

AZ IDŐJÁRÁS HATÁSA EGY IDŐSKORÚ BÜKKÖS ÉVENKÉNTI KÖRLAP-NÖVEKEDÉSÉRE

Führer Ernő¹, Edelenyi Márton², Jagodics Anikó¹, Jereb László², Horváth László³,
Kern Zoltán⁴, Móring Andrea⁵, Szabados Ildikó⁶ és Pödör Zoltán²

¹NAIK Erdészeti Tudományos Intézet, Ökológiai és Erdőművelési Osztály, Sopron

²Nyugat-magyarországi Egyetem, Simonyi Károly Műszaki, Faanyagtudományi és Művészeti Kar,
Informatikai és Gazdasági Intézet, Sopron

³MTA-SZIE Növényökológiai Kutatócsoport, Gödöllő

⁴MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont, Földtani és Geokémiai Intézet, Budapest

⁵Edinburghi Egyetem, Ökológiai és Hidrológiai Központ, Edinburgh

⁶Földművelésügyi Minisztérium, Budapest

Kivonat

Egy Soproni-hegységben található bükkös évenkénti körlap-növekedésének meteorológiai jellemzőkkel való összefüggését vizsgáltuk az 1985 és 2007 közötti időszakban. Értékeljük a terület időjárási körülményeit, és töréspont-elemzés alkalmazásával megállapítottuk, hogy a vegetációs időszak egyes hónapjaiban a hőmérséklet tekintetében növekedés, míg a csapadék esetében csökkenés mutatható ki. A körlap-növekedés éven belüli és évek közötti változásai tekintetében a fő növekedési időszakokban (V–VIII. hónap) egyértelmű csökkenés, a befejező növekedési időszakokban (IX–X.) pedig egyértelmű emelkedés figyelhető meg, miközben az éves növekedés erősen csökkenő tendenciájú. Többváltozós lineáris modell alkalmazásával elemeztük az éves körlapnövedék és a tárgyév, illetve az előző két év különböző klimatikus paraméterei közötti kapcsolatokat. Megállapítottuk, hogy az előző év nyári csapadéka pozitívan, míg őszenek hőmérséklete negatívan hat. A tárgyév tavaszának, kora nyarának csapadéka szintén segíti a növekedést, azonban a június–júliusi nagy meleg visszaveti azt. A kapott eredmények alapján megállapítható, hogy a klíma-előrejelzéseknek megfelelően jelentős csökkenés várható a bükkösök növedékében, miközben a fafaj vitalitása és toleranciaszintje is esni fog.

Kulcsszavak: bükk, körlapnövedék, meteorológiai jellemzők

EFFECT OF WEATHER CONDITIONS ON THE ANNUAL BASAL AREA INCREMENT OF A BEECH STAND OF OLD AGE

Abstract

We studied the effect of meteorological parameters on the basal area increment (BAI) of a beech stand in the Sopron Mountains between 1985 and 2007. We evaluated the meteorological conditions of the area by using breakpoint-analysis, and the results showed rising temperature and decreasing rainfall in certain months of the vegetation period. Regarding to the trends of BAI, we observed a significant decrease in the main growth period (May–August) and a significant increase in the final growth period (September–October), while the annual tree growth showed a strong significant decreasing trend. Multivariate regression analysis was used to determine the relationships between the BAI and the climatic variables in the given and also in the previous two years. We found that the previous year's precipitation has positive, while autumn temperature has negative effect on the BAI. At the same time current spring to early summer precipitation enhances the beech growth, and in contrary, the mean temperature in June and July has negative effect on the BAI. Based on the results, we can conclude that according to the forecasted changes in climate, not only further loss in growth but also drastic decay in vitality and tolerance can be expected for beech at this site in the future.

Keywords: beech, basal area increment, meteorological parameters

BEVEZETÉS

Az 1990-es évek elején több szerző is jelezte, hogy Közép-Európában az erdők növekedése az évszázad utolsó harmadában nagyobb volt, mint az évszázad közepén, vagy azt megelőzően (Pretzsch 1992; Bräker 1996; Spiecker és mtsai 1996; Zingg 1996; Kahle 2008; Somogyi 2009). Az okokat vizsgálva, a növekedés-változást kapcsolatba hozzák egyrészt a vegetációs periódus meghosszabbodásával (Hasenauer és mtsai 1999), valamint a kilombosodás és virágzás korábbi bekövetkezésével (Menzel és Fabian 1999). Másrészt a klímaváltozással összefüggő hőmérséklet-emelkedés is, az egyéb tényezőkön kívül, jelentősen befolyásolja a fotoszintézis és a légzés folyamatainak intenzitását, ami szintén növekedés-változást eredményez (Kozłowski és mtsai 1991; Larcher 2001; Somogyi 2008). Fontos azonban megjegyezni, hogy ha nagyobb földrajzi léptékben szemléljük a klímaváltozás és a fák növekedésének kapcsolatát, akkor a kapott eredmények sokszor egymásnak ellentmondóak. Ennek egyik oka az, hogy a különböző megfigyelések és mérések összehasonlításakor figyelmen kívül hagyják a kísérleti objektumok klimatikus adottságainak kedvező vagy kedvezőtlen voltát (Mátyás és mtsai 2010a,b). Az egyes fafajok elterjedési területének szárazabb részeivel ellentétben a kedvező vízellátottságú helyszíneken a melegedés valóban jelentős, akár 50%-ot is elérő növekedéstöbblettel járhat.

A klímaváltozás a XXI. század legnagyobb kihívásainak egyike. Az előrejelzések szerint Magyarország időjárása az eddigieknél melegebb és szárazabb lesz (Gálos és mtsai 2007; Bartholy és mtsai 2009; Faragó és mtsai 2010; Pieczka és mtsai 2011). Hazánkban a klíma erdészeti kihatásait nemcsak az egyes fafajok elterjedésének, diverzitásának és vitalitásának változása (Berki és mtsai 2009; Mátyás és mtsai 2009, 2010a,b,c, 2011; Mátyás 2010; Czúcz és mtsai 2011, 2013; Rasztovits és mtsai 2012; Borovics és Mátyás 2013; Móricz és mtsai 2013), továbbá az abiotikus és biotikus károsítások növekedése miatt (Csóka 1996, 1997; Csóka és mtsai 2009; Molnár és Lakatos 2009; Lakatos és Molnár 2009; Hirka és Csóka 2010; Klapwijk és mtsai 2013), hanem produkcióbiológiai összefüggések szempontjából (Szőnyi 1962; Halupáné 1967; Járó és Tátraaljai 1985; Führer és Járó 1992; Führer 1994, 1995; Manninger 2004; Somogyi 2008, 2009; Solymos 2009; Führer 2010; Führer és mtsai 2011a,b; Garamszegi és Kern 2014; Führer és mtsai 2016) is többen vizsgálták. Ez utóbbi szempont gyakorlati megközelítésben azt jelenti, hogy a fák és a faállományok növekedési feltételei-

nek minél alaposabb feltárása a klímaváltozás ökonómiai következményei és az erdők klímavédelmi szerepe miatt is egyre inkább sürgető kutatási feladattá válik (Gálos és mtsai 2011, 2012; Führer és mtsai 2013).

Jelen tanulmányban egy idős bükkös faállományban 22 éven át (1985–2007) végzett hetenkénti kerület-növekedés mérések adatait elemeztük összefüggésben a növekedést meghatározó főbb időjárási paraméterekkel, így a havi átlaghőmérséklettel és csapadékkal. Az adatsor időbeli hossza már lehetővé teszi, hogy az évenkénti körlap-növekmények és az időjárás hatását lineáris korreláció-analízissel megbízhatóan kimutassuk, illetve a növekmény értékeire többváltozós lineáris regresszióval modellt illesszünk. Ez megerősíti a lehetőséget arra, hogy a klímaszcenáriók felhasználásával modellezhessük a jövőben várható növekmény alakulását.

ANYAG ÉS MÓDSZER

Kísérleti objektum jellemzése

A mérőhely kiválasztásánál elsődleges szempont az volt, hogy a kérdéses fafaj, azaz a bükk az adott tájban ökológiai és erdőgazdasági szempontból egyaránt fontos legyen. A Soproni-hegység Magyarország és Ausztria határán fekszik és itt a bükk őshonos előfordulású. A Sopron 151/A erdőrészletben kijelölt állomány erdőtípusa *Oxalis acetosella* bükkös, egyszintű, teljes záródású, kora a mérések megindításakor az erdészeti adattár bejegyzése szerint 85 év. Az I. és a II. világháború között a bükkösök felújítását olyan technológiával végezték, amivel 5–15 év alatt sikert értek el. Ezért előfordulhat, hogy az egyes törzsek között a kambialis korban 10 évnyi különbség is lehet. 2008. év elején az állományt letermelték. A kísérleti terület délkeleti kitétséggű, enyhe lejtésű hegyoldalon, kb. 400 m tengerszintfeletti magasságban fekszik. A talajképző kőzet gneisz, az ezen kialakult genetikai talajtípus pedig a mély termőrétegű agyagbemosódásos barna erdőtalaj podzolos változata. Az éghajlata szubalpin jellegű.

Az átlagos faállomány-viszonyokra jellemző helyen 50×50 m-es parcellán megmértük valamennyi törzs magasságát és mellmagassági átmérőjét. Az állomány jó növekedésű, hektáronkénti törzsszáma 362 db, élőfakészlete 732 m³, átlagos átmérője és magassága 37 cm, ill. 32 m. A törzsenkénti felvételek alapján megállapítottuk az egyes törzsek szociális helyzetét (kimagasló, uralkodó és alá-, ill. közbeszorult egyed), majd jellemeztük az állomány szerkezetét. Az elemzés alapján kiválasztottunk 7 törzset, melyek közé alászorult törzset nem választottunk, mert azoknál a növekedést az időjáráson kívül a szociális helyzetük is nagymértékben befolyásolja. E törzsekre mellmagasságban ún. Liming-szalagokat (Liming 1957) helyeztünk, melyek segítségével 22 éven át (1998 kivételével 1985-től 2007-ig) hetente, ill. kéthetente mértük a kiválasztott faegyedek kerületének változását.

