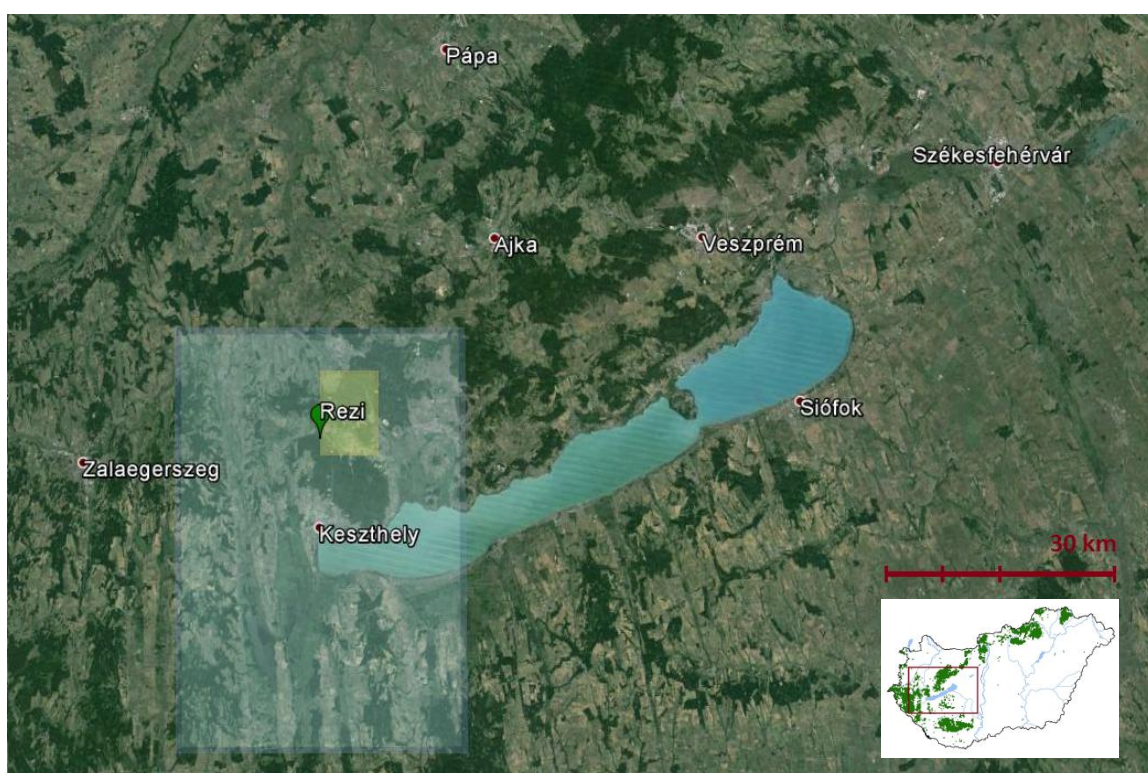
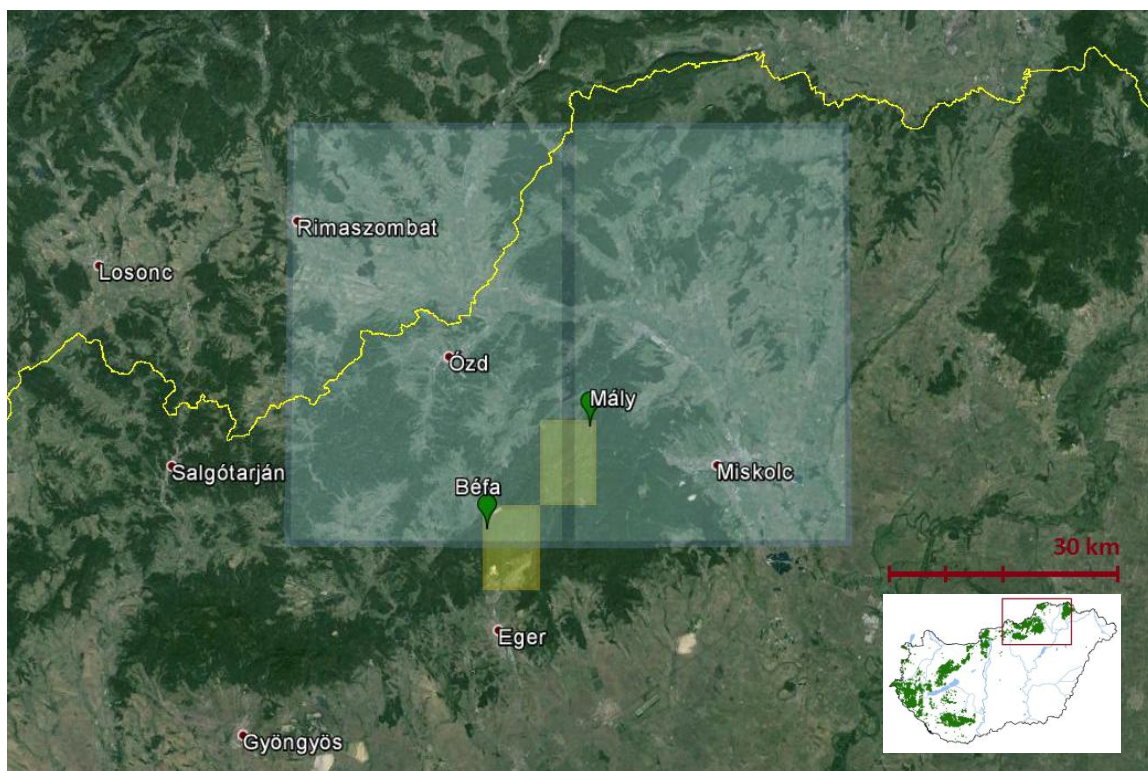
- Saltré F., Duputié A., Gaucherel C., Chuine I. (2015). How climate, migration ability and habitat fragmentation affect the projected future distribution of European beech. *Global Change Biology* 21: 897-910.
- Schneider U., Becker A., Finger P., Meyer-Christoffer A., Ziese M., Rudolf B. (2014). GPCP's new land surface precipitation climatology based on quality-controlled in situ data and its role in quantifying the global water cycle. *Theoretical and Applied Climatology* 115: 15-40.
- Sidor C. G., Popa I. (2015). Influența parametrilor meteorologici lunari și periodici asupra creșterii radiale a bradului, pinului silvestru și laricelui din Banat. *Bucovina Forestieră* 15: 55-63.
- Standovár T., Kenderes K. (2003). A review on natural stand dynamics in beechwoods of East Central Europe. *Applied Ecology and Environmental Research* 1: 19-46.
- Stanturf J. A., Kant P., Barnekow Lillesø J-P., Mansourian S., Kleine M., Graudal L., Madsen P. (2015). Forest Landscape Restoration as a Key Component of Climate Change Mitigation and Adaptation. IUFRO World Series Volume 34, Vienna