A mérések alapján a teljes vegetációs periódus (április–október) alatti növekedést jellemeztük. Továbbá a rendelkezésre álló havi meteorológiai adatok segítségével a havonkénti növekedések mellett olyan szematikusan képzett periódusok növekedését értékeltük, amik lefedik a kezdeti (április), a fő (május–augusztus) és a befejező (szeptember–október) növekedési szakaszokat.

A kísérleti hely időjárásának általános és konkrétan a vizsgált évek jellemezéséhez az Országos Meteorológiai Szolgálatnak a térségben lévő mérőhálózata segítségével a kísérleti területre interpolált havi csapadék- és hőmérsékletadatait használtuk fel. Nemcsak a terület általános klímajellemzését végeztük el, hanem összefüggést is kerestünk az egyes évek havi hőmérséklet- és csapadékadatai, valamint az évenkénti körlap-növekmények között.

Kiértékelés módszere

Az európai irodalmi áttekintés alapján (Manninger és mtsai 2011) megállapítható, hogy az időjárás és a fák növekedése közötti kapcsolat elemzésében egyaránt használnak szimpla havi (Dittmar és mtsai 2003; Szabados 2004, 2006; Kern és Popa 2007; Maxime és Hendrik 2010; Scharnweber és mtsai 2011) és speciális, időszaki komponenseket (Pichler és Oberhuber 2007; Novák és mtsai 2010). Az eltolt hatásokat előre definiált időszakok segítségével is rendszeresen figyelembe veszik (Briffa és mtsai 2002; Büntgen és mtsai 2006; Gutiérrez és mtsai 2011). Ezeket az időszakokat az egyes hónapok tulajdonságainak szisztematikus összevonásával (összeg ill. átlag) lehet teljes körűen reprezentálni, melyeket ebben a munkában a CReMIT keretrendszerrel vizsgáltuk (Edelényi és mtsai 2011; Pödör és mtsai 2014).

A keretrendszer egyes fázisai egyrészt az adatelőkészítésért, másrészt a CReMIT alkalmazásával nyerhető másodlagos adatsorok létrehozásáért, továbbá az adatok elemzéséért felelősek. A másodlagos adatok előállítása – szakmai szempontok figyelembevételével – egy maximális időszaki eltolás és szélesség meghatározásával definiálható.

A CReMIT által előállított másodlagos (meteorológiai) adatok és a fák körlap-növekedése között lineáris korrelációelemzéssel kerestük a kapcsolatokat, melyek szignifikanciáját t-próbával ellenőriztük. A feltárt szignifikáns havi és időszaki összefüggések felhasználásával többváltozós lineáris regressziós modelleket hoztunk létre a független paraméterek minden lehetséges, legalább kételemű részalmazaira. Ezek közül – az ökofiziológiai szempontokon túl – a korrigált determinációs együttható értékei alapján (R^2_{adj}) válogattunk. Az R^2_{adj} a szimpla determinációs együtthatóval ellentétben figyelembe veszi a modellben felhasznált paraméterszámot és a megfigyelések számát is, amely így alkalmasabb a többváltozós modellek összehasonlítására.

Különösen a természeti jellemzők megfigyelése kapcsán igaz, hogy a változások nem egyik napról a másikra következnek be, hanem egy hosszabb távú folyamat eredményeképpen. A hosszabb távú folyamat kapcsán is lehetőségünk van olyan pontok kijelölésére, melyek mentén viszonylag élesen kettéválaszthatóak az adatsorok. Ez az eljárás a töréspont keresés, és ezeket a hirtelen, ugrásszerű változásokat töréspontoknak nevezzük az idősorokban. A statisztikai szakirodalom e célra többféle módszert kínál (Sneyers 1992; Mares és Mares 1994; Molnár és Izsák 2011), mi a *részátlagok összevetése a Student-féle t-próbával* alkalmazása mellett döntöttünk, mely azon a feltevésen alapul, hogy az ugrásszerű változás időpontjánál elválasztott időszakok átlagainak eltérése nagyobb a más időpontoknál elválasztottakénál.

EREDMÉNYEK ÉS MEGVITATÁSUK

A kísérleti terület időjárásának erdészeti szempontú értékelése

Az 1961–2007 közötti időszak átlagszapadéka 761 mm. Ebből a növekedési periódusban (IV–X.) 540 mm hullott, a nyugalmi időszakban (XI–III.) pedig csak 221 mm (1. táblázat). Ez azt jelenti, hogy a nyugalmi időszak talajban tárolt vízmennyisége mellett a fiziológiai szempontból aktív növekedési időszakban elegendő csapadékvíz áll az erdő rendelkezésére a szervesanyag-képzéshez. Amennyiben az egyes növekedési időszakok csapadékmegoszlását nézzük, akkor a kezdeti növekedési időszakaszra a növekedési időszakban hullott csapadék 11%-a (58 mm), a fő növekedési időszakaszra annak 65%-a (349 mm), míg a befejező növekedési időszakaszra annak 24%-a (133 mm) esik. A júniusi legintenzívebb növekedés idején 95 mm (18%) volt a 47 év átlagos csapadéka. A hőmérsékleti adatok esetében a kísérleti terület átlagos éves hőmérséklete 7,9 °C. Amíg a növekedési időszak átlaghőmérséklete 13,5 °C, addig a nyugalmi időszaké 0 °C. Ha a növekedési időszakok hőmérsékletviszonyait nézzük, akkor a kezdeti növekedési időszakasz átlaghőmérséklete 8,0 °C, a fő növekedési időszakaszé 16,2 °C, míg a befejező növekedési időszakaszé 10,9 °C. A magas

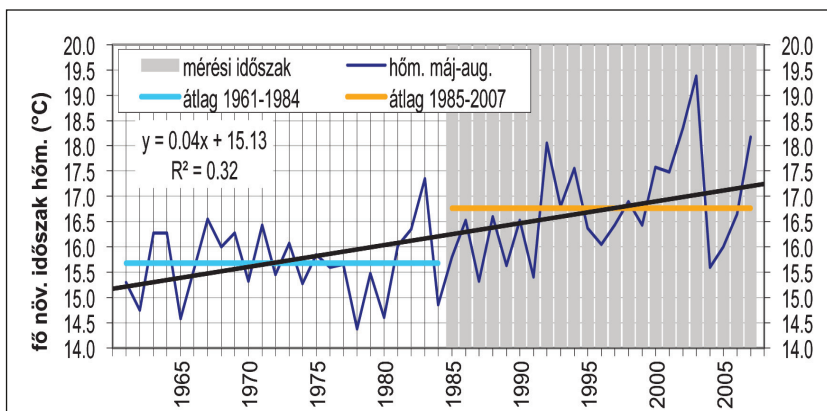
hőmérséklet miatt kritikus hónapnak számít a július és néha az augusztus, mert ekkor a havi átlaghőmérséklet meghaladja a 18 °C-ot, a nappali maximum-érték pedig a 30–35 °C-ot. Ez utóbbi, rendkívül magas hőmérsékleti értékek pedig nagymértékben csökkenthetik a fotoszintézis intenzitását. A mérési periódus (1985–2007) időjárási viszonyai a csapadék tekintetében kevésbé, de a hőmérséklet esetében markánsan eltérnek az azt megelőző 24 év (1961–1984) időjárásától. A fő növekedési időszakos átlaghőmérséklete a mérési periódusban 1,1 °C-kal magasabb, mint az azt megelőző 24 évben. Még nagyobb a különbség a kritikusnak számító júliusban, amikor annak értéke már eléri az 1,3 °C-ot, méghozzá úgy, hogy közben a mérési periódusban a júliusi csapadék 14%-kal alacsonyabb, mint korábban volt. Azaz a szárazság bekövetkezésének nagyobb volt az esélye a mérési periódusban, mint azt megelőzően.

1. táblázat: A mérési helyszín átlagos meteorológiai adatai a növekedési időszakok szerint (P: csapadékösszeg, T: átlaghőmérséklet)
Table 1: Average meteorological data of the study site according to the growth periods (P: precipitation sum, T: mean temperature)

Élettani szakaszok	Időintervallum					
	1961–1984		1985–2007		1961–2007	
	P (mm)	T (°C)	P (mm)	T (°C)	P (mm)	T (°C)
Éves (I–XII. hónap)	757	7,5	764	8,2	761	7,9
Nyugalmi időszak (XI–III.)	211	–0,3	230	+0,2	221	0,0
Növekedési időszak (IV–X.)	546	13,1	533	13,9	540	13,5
Kezdeti növ. időszak (IV.)	62	7,6	54	8,3	58	8,0
Fő növ. időszak (V–VIII.)	355	15,7	342	16,8	349	16,2
Befejező növ. időszak (IX–X.)	129	10,7	137	11,0	133	10,9
Intenzív növ. időszak (VI.)	100	15,5	89	16,1	95	15,8
Kritikus hónap (VII.)	93	17,5	79	18,8	86	18,2

A melegedő körülményeket szemlélteti az 1. ábrán bemutatott fő növekedési időszakosra értelmezett hőmérsékleti adatsor is. Az időszakosra illesztett trend egyértelmű változást jelez, különösen a mérési periódusra vonatkozóan. Látható, hogy 1961-től 1984-ig a fő növekedési időszakosban 15 °C-nál alacsonyabb átlaghőmérsékletű év a 24 év alatt ötször (1962, 1965, 1978, 1980, 1984), az azt követő 23 évben pedig egyszer sem fordult elő. Vagy amíg 1961-től 1984-ig 17 °C-nál magasabb átlaghőmérsékletű év csak egyszer (1983), addig az azt követő 23 évben már hétszer (1992, 1994, 2000, 2001, 2002, 2003, 2007) fordult elő. Megfigyelhető még az is, hogy amíg a legmagasabb átlaghőmérséklet az első intervallumban 1983-ban 17,4 °C volt, addig a mérési periódusban 2003-ban már elérte a 19,4 °C-ot.

A változást szemlélteti az egyes évek erdészeti klímaosztályok szerinti besorolása is. Bükkös klímának megfelelő időjárású év a magyarországi viszonyokra kifejlesztett erdészeti szárazsági index (Führer 2010; Führer és mtsai 2011a) alapján 1961-től 1984-ig az évek 75%-ában, míg a rá következő 23 évben csak 48%-ában fordult elő. Ennek megfelelően a bükkös klímánál melegebb és szárazabb évek (gyertyános-tölgyes, kocsánytalan tölgyes/cseres és erdőssztyepp klímaosztály) a mérési periódusban gyakoribbak voltak (52%), mint előtte (25%). Azaz egyértelmű bükkös klímáról, legalábbis a mérési periódus alatt nem beszélhetünk. Összességében nézve a 47 évet, megállapítható, hogy a kísérleti terület klímája bükkös, hiszen 29 évben, azaz az évek 62%-ában a bükkös klímára jellemző időjárási körülmények fordultak elő. Az évek 23%-ában a gyertyános-tölgyes, 9%-ában a kocsánytalan tölgyes illetve cseres, végül pedig 6%-ában az erdőssztyeppre jellemző körülmények uralkodtak.



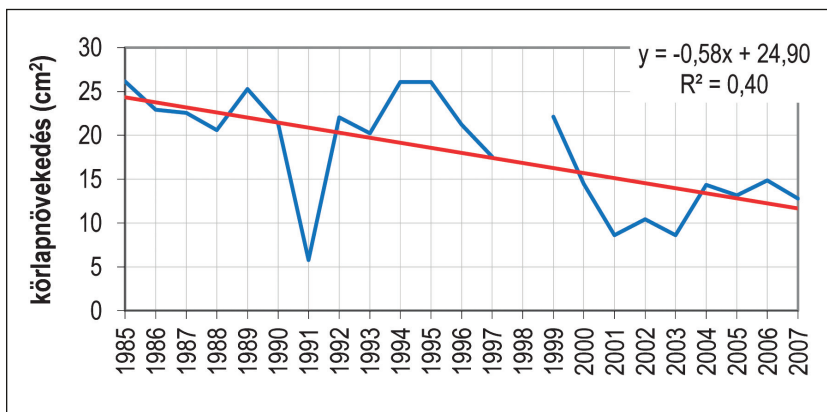
1. ábra: A fő növekedési időszakasz átlaghőmérsékletének évenkénti változása és ennek trendje
 Figure 1: Average air temperature of the main growth period and its trend between 1961 and 2007

Az egyes hónapok csapadék- és hőmérsékletviszonyaiban azonban a mérési periódus alatt is jelentős változás volt érzékelhető. A meteorológiai elemzéseknél használatos töréspont-vizsgálat alapján az 1985–2007. időszak vonatkozásában kerestük azokat az éveket, amelyek előtt és után a számított átlagadatok az egyes hónapok és periódusok vonatkozásában szignifikánsan különböztek egymástól. Feltételezésünk szerint, amelyik évtől, vagy azt közvetlenül megelőző, ill. azt követő évtől a havi vagy az időszak meteorológiai paraméter időbeni alakulásában markáns, szignifikáns változás áll be, és az adott paraméter meghatározó a növekedés szempontjából, akkor abban az évben, vagy annak közelében a növekedésben is változás várható. A töréspont-elemzés mutatja, hogy a mérési periódus 22 éve alatt a vegetációs időszak egyes hónapjaiban mind a csapadék, mind pedig a hőmérséklet vonatkozásában különböző években, de 1990 és 2000 között következett be változás. Amíg csapadék esetében a növekedés szempontjából meghatározó hónapokban csökkenés, addig a hőmérsékletnél emelkedés volt megfigyelhető a töréspont utáni időszakban az azt megelőző időszakhoz képest. Azaz pl. június esetében a hőmérséklet átlaga 1992 után 1,86 °C-kal magasabb, mint az azt megelőző időszakban, addig az átlagos csapadék 1998 után 41 mm-rel kevesebb az azt megelőző időszak átlagánál.

A körlapnövedék évenkénti és éven belüli változása

A heti terület-növekedésből kiszámított évenkénti körlap-növekedés átlagos nagysága 17,9 cm², a legnagyobb növekedésű fánál ennek értéke 31,3 cm², a legkisebb növekedésűnél pedig 5,52 cm². Az átmérő-növekedés megindulása április első felében kezdődik, és október közepéig befejeződik. Az adatok azt mutatják, hogy a szervesanyag 88%-a a fő növekedési időszakaszban képződött, a kezdeti növekedési időszakaszban valamivel több mint 5%-a, míg a befejező növekedési időszakaszban valamivel kevesebb mint 7%-a. Az egyes törzsek között nemcsak abszolút növekedésben van eltérés, hanem annak az egyes növekedési időszakokra jutó aránya is más és más. Megállapítható, hogy minél kisebb a törzs szervesanyag-képzése, azaz minél kisebb a fő növekedési időszakasz körlapnövedéke, annál nagyobb arányú a kezdeti- és a befejező növekedési időszakaszra eső növedék.

Az éves körlapnövedékek évenkénti értékei az idő előrehaladtával egyértelműen csökkenő trendet mutatnak (2. ábra). Ez természetesen összefügghet a mérési időintervallum alatt megfigyelhető egyértelmű hőmérséklet-emelkedéssel is (lásd 1. ábra). Látható, hogy 1991-ben, és a 2001–2003 közötti periódus alatt a növekedés jóval az átlag alatti volt.



2. ábra: Átlagos évenkénti körlapnövedék futása

Figure 2: The yearly basal area increment in the examined period

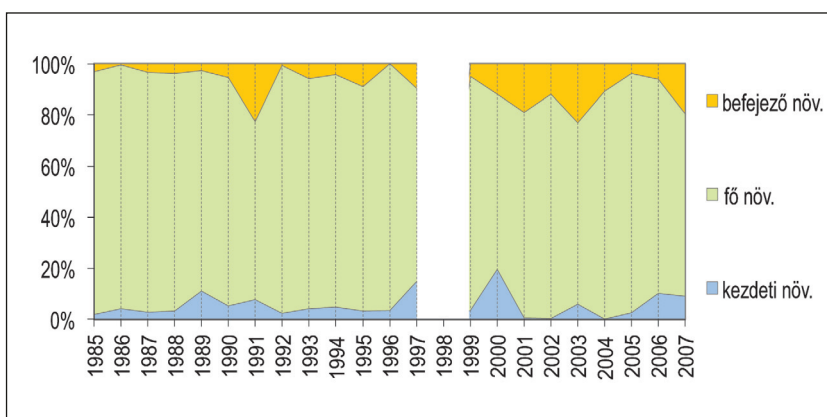
Az 1991. év rendkívülinek számított, hiszen az éves körlapnövedék csak 5,77 cm², a sokéves átlagnak alig egyharmada volt. Ebben az évben a kezdeti növekedési időszakaszban az éves növedéknek csaknem 8%-a, a fő növekedési időszakaszban 70%-a, míg a befejező növekedési időszakaszban csaknem 23%-a képződött. Az igen alacsony körlapnövedék feltehető oka nemcsak biológiai lehet, hanem szerepet játszott abban a tárgyév rendkívüli időjárása is. Az éves csapadék 849 mm, a sokéves átlagnál 12%-kal nagyobb. Azonban ennek megoszlása az egyes növekedési időszakaszok között nagyon kedvezőtlen volt. Azaz a téli félév (1990. XI.–1991. IV.) alatt hullott csapadék (190 mm), ami az áprilisi növekedés megindulásához elengedhetetlen vízforrás, a 47 éves átlagnál (279 mm) 32%-kal alacsonyabb volt. A nyugalmi időszakban és a kezdeti növekedési időszakaszban tehát a talaj vízzel való feltöltődése csak részlegesnek mondható. Az ezt követő két hónapban (május és június) viszont, amikor a szervesanyag-képzés általában a legnagyobb, a lehullott csapadék (329 mm) a sokéves átlagnál (178 mm) 84%-kal magasabb volt. Ugyanakkor a május és június hónapok átlaghőmérséklete 2,2 °C-kal alacsonyabb volt, mint a sokéves átlag (14,4 °C). Következésképpen a páratelt levegő miatt a csökkent mértékű transzspiráció és az átlagnál jóval alacsonyabb hőmérséklet miatt pedig a fotoszintézis intenzitása is jelentősen mérséklődött. Ennek volt eredménye a kis mértékű szervesanyag-képzés. Ezt a hiányt azonban a fák a későbbi hónapokban, hiába hullott még 330 mm eső, már nem tudták bepótolni. Látható, hogy a befejező növekedési időszakaszban képződött az éves növedék 23%-a, ami jóval magasabb arányú a 22 éves átlagnál (6,7%).

Szélsőséges időjárású évnak számított a 2003. év is. Az éves csapadék 558 mm, ami a sokéves átlagnál 27%-kal alacsonyabb. Amíg a nyugalmi időszak és a kezdeti növekedési időszakasz együttes csapadéka (216 mm) megfelel a sokéves átlagnak (221 mm), addig az intenzív növekedésű május és június csapadék-összege csak 108 mm, ez pedig 39%-kal alacsonyabb, mint a sokéves átlag (178 mm). Ugyanakkor a két hónap átlaghőmérséklete 18 °C volt, szemben a 14,5 °C-os sokévi átlaggal. A hőmérsékletek napi maximumának átlaga májusban elérte a 29,4, júniusban pedig 32,6 °C-ot. Szárazság (lég- és talaj-) és hőség tehát egy időben volt jelen, és ezért a fotoszintézissel egybekötött szervesanyag-képzés is korlátozott volt. A 8,6 cm²-es éves körlapnövedék 6%-a a kezdeti, 71%-a a fő és 23%-a a befejező növekedési időszakaszban képződött. Ez esetben is megállapítható, ha a fő növekedési időszakaszban a szervesanyag-képzés kicsiny (6,09 cm²), akkor a befejező növekedéssel (1,99 cm²) némi kompenzációra még képesek a fák.