- Stojanović D. B., Kržič A., Matović B., Orlović S., Duputié A., Djurdjević V., Stojnić S. (2013). Prediction of the European beech (*Fagus sylvatica* L.) xeric limit using a regional climate model: An example from southeast Europe. *Agricult. and For. Meteorology* 176: 94-103.
- Stojnić S., Orlović S., Pilipović A., Kebert M., Šijačić-Nikolić M., Vilotić D. (2010). Variability of physiological parameters of European beech provenances in international provenance trials in Serbia. *Acta Silvatica and Lignaria Hungarica* 6: 135-142.
- Stokes M. A., Smiley T. L. (1968). An introduction to tree-ring dating. The University of Chicago Press
- Szalai S., Auer I., Hiebl J., Milkovich J., Radim T., Stepanek P., Zahradnicek P., Bihari Z., Lakatos M., Szentimrey T., Limanowka D., Kilar P., Cheval S., Deak Gy., Mihic D., Antolovic I., Nejedlik P., Stastny P., Mikulova K., Nabyvanets I., Skyryk O., Krakovskaya S. (2013). Climate of the Greater Carpathian Region. Final Technical Report. www.carpatclim-eu.org
- Tegel W., Seim A., Hakelberg D., Hoffmann S., Panev M., Westphal T., Büntgen U. (2014). A recent growth increase of European beech (*Fagus sylvatica* L.) at its Mediterranean distribution limit contradicts drought stress. *European Journal of Forest Research* 133: 61-71.