Az egyes évek elemzéséből az is látható, hogy az évenkénti körlapnövedék nagy változatosságot mutat nemcsak évről évre, hanem a növekedési időszakaszokon belüli megoszlás alapján is. Általában megállapítható, hogyha a fő növekedési időszakaszban kisebb a növedék nagysága, akkor a befejező növekedési

időszakokban százalékosan nagyobb (3. ábra). Ilyen jellegű összefüggés a kezdeti növekedési időszak tekintetében nem áll fenn.

A kezdeti növekedési időszakban a legnagyobb növedék mennyiségében (2,84 cm²) és arányában (20%) egyaránt 2000-ben volt. Ezt az időjárás is alátámasztja, hiszen a nyugalmi időszakban és a kezdeti növekedési időszakban a csapadék nagysága összesen 340 mm volt, ami 54%-kal több, mint a sokéves (47 év) átlag. A fiziológiai folyamatok megindulásához így elegendő volt a talaj víztelítettsége, ugyanakkor a tavaszi, azaz a márciusi átlaghőmérséklet 1,1 °C-kal, az áprilisi pedig 3,4 °C-kal volt melegebb, mint a kérdéses hónapok sokéves átlagai ($T_{\text{márc.}}: 2,9 \text{ °C}; T_{\text{ápr.}}: 7,9 \text{ °C}$). E kedvező időjárási viszonyok nagy valószínűséggel hozzájárultak a kezdeti növekedés korai és intenzív megindulásához.

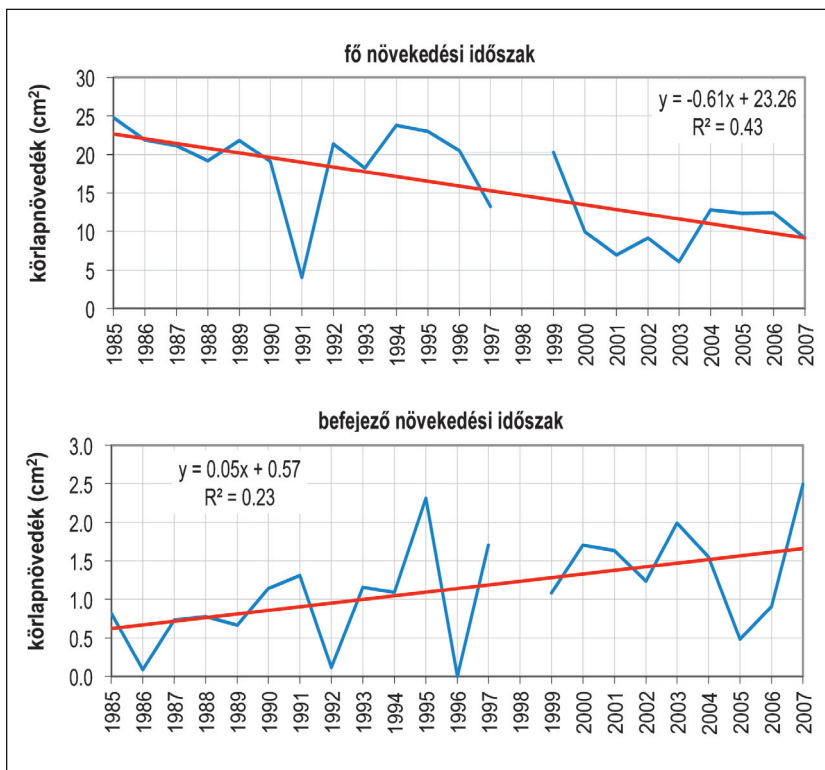


3. ábra: Az egyes növekedési időszakok körletnövedékének százalékos megoszlása az egyes években
Figure 3: Share of basal area increments of the growth periods in the examined years

A kezdeti növekedési időszak hossza viszonylag rövid. Ez egybevetve az utóbbi két évtized azon megfigyelésével, hogy a tél és a nyár közötti átmenet gyorsan eltelik. A fő növekedési időszakban pedig egyre melegebbé válik és július–augusztusban igen gyakran előfordul, hogy a rendkívül magas nappali hőmérséklet és az alacsony páratartalom eredményeként a fotoszintézis szinte teljesen leáll. A hőség enyhülésével aztán később, az ősz elejétől, annak közepéig ismét beindul. A mérések azt bizonyítják, hogy az augusztus utáni befejező növekedési időszakban képződött szervesanyag egyre nagyobb mértékű, és nagysága szorosan összefügg a megelőző időszak növekedési körülményeivel. Vagyis, amennyiben a fő növekedési időszakban alacsony a szervesanyag-képzés, akkor a befejező növekedési időszakban az átlagnál nagyobb. Amíg a kezdeti növekedési időszakban évenkénti körletnövedékai a 22 év alatt trendszerű változást nem mutatnak, addig a fő és befejező növekedési szakasz növekményei igen. A fő növekedési időszakban egyértelmű csökkenés, a befejező növekedési időszakban pedig egyértelmű növekedés figyelhető meg (4. ábra).

Az egyes hónapok növedékét külön-külön szemlélve megállapítható, hogy 22 év átlagában a fő növekedési perióduson belül a legnagyobb növekedés júniusban (6,08 cm²), majd májusban (5,05 cm²), júliusban (3,31 cm²) és augusztusban (1,52 cm²) figyelhető meg.

A töréspont-elemzés alapján május, szeptember és október kivételével a többi hónap, ezen kívül a fő növekedési (V–VIII.) és az egész növekedési (IV–X.) periódus növekedési ütemében 1999 és 2001 között szignifikáns változás állt be (2. táblázat). Ezért külön értékeltük az 1985-től 1999-ig és az 2000-től 2007-ig terjedő időszak növekedési viszonyait. A töréspont-vizsgálatok egyértelműen mutatják, hogy a vegetációs periódus első öt (IV–VIII.) hónapjában a töréspontot jelölő évszámok előtti átlagos növedékek jóval nagyobbak az évszámot követő átlagoknál, szeptemberben és októberben viszont fordított a helyzet.



4. ábra: A fő és befejező növekedési időszakok körlapnövekedékének változása a mérési időszak alatt
 Figure 4: Trends of basal area increment of the main and the final growth periods during the examined years

2. táblázat: Körlapnövekedések töréspont-elemzésének eredményei

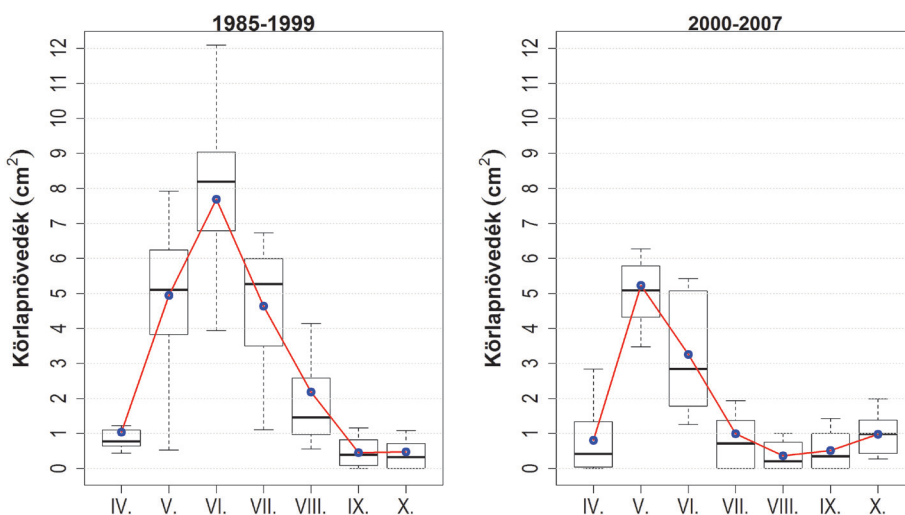
(*: $p < 0,1$ szinten, **: $p < 0,05$ szinten szignifikáns)

Table 2: The results of the break-point analysis of the basal area increments

(*: significant at $p < 0,1$; **: significant at $p < 0,05$)

Hónapok	Töréspont (évszám)	Növedék (cm ²)		
		előtte	utána	eltérés
IV.	2001*	1,16	0,51	-0,65
V.	1990	5,92	4,79	-1,13
VI.	2000**	7,69	3,26	-4,43
VII.	2000**	4,64	0,99	-3,65
VIII.	1999**	2,31	0,39	-1,92
IX.	1990	0,28	0,53	0,25
X.	1994**	0,24	0,79	0,55
IX-X.	1990**	0,62	1,17	0,56
V-VIII.	2000**	19,45	9,85	-9,60
IV-X.	2000**	21,42	12,15	-9,27

Tehát az egyes hónapok növekedése a két periódusban jelentősen eltér egymástól (5. ábra), ami nemcsak abszolút értékben, hanem az egyes hónapokon belüli súlyok megváltozásában is megmutatkozik. A korábbi időszakban a legnagyobb havi növedék júniusban volt mérhető (7,69 cm²), ennél jóval kisebb, de közel azonos májusban (4,94 cm²) és júliusban (4,64 cm²), majd csökkenő sorrendben augusztus (2,19 cm²), április (1,04 cm²), szeptember (0,45 cm²) és október (0,30 cm²) következik. Ehhez képest a későbbi periódusban a legmagasabb növedék már májusban képződött (5,23 cm²), ez 6%-os emelkedést jelent az előző periódus átlagához képest. Júniusban (3,26 cm²), júliusban (0,99 cm²) és augusztusban (0,37 cm²) viszont már nagy volt a csökkenés (57%, 79%, és 83%), amit a szeptemberi (0,52 cm²) és októberi (0,98 cm²) növekedés csak kis mértékben kompenzált. Azaz az adatokból egyértelműen következik, hogy az első periódusban az átlagos éves növedék (21,19 cm²) csaknem duplája a második periódus átlagos éves növedékének (12,15 cm²).



5. ábra: Havonkénti körápnővedékek az 1985–1999. és a 2000–2007. időszakok átlagában
Figure 5: Absolute average monthly increments in the periods of 1985–1999 and 2000–2007

Az időjárás és körápnővekedés közti összefüggés

A fák növekedése és szervesanyag-képzése szorosan összefügg a transzspirációs vízáramlással és a fotoszintézissel. Mindkét fiziológiai folyamat kötődik a levélzethez, így annak minősége és mennyisége a fák növekedését is alapvetően befolyásolja. A lombhullató fajoknál az évente újraképződő levélzet tömege és minősége a hajtások mennyiségétől és minőségétől függ. Gruber (2004) szerint:

- A hajtások számát a rügyképződmények (primordiumok) kialakulásának körülményei határozzák meg. Ez a folyamat pedig két évvel a hajtásokon kifejlődő levélzetet megelőzően eldől.
- A rügyképződmények differenciálódása rövid és hosszúhajtásokká egy évvel a levélzet megjelenése előtt megtörténik. Minél több a hosszú hajtásokat képző rügyek száma, annál nagyobb a valószínűsége a magasabb levélzszám kifejlődésének.
- Az pedig, hogy a levelek morfológiai tulajdonságai (felülete és vastagsága) milyenek lesznek, a tárgyév tavaszán dől el, elsősorban áprilisban és májusban.

Egy adott év szervesanyag-képzését tehát a tárgyévi levélzet kialakulása miatt három év, a tárgyévi, az azt egy évvel és az azt két évvel megelőző évek időjárása nagyban befolyásolja. Ezért, amikor összefüggést

kerestünk a fák körlap-növekedése és az időjárás között, három év havi, ill. időszaki hőmérséklet- és csapadékadatait vontuk be a vizsgálatokba.

Az értékelés lineáris korreláció-analízissel történt egyrészt havi, másrészt időszaki (több, szomszédos hónap csapadékösszege és átlaghőmérséklete) komponensekre (CReMIT) alapozva. Ez utóbbiak képzésénél figyelembe vettük a növekedési szakaszokat, vagyis a végső eredményekben igyekeztünk szakmai szempontból is értelmezhető, a növekedést nagy valószínűséggel szignifikáns módon befolyásoló időszakokat kiválasztani.

A havi hőmérséklet-komponensek (3. táblázat) esetében 90%-os szinten szignifikáns hatású a két évvel korábbi október ($T_{-2(\text{okt})}$) és az egy évvel korábbi június ($T_{-1(\text{jún})}$), míg 95%-os szinten az egy évvel korábbi november ($T_{-1(\text{nov})}$) és a tárgyévi június ($T_{(\text{jún})}$). Az egyértelmű negatív előjel azt jelzi, hogy a vizsgált állomány hőmérsékleti viszonyai magasabbak, mint a faj számára optimális hőmérsékleti tartomány. A havi csapadék-komponensek közül a körlapnövedéket 95%-os szinten szignifikánsan befolyásolja a két évvel korábbi júniusi ($P_{-2(\text{jún})}$) és novemberi ($P_{-2(\text{nov})}$), az egy évvel korábbi májusi ($P_{-1(\text{máj})}$), valamint a tárgyévi áprilisi ($P_{(\text{ápr})}$) és júniusi ($P_{(\text{jún})}$) adat. A korrelációs együtthatók kivétel nélkül pozitív előjelűek, azaz a nagyobb mennyiségű csapadék kedvez a növekedésnek. A szignifikánsan ható havi komponensek olyan időszakokban fordulnak elő, amikor fontos fiziológiai folyamatok játszódnak le az év során (rügyképződés, lombhullás, szervesanyag-képződés). A fenti vizsgálatokat elvégeztük időszaki komponensekre is. Időszakoknak a legfeljebb három, egymást követő hónapot tekintettük. Hőmérséklet esetén átlagot, csapadékokra összeget képeztünk. Megjegyzendő, hogy a havi komponensek esetében nagyobb szerepet játszó hónapok az időszaki komponensekben is megjelennek.

3. táblázat: A növedéssel szignifikánsan korreláló meteorológiai jellemzők (*: $p < 0,1$ szinten, **: $p < 0,05$ szinten szignifikáns)

Table 3: Significant correlations between basal area increment and meteorological variables (*: significant at $p < 0.1$;

** : significant at $p < 0.05$)

Havi komponensek	$T_{-2(\text{okt})}$	$T_{-1(\text{jún})}$	$T_{-1(\text{nov})}$	$T_{(\text{jún})}$	$P_{-2(\text{jún})}$	$P_{-2(\text{nov})}$	$P_{-1(\text{máj})}$	$P_{(\text{ápr})}$	$P_{(\text{jún})}$
r	-0,41*	-0,42*	-0,54**	-0,53**	0,5**	0,48**	0,44**	0,45**	0,45**
Időszaki komponensek	$T_{-2(\text{okt-nov})}$	$T_{-1(\text{ápr-jún})}$	$T_{-1(\text{okt-nov})}$	$T_{(\text{jún-júl})}$	$P_{-2(\text{júl-szept})}$	$P_{-2(\text{okt-nov})}$	$P_{-1(\text{máj-jún})}$	$P_{(\text{feb-ápr})}$	$P_{(\text{ápr-jún})}$
r	-0,44**	-0,45**	-0,65**	-0,43**	-0,47**	0,47**	0,44**	0,47**	0,42*

A vizsgálatok során kapott eredményekre támaszkodó modellillesztéshez többváltozós lineáris regressziót alkalmaztunk. A szignifikáns meteorológiai komponensek felhasználásával előállítottuk az összes, matematikailag lehetséges többváltozós klímaindex-modellt (továbbiakban CI: Climate Index) mind a hőmérséklet, mind a csapadék és a kettő additív vonatkozásában havi, időszaki és együttes szinten is. A kapott regressziós egyenletekből a statisztikailag szignifikánsak ($p < 0,05$) közül kiválogattuk a szakmailag is megfelelőeket. A továbbiakban az alábbi rövidítéseket alkalmazzuk CI vonatkozásában: T a hőmérséklet, P a csapadék, m (monthly) a havi, s (seasonal) az időszaki komponensekre utal.

Igy a releváns szignifikáns paraméterek figyelembevételével előállítottuk azokat a regressziós klímaindexeket (4. táblázat), amelyek a vizsgált 22 év átlagában leginkább befolyásolják a fák éves körlap-növekedését. A táblázatban a vizsgálatok alapját képező korrigált determinációs együttható mellett a szimpla determinációs együtthatót is feltüntettük. Látható, hogy a független változók számát is figyelembe vevő korrigált determinációs együttható mindenütt alacsonyabb értékeket ad, mint a szimpla.

A havi komponensekből képzett CI_{Tm} és CI_{Pm} indexek alapján megállapítható, hogy a csapadék ($R^2_{adj} = 0,64$) egyértelműen erősebb hatással van a növedékre, mint a hőmérséklet ($R^2_{adj} = 0,43$). Ez alátámasztja Gutiérrez és mtsai (2011) megállapítását, miszerint a hőmérséklet szervesanyag-képződésre gyakorolt hatása rövidebb (napos, hetes) időszakok alatt érvényesül, mint a csapadéké. A kiválasztott együttes (hőmérséklet-csapadék) havi klímaindex modellre (CI_{TPm}) kapott $R^2_{adj} = 0,71$ érték pedig határozott összefüggést mutat.

4. táblázat: Az egyes szempontok szerint kiválasztott modellek (CI)

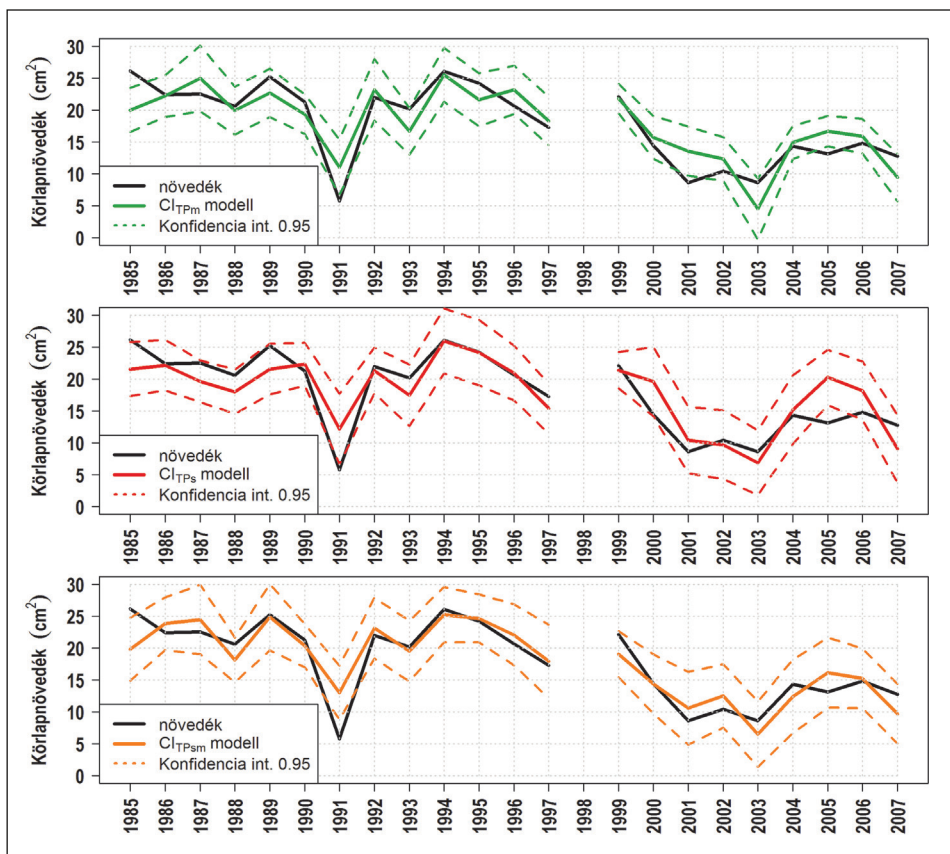
Table 4: The selected climate index models (CI)