- Trotsiuk V., Hobi M. L., Commarmot B. (2012). Age structure and disturbance dynamics of the relic virgin beech forest Uholka (Ukrainian Carpathians). *Forest Ecology and Management* 265: 181-190.
- UNEP (2014). Forests in a Changing Climate: A Sourcebook for Integrating REDD+ into Academic Programmes. United Nations Environment Programme, Nairobi
- UNFCCC (2015). Adoption of the Paris Agreement. United Nations Framework Convention on Climate Change. Conference of the Parties, Twenty-first session, Paris. FCCC/CP/2015/L.9
- van der Maaten E. (2012). Climate sensitivity of radial growth in European beech (*Fagus sylvatica* L.) at different aspects in southwestern Germany. *Trees* 26: 777-788.
- van der Werf G. W., Sass-Klaassen U. G., Mohren G. M. J. (2007). The impact of the 2003 summer drought on the intra-annual growth pattern of beech (*Fagus sylvatica* L.) and oak (*Quercus robur* L.) on a dry site in the Netherlands. *Dendrochronologia* 25: 103-112.
- Wigley T. M. L., 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: 201-213.
- Woodward F. I. (1987). Climate and plant distribution. Cambridge University Press

Függelékek

1. függelék. Ortofotó térképek a mintaterületek és a használt éghajlati adatbázisok vonatkozó celláinak (CARPATCLIM, CRU/GPCC) elhelyezkedéséről (Térkép: GoogleEarth)

Annex 1. Ortophoto maps with the location study sites and referring grid cells of the used climate databases (CARPATCLIM, CRU/GPCC) (Map source: GoogleEarth)

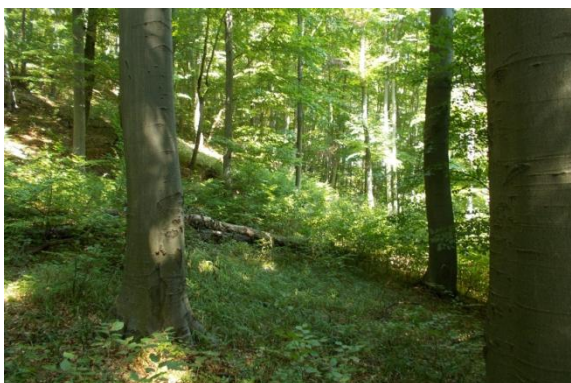


2a. függelék. Fényképek a mályinkai mintaterületről (a szerző felvételei, 2015 szeptember)

Annex 2a. Photos from Mályinka site (photos by the author, September 2015)

Rálátás a mintaterületre a Buzgó-kő szikláiról (jobbra); az idősebb állomány belseje (balra lent) és egy; a vizsgált erdőrészeket érintő kisebb vágásterület képe (jobbra lent)

View of the study area from a limestone cliff near to the edge of Bükk plateau (right); inner structure of the older stand (left side below); and a smaller felling area (right side below)



2b. függelék. Fényképek a bélapátfalvi mintaterületről (a szerző felvételei, 2013 ápr./'14 szept.)

Annex 2b. Photos from Bélapátfalva site (photos by the author, April 2013/Sept 2014)

A kisebb vízfolyások a talaj- és lejtőviszonyok következtében nem játszanak jelentős szerepet a talajnedvesség utánpótlásában (jobbra); az elegyes állomány belső képe (alsó képek)

Ephemeral stream in the valley bottom does not play a significant role in local groundwater recharge (right); inner look into the structure of the mixed beech stand (left and right below)



2c. függelék. Fényképek a rezi mintaterületről (a szerző felvételei, 2015 július)

Annex 2c. Photos from Rezi site (photos by the author, July 2015)



Az egészségügyi termelés során hátramaradt, pusztuló bükkfák (balra); a bálványfa (*Ailanthus altissima*) invazív gyomként van jelen a területen (jobbra)

Sanitation felling area with decaying beech trees left behind (left); *Ailanthus altissima* is considered as an invasive weed to the forest stand (right)



Csoportos újulat a megmaradt anyafák védelmében, kevésbé drasztikusan megváltozott mikroklimatikus körülmények között (balra); magányos csemete, pusztuló idős fákkal a háttérben (jobbra)

Natural group regeneration under remaining nurse trees by undisturbed stand climate conditions (left); a healthy beech seedling with decaying mates in the background (right)



Ültetett cser és kocsánytalan tölgy csemeték jelentős szerepet kapnak a megváltozott klímájú állomány felújításában (balra); rálátás a területre, háttérben Rezi várával (jobbra)

Planted sessile and Turkey oak seedlings play a key role in reforesting the area of died and removed beech trees (left); view of study site with castle of Rezi on the background hill (right)