modell	R^2_{adj}	R^2
$CI_{Tm} = -1,42 * T_{-1(nov)} - 1,86 * T_{(jún)} + 51,83$	0,43	0,49
$CI_{Pm} = 0,11 * P_{-2(nov)} + 0,07 * P_{-1(máj)} + 0,07 * P_{(ápr)} + 0,03 * P_{(jún)} - 1,03$	0,64	0,71
$CI_{TPm} = 0,09 * P_{-2(nov)} + 0,06 * P_{-1(máj)} - 0,76 * T_{-1(nov)} + 0,05 * P_{(ápr)} - 1 * T_{(jún)} + 22,71$	0,71	0,78
$CI_{Ts} = -2,24 * T_{-2(okt-nov)} - 1,26 * T_{-1(ápr-jún)} - 2,91 * T_{-1(okt-nov)} - 0,05 * T_{(jún-júl)} + 63,52$	0,54	0,63
$CI_{Ps} = 0,06 * P_{-2(okt-nov)} + 0,04 * P_{-1(máj-jún)} + 0,02 * P_{(ápr-jún)} - 2,49$	0,46	0,54
$CI_{TPs} = -0,03 * P_{-2(júl-szept)} - 2,23 * T_{-2(okt-nov)} - 2,97 * T_{-1(okt-nov)} + 0,04 * P_{(feb-ápr)} - 0,01 * P_{(ápr-jún)}$ $-0,41 * T_{(jún-júl)} + 57,86$	0,66	0,75
$CI_{TPsm} = 1,09 * T_{-2(okt)} + 0,1 * P_{-2(nov)} - 1,21 * T_{-1(ápr-jún)} + 0,03 * P_{-1(máj-jún)} - 1,32 * T_{-1(okt-nov)} +$ $0,06 * P_{(ápr)} - 0,01 * P_{(jún)} - 1,1 * T_{(jún)} + 34,86$	0,72	0,82

Az időszaki additív hőmérsékleti klímaindexre (CI_{Ts}) számított korigált determinációs együttható értéke 0,54, ami egy kissé nagyobb, mint a havi komponensekre kapott érték. Az időszaki csapadék komponensekkel képzett additív indexre (CI_{Ps}) számított korigált determinációs együttható értéke pedig 0,46, ez viszont egy kicsivel alacsonyabb, mint a havi csapadék komponensek vonatkozásában. Vagyis az időszaki klímaindex esetében a hőmérsékletnek van erősebb hatása. Amennyiben az időszaki hőmérséklet és csapadék paraméterek additív hatását (CI_{TPs}) tekintjük, akkor nem adódott szorosabb összefüggés ($R^2_{adj}=0,66$), mint a havi komponensek esetében.

A havi és az időszaki komponensek összevonásával kapott modellre (CI_{TPsm}) számított korigált determinációs együttható értéke 0,72, ami határozott összefüggést mutat. A mért és a modellel számított évenkénti körlapnövedékek hasonló karakterisztikájú futásait mutatja a 6. ábra (felső grafikon a CI_{TPm} , a középső a CI_{TPs} , az alsó a CI_{TPsm}). Egyértelműen látható, hogy egy-két évtől (pl. 1991) eltekintve a modellezett értékek szignifikancia-sávjába esnek a tényleges mérési adatok.

Elemeztük a havonkénti növekedés meteorológiai adatokkal való kapcsolatát. Már a töréspont-elemzésnél rámutattunk arra, hogy az egyes klímaadatok évenkénti alakulásában bekövetkezett markáns változások esetleg a növekedésben is visszatükröződnek. Ez azonban természetesen nem törvényszerű. Ha az eredményeket ebből a szempontból összevetjük, akkor jól látszik, hogy pl. a júniusi növekedésben a 2000. évtől jelentős csökkenés következett be. Előtte két évvel, 1998-tól a júniusi csapadék alakulásában is markáns változás következett be, aminek késleltetett hatása érzékelhető a növedék későbbi időpontban bekövetkező változásában. A hőmérséklet pedig még előbb, már 1992-től melegebbre fordult, aminek hatása később szintén hozzájárulhatott a júniusi növedék változásához. Lineáris korreláció-analízissel ezért megvizsgáltuk, hogy milyen összefüggés áll fenn az egyes hónapok csapadék- és hőmérsékletadatai és az egyes hónapok növedékadatai között. Az 5. táblázatban látható, hogy a májusi és júniusi növekedés szignifikánsan függ a hónapok átlagos hőmérsékletétől és csapadéknagyságától. Május, június, július és augusztus esetében tárgyható körlapnövedékére a tárgyható és az azt megelőző hónap átlaghőmérséklete még erősebb hatású, mint a tárgyhatóé. A korrelációs együttható előjeléből az is látszik, hogy amíg a májusi hőmérséklet emelkedése pozitívan hat a körlapnövedékre, addig a rákövetkező hónapok hőmérséklete éppen ellenkező hatású, vagyis a hőmérséklet-emelkedés már növedék-csökkenéssel jár együtt.



6. ábra: A körlapnövedékek mért és a modell alapján számított értékeinek futása ($n=22$, $p<0,001$)

Figure 6: Variation of the measured and modeled BAI for the models CI_{TPM} , CI_{TPS} and CI_{TPSM} ($n=22$, $p<0,001$)

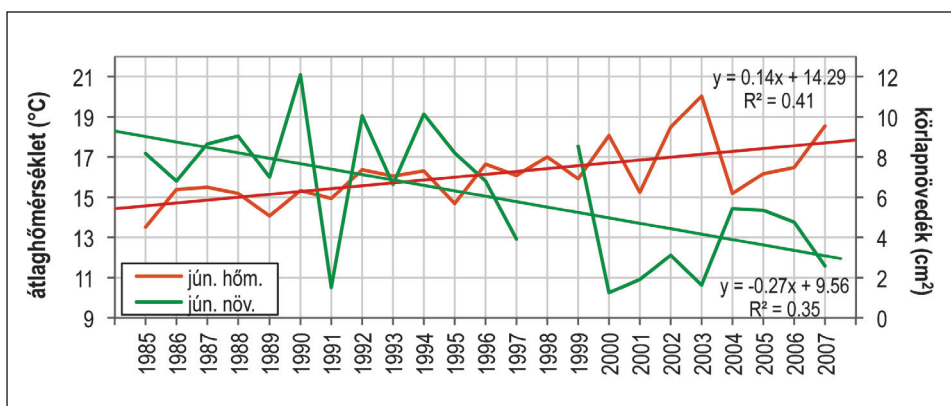
5. táblázat: A havonkénti körlapnövedék, valamint a havi csapadék- és hőmérsékletadatok korrelációs együtthatói (*: $p<0,1$ szinten, **: $p<0,05$ szinten szignifikáns)

Table 5: The correlation (r) between the monthly basal area increment and monthly average temperature and precipitation sum (*: significant at $p<0,1$; **: significant at $p<0,05$)

Meteorológiai paraméterek	Hónapok						
	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.
Tárgyhó csapadékösszege	0,301	-0,371*	0,507**	-0,245	0,264	0,415*	-0,047
Tárgyhó és megelőző hónap csapadékösszege	0,266	-0,125	0,250	0,236	0,288	0,167	-0,162
Tárgyhó átlaghőmérséklete	0,196	0,392*	-0,506**	-0,051	-0,321	-0,273	-0,050
Tárgyhó és megelőző hónap átlaghőmérséklete	0,315	0,653**	-0,412*	-0,488**	-0,489**	-0,157	-0,028

Méréseink alapján a két legnagyobb növekedést mutató hónap a május és a június. Az előbbiben 22 év átlagában a körlapnövedék $5,02 \text{ cm}^2$ (az éves növekedés 28%-a), az utóbbiban pedig $6,08 \text{ cm}^2$ (az éves növe-

kedés 34%-a). Amíg azonban májusban nem figyelhető meg trendszerű változás, addig a júniusi növekedés trendszerű csökkenést mutat. Ennek köszönhető, hogy amíg a mérési periódus első 11 évében az átlagos körlapnövedék júniusban (8,03 cm²) csaknem duplája a májusinak (4,84 cm²), addig a második 11 évben a májusi átlagos növedék (5,20 cm²) már nagyobb a júniusénál (4,12 cm²). A változás összefügg a júniusi átlaghőmérséklet trendszerű növekedésével, ill. a júniusi körlapnövedék trendszerű csökkenésével (6. ábra). Májusban az átlaghőmérséklet és a körlapnövedék között pozitív összefüggés áll fenn, azonban júniusban éppen fordított a helyzet. Az eredmények aláhúzzák a május, június hónapok kiemelkedő szerepét a bükk szervesanyag-képzésében, ami egybecseng más szerzők dendrokronológiai elemzéseivel (Járó és Tátraaljai 1985; Dittmar és mtsai 2003; Lebourgeois és mtsai 2005; Di Filippo és mtsai 2007). Ez a helyzet azt mutatja, hogy a 2000-es években az intenzív növekedési szakasz előbb kezdődött, ami a mérési helyen a szubmediterrán klímahatás érvényesülését, ill. erősödését vetíti előre, és ez a bükk elterjedését is jelentősen befolyásolni fogja (Stojanović és mtsai 2013). Várható ezért, hogy a klímaváltozás előrejelzés szerinti előrehaladásával, azaz amikor Magyarországon a nyári hőmérséklet még inkább emelkedni fog, már nemcsak növedékvesztés, hanem a fák vitalitásának és ellenálló-képességének drasztikus csökkenése is bekövetkezhet.



7. ábra: Júniusi átlaghőmérséklet és a növedék változásainak kapcsolata

Figure 7: Trends of the average temperature of June and the basal area increment of June

ÖSSZEFOGLALÁS

A vizsgált állomány időjárása a FAI (Führer 2010; Führer és mtsai 2011a) szerinti erdészeti klímaosztályozás alapján egyértelműen bükkös klímájú. A 80-as évek végétől azonban egy markáns változás figyelhető meg. Ha a klímaváltozás előrejelzésénél viszonyításként elfogadott 30 éves időszakot (1961–1990) tekintjük, akkor a rákövetkező 17 évben a csapadék nagysága a kezdeti növekedési időszakaszban 10%-kal, a fő növekedési időszakaszban csaknem 3%-kal, ezen belül az intenzív növekedési időszakaszban pedig 14%-kal csökkent a kísérleti területen. A csökkenés mértéke már most nagyobb, mint amit a REMO modell (Gálos és mtsai 2007) szerint a 2035-től 2065-ig terjedő időszakra átlagosan előre jeleznek. Ugyanakkor a hőmérséklet trendszerűen emelkedett szinte valamennyi éven belüli növekedési időszakasz alatt. E változás a kezdeti növekedési periódusban +0,7 °C, a fő növekedési időszakaszban pedig már +1,2 °C. A töréspont-vizsgálat alapján a mérési periódus alatt a klímában markáns, egyértelműen kimutatható változás állt be, ami a növekedés változásában is megmutatkozott. A 2000-ig tartó és az azt követő periódus klíma- és növedékadatai közötti összefüggés erőssége és iránya is megváltozott. Ezt szemlélteti a növekedés és az erdészeti szárazsági index (FAI), valamint az Ellenberg index (EQ) közötti összefüggés (6. táblázat). Vagyis amíg a klíma a bükk számára

kedvező volt (1984–1998), azaz egyértelműen bükkös klíma uralkodott (FAI=4,01), addig szignifikánsan csak a FAI-ban lévő csapadékösszeg (V., VI., VII. és VIII. hónapok) hatott az éves növekedésre. Ha növekedett a nyári csapadék összege, akkor ez negatívan hatott a szervesanyag-képzésre. Miután az időjárás 2000-tól szárazabb és melegebb lett, azaz a FAI (4,82) átlagos értéke alapján a klíma már a bükkös és a gyertyános-tölgyes klíma átmenetére jellemző, az évenkénti klímparaméterek már szignifikánsan befolyásolták a növekedés nagyságát. Ezek az eredmények alátámasztják Mátyás (2010), továbbá Garamszegi és Kern (2014) méréseit, miszerint ha a bükk elterjedésének szárazsági határhelyzetébe kerül, akkor a klímaérzékenysége növekszik. Ez azonban nem csak az egészségi állapotromlás, vagy a mortalitás fokozódásában, hanem a növekedés mértékének csökkenésében, ezen keresztül pedig az erdőgazdálkodás alacsonyabb jövedelmezőségében is megnyilvánul (Führer és mtsai 2013).

6. táblázat: A havonkénti körlapnövedék, valamint a szárazsági indexek (FAI, EQ) és az azokban figyelembe vett csapadék (P) és hőmérséklet (T) adatok közötti korrelációs együtthatók (*: $p < 0,1$ szinten, **: $p < 0,05$ szinten szignifikáns)

Table 6: The correlation (r) between the monthly basal area increment and the aridity indices (FAI, EQ) and their precipitation (P) and temperature (T) components (*: significant at $p < 0,1$; **: significant at $p < 0,05$)

	P_(FAI)	P_(EQ)	T_(FAI)	T_(EQ)	FAI	EQ
1985–1999	-0,50*	-0,23	0,10	0,15	0,29	0,27
2000–2007	0,48	0,40	-0,75**	-0,37	-0,69*	-0,55

Amennyiben a REMO modell klímaváltozási forgatókönyve szerint a csapadékcsökkenés és a hőmérséklet-emelkedés tovább folytatódik, akkor a vizsgált állomány környezetében a bükkösök életfeltételei oly mértékben változnak meg, hogy azok hatására nemcsak növedékcsökkenés lesz megfigyelhető, hanem a fafaj léte is megkérdőjeleződik.

Eredményeink alapján beigazolódott, hogy egy adott év körlap-növekedését a tárgyév mellett az azt megelőző két év időjárása határozza meg. A havi és az időszaki komponensek összevonásával kapott regressziós modellre (CI_{TPsm}) számított korrigált determinációs együttható (R^2_{adj}) értéke 0,72, ami határozott összefüggést mutat. Azt, hogy az egyes évek mely hónapjai játszanak nagyobb szerepet a növekedés szempontjából, nemcsak a klímparaméterek, hanem a fák genetikai tulajdonságai is befolyásolják. Ezért lehetséges, hogy amíg a Magyarországgal szomszédos Szlovéniában a tárgyév májusi és júliusi csapadékának van szignifikáns hatása a növekedésre (Čufar és mtsai 2008), addig Sopronban, ahol az éves csapadék kisebb és az éves átlaghőmérséklet alacsonyabb, az áprilisi és júniusi csapadék a meghatározó. Vagy amíg Németországban a tárgyév és a tárgyévet megelőző év júliusának hőmérséklete döntő a vastagsági növekedés szempontjából (Gruber 2002) addig Sopronban a tárgyév és az előző év júniusi hőmérséklete a meghatározó. Sajnos a fafiziológiai kutatások nem tudnak még kielégítő magyarázatot adni arra, hogy az egyes évek szervesanyag-képzést meghatározó klímajelei (havi és időszaki komponensek) milyen biokémiai folyamatokon keresztül fejtik ki később hatásukat. Ezért olyan klímaindex, ami hatásában, azaz összefüggés szempontjából mindenhol egyformán használható, csak fenntartásokkal képezhető.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kiértékelés az OTKA 80305 és 80335 számú, továbbá a NAIK KFI (RD011-12) és a „Föld-rendszer adatok tudományos feldolgozása és az ismeretek társadalmisítása korszerű informatikai eszközök segítségével” című TÁMOP-4.2.2.C–11/1/KONV-2012-0015 számú projekt keretében, az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg. Köszönet a Magyar Tudományos Akadémia „Lendület” programjának támogatásáért is.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- Bartholy, J.; Pongrácz, R.; Torma, Cs.; Pieczka, I.; Kardos, P. and Hunyady, A. 2009: Analysis of regional climate change modelling experiments for the Carpathian basin. *International Journal of Global Warming*, 1: 238-252. DOI: [10.1504/ijgw.2009.027092](https://doi.org/10.1504/ijgw.2009.027092)
- Berki, I.; Rasztoivits, E.; Mórnicz, N. and Mátyás, Cs. 2009: Determination of the drought tolerance limit of beech forests and forecasting their future distribution in Hungary. *Cereal Research Communications*, 37: 613-616.
- Borovics, A. and Mátyás, Cs. 2013: Decline of genetic diversity of sessile oak at the retracting (xeric) limits. *Annals of Forest Science*, 70 (8): 835-844. DOI: [10.1007/s13595-013-0324-6](https://doi.org/10.1007/s13595-013-0324-6)
- Bräker, O.U. 1996: Growth trends of Swiss forests: Tree-ring data. Case study Toppwald. In: Spiecker, H.; Mielikäinen, K.; Köhl, M. and Skovsgaard, J.P. (eds): *Growth trends in European forests*. Springer Berlin, Heidelberg. 199-217. DOI: [10.1007/978-3-642-61178-0_16](https://doi.org/10.1007/978-3-642-61178-0_16)
- Briffa, K.R.; Osborn, J.T.; Schweingruber, H.F.; Jones, D.P.; Shiyatov, G.S. and Vaganov, A.E. 2002: Tree-ring width and density data around the Northern Hemisphere: Part 1, local and regional climate signals. *The Holocene*, 12: 737-757. DOI: [10.1191/0959683602hl587rp](https://doi.org/10.1191/0959683602hl587rp)
- Büntgen, U.; Frank C.D.; Schmidhalter, M.; Neuwirth, B.; Seifert, M. and Esper, J. 2006: Growth/climate response shift in a long subalpine spruce chronology. *Trees*, 20: 99-110. DOI: [10.1007/s00468-005-0017-3](https://doi.org/10.1007/s00468-005-0017-3)
- Csóka Gy. 1996: Aszályos évek – fokozódó rovarkárok erdeinkben. *Növényvédelem*, 32: 541-551.
- Csóka, Gy. 1997: Increased insect drought impact damage in Hungarian forests under drought impact. *Biologia*, 52: 159-162.
- Csóka Gy.; Koltay A.; Hirka A. és Janik G. 2009. Az aszályosság hatása kocsánytalan tölgyeseink és bükköseink egészségi állapotára. „Klíma-21” Füzetek, 57: 64-73.
- Čufar, K.; Prislán, P.; de Luis, M. and Gričar, J. 2008: Tree-ring variation, wood formation and phenology of beech (*Fagus sylvatica*) from a representative site in Slovenia, SE Central Europe. *Trees*, 22: 749-758. DOI: [10.1007/s00468-008-0235-6](https://doi.org/10.1007/s00468-008-0235-6)
- Czúcz, B.; Gálhidy, L. and 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. DOI: [10.1007/s13595-011-0011-4](https://doi.org/10.1007/s13595-011-0011-4)
- Czúcz B.; Gálhidy L. és Mátyás Cs. 2013: A bükk és a kocsánytalan tölgy elterjedésének szárazsági határa. *Erdészettudományi Közlemények*, 3 (1): 39-53.
- Di Filippo, A.; Biondi, F.; Čufar, K.; De Luis, M.; Grabner, M.; Maugeri, M.; Presutti Saba, E.; Schirone, B. and 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. DOI: [10.1111/j.1365-2699.2007.01747.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2007.01747.x)
- Dittmar, C.; Zech, W. and 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 (1-3): 63-78. DOI: [10.1016/s0378-1127\(01\)00816-7](https://doi.org/10.1016/s0378-1127(01)00816-7)
- Edelenyi M.; Pödör Z. és Jereb L. 2011: Transzformált adatsorok alkalmazása a fák növekedése és az időjárási paraméterek kapcsolatának vizsgálatában. *Agrárinformatika*, 2: 39-48.
- Faragó, T.; Láng, I. and Csete, L. (eds) 2010: *Climate change and Hungary: mitigating the hazard and preparing for the impacts (the „VAHAVA” Report)*. http://www.preventionweb.net/files/18582_thevahavareport08dec2010.pdf
- Führer E. 1994: Csapadékmérések bükkös-, kocsánytalan tölgyes és lucfenyves ökoszisztémákban. *Erdészeti Kutatások*, 84: 11-35.
- Führer E. 1995: Az időjárás változásának hatása az erdők fatermőképességére és egészségi állapotára. *Erdészeti Lapok*, 130 (6): 176-178.
- Führer E. 2010: A fák növekedése és a klíma. „KLÍMA-21” Füzetek, 61: 98-107.
- Führer, E. und Járó, Z. 1992: Auswirkungen der Klimaänderung auf die Waldbestände Ungarns. *Österreichische Forstzeitung*, 9: 25-27.
- Führer, E.; Horváth, L.; Jagodics, A.; Machon, A. and Szabados, I. 2011a: Application of a new aridity index in Hungarian forestry practice. *Időjárás*, 115 (3): 103-118.
- Führer E.; Marosi Gy.; Jagodics A. és Juhász I. 2011b. A klímaváltozás egy lehetséges hatása az erdőgazdálkodásban. *Erdészettudományi Közlemények*, 1 (1): 17-28.

- Führer, E.; Jagodics, A.; Juhász, I.; Marosi, Gy. and Horváth, L. 2013: Ecological and economical impacts of climate change on Hungarian forestry practice. *Időjárás*, 117 (2): 159-174.
- Führer, E.; Edelényi, M.; Horváth, L.; Jagodics, A.; Jereb, L.; Kern, Z.; Moring, A.; Szabados, I. and Pödör, Z. 2016: Effect of weather conditions on annual and intra-annual basal area increments of a beech stand in the Sopron Mountains in Hungary. *Időjárás*, 120 (2): 127-161.
- Garamszegi, B. and 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. DOI: [10.12657/denbio.072.008](https://doi.org/10.12657/denbio.072.008)
- Gálos, B.; Lorenz, Ph. and Jacob, D. 2007: Will dry events occur more often in Hungary in the future? *Environmental Research Letters*, 2: 034006. DOI: [10.1088/1748-9326/2/3/034006](https://doi.org/10.1088/1748-9326/2/3/034006)
- Gálos, B.; Jacob, D. and Mátyás, Cs. 2011: Regional characteristics of climate change altering effects of afforestation. *Environmental Research Letters*, 6 (4): 044010. DOI: [10.1088/1748-9326/6/4/044010](https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/4/044010)
- Gálos, B.; Häsler, A.; Kindermann, G.; Rechid, D.; Sieck, K. and Jacob, D. 2012: The role of forests in mitigating climate change – a case study for Europe. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*, 8: 87-102.
- Gruber, F. 2002: Wachstum von Altbuchen (*Fagus sylvatica* L.) auf einem Kalkstandort (Göttinger/Södderich) in Abhängigkeit von der Witterung. III. Bohrkenanalysen. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, 173 (7/8): 117-122.
- Gruber, F. 2004: Die Steuerung des sogenannten „Blattverlust“ der Buche (*Fagus sylvatica* L.) durch die Witterung. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, 175 (4/5): 83-94.
- Gutiérrez, E.; Campelo, F.; Julio Camarero, J.; Ribas, M.; Muntán, E.; Nabais, C. and Freitas, H. 2011: Climate controls act at different scales on the seasonal pattern of *Quercus ilex* L. stem radial increments in NE Spain. *Trees*, 25: 637-646. DOI: [10.1007/s00468-011-0540-3](https://doi.org/10.1007/s00468-011-0540-3)
- Halupa L.-né 1967: Adatok a sziki tölgyesek növekedési menetének vizsgálatából. *Erdészeti Kutatások*, 63: 95-108.
- Hasenauer, H.; Nemani, R. R.; Schadauer, K. and Running, S. W. 1999: Forest growth response to changing climate between 1961 and 1990 in Austria. *Forest Ecology and Management*, 122: 209-219. DOI: [10.1016/s0378-1127\(99\)00010-9](https://doi.org/10.1016/s0378-1127(99)00010-9)
- Hirka A. és Csóka Gy. 2010: Abiotikus károk Magyarország erdeiben. *Növényvédelem*, 46 (11): 513-517.
- Járó Z. és Tátraaljai E.-né 1985: A fák éves növekedése. *Erdészeti Kutatások*, 76-77: 221-234.
- Kahle, H.P. 2008: Causes and consequences of forest growth trends in Europe: Results of the Recognition Project. Brill, Boston. DOI: [10.1163/ej.9789004167056.i-261](https://doi.org/10.1163/ej.9789004167056.i-261)
- Klapwijk, M.J.; Csóka, Gy.; Hirka, A. and Björkman, C. 2013: Forest insects and climate change: long-term trends in herbivore damage. *Ecology and Evolution*, 3 (12): 4183-4196. DOI: [10.1002/ece3.717](https://doi.org/10.1002/ece3.717)
- Kern, Z. and Popa, J. 2007: Climate-growth relationship of tree species from a mixed stand of Apuseni Mts., Romania. *Dendrochronologia*, 24 (2-3): 109-115. DOI: [10.1016/j.dendro.2006.10.006](https://doi.org/10.1016/j.dendro.2006.10.006)
- Kozłowski, T.T.; Kramer, P.J. and Pallardy, S.G. 1991: The physiological ecology of woody plants. Academic Press, San Diego, Toronto. DOI: [10.1016/c2009-0-02706-8](https://doi.org/10.1016/c2009-0-02706-8)
- Lakatos, F. and Molnár, M. 2009: Mass mortality of beech (*Fagus sylvatica* L.) in South-West Hungary. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*, 5: 75-82.
- Larcher, W. 2001: Ökophysiologie der Pflanzen. 6. Aufl. Stuttgart, Ulmer.
- Lebourgeois, F.; Bréda, N.; Ulrich, E. and Granier, A. 2005: Climate–tree-growth relationships of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in the French permanent plot network (RENECOFOR). *Trees*, 19: 385-401. DOI: [10.1007/s00468-004-0397-9](https://doi.org/10.1007/s00468-004-0397-9)
- Liming, F.G. 1957: Homemade dendrometers. *Journal of Forestry*, 55 (8): 575-577.
- Manninger M. 2004: Erdei fák éves és korszaki növekedésmenete és kapcsolódása egyes ökológiai tényezőkhez. In: Mátyás Cs. és Vig P. (szerk.): Erdő és klíma IV. Nyugat-Magyarországi Egyetem, Sopron, 151-162.
- Manninger M.; Edelényi M.; Pödör Z. és Jereb L. 2011: Alkalmazott elemzési módszerek a környezeti tényezők fák növekedésére gyakorolt hatásának vizsgálatában. *Erdészettudományi Közlemények*, 1 (1): 59-70.
- Mares, C. and Mares, I. 1994: Climate change-points in the precipitation time series from Romania. 176-180. In: Atmospheric Physics and Dynamics in the Analysis and Prognosis of Precipitation Fields (Proceedings of the meeting). Rome.
- Mátyás, Cs. 2010: Forecasts needed for retreating forests. *Nature*, 464: 1271. DOI: [10.1038/4641271a](https://doi.org/10.1038/4641271a)
- Mátyás, Cs.; Vendramin, G.G. and Fady, B. 2009: Forests at the limit: evolutionary-genetic consequences of environmental changes at the receding (xeric) edge of distribution. *Annals of Forest Science*, 66 (8): 800-803. DOI: [10.1051/forest/2009081](https://doi.org/10.1051/forest/2009081)
- Mátyás, Cs.; Nagy, L. and Ujvári-Jármay, É. 2010a: Genetically set response of trees to climatic change, with special regard to the xeric (retreating) limits. *Forstarchiv*, 81: 130-141.

- Mátyás, Cs.; Berki, I.; Czúcz, B.; Gálos, B.; Móricz, N. and Rasztoivts, E. 2010b: Future of beech in Southeast Europe from the perspective of evolutionary ecology. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*, 6: 91-110.
- Mátyás Cs.; Führer E.; Berki I.; Csóka Gy.; Drüsler Á.; Lakatos F.; Móricz N.; Rasztoivts E.; Somogyi Z.; Veperdi G.; Vig P. és Gálos B. 2010c: Erdők a szárazsági határon. „KLÍMA-21” Füzetek, 61: 84-97.
- Mátyás, Cs.; Berki, I.; Czúcz, B.; Gálos, B.; Móricz, N. and Rasztoivts, E. 2011: Assessment and projection on climate change impacts in SE European forests. a case study of common beech (*Fagus sylvatica* L.). *Revija za Lesno Gospodarstvo*, 63: 142-153.
- Maxime, C. and Hendrik, D. 2010: Effects of climate on diameter growth of co-occurring *Fagus sylvatica* and *Abies alba* along an altitudinal gradient. *Trees*, 25 (2): 265-276. DOI: [10.1007/s00468-010-0503-0](https://doi.org/10.1007/s00468-010-0503-0)
- Menzel, L. and Fabian, P. 1999: Growing season extended in Europe. *Nature*, 397: 659. DOI: [10.1038/17709](https://doi.org/10.1038/17709)
- Molnár J. és Izsák T. 2011: Trendek és töréspontok a léghőmérséklet kárpátaljai idősoraiiban. *Légekör*, 56 (2): 49-54.
- Molnár M. és Lakatos F. 2009: Bükkpusztulás Zala megyében. „KLÍMA-21” Füzetek, 57: 74-82.
- Móricz, N., Rasztoivts, E., Gálos, B., Berki, I., Eredics, A. and Loibl, W. 2013: Modelling the potential distribution of three climate zonal tree species for present and future climate in Hungary. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*, 9: 85-96. DOI: [10.2478/aslh-2013-0007](https://doi.org/10.2478/aslh-2013-0007)
- Novák, J.; Slodičák, M.; Kacálek, D. and Dušek, D. 2010: The effect of different stand density on diameter growth response in Scots pine stands in relation to climate situations. *Journal of Forest Science*, 56 (10): 461-473.
- Pichler, P. and Oberhuber, W. 2007: Radial growth response of coniferous forest trees in an inner Alpine environment to heat-wave in 2003. *Forest Ecology and Management*, 242: 688-699. DOI: [10.1016/j.foreco.2007.02.007](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.02.007)
- Pieccka, I.; Pongrácz, R. and Bartholy, J. 2011: Comparison of simulated trends of regional climate change in the Carpathian Basin for the 21st century using three different emission scenarios. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*, 7: 9-22.
- Pödör, Z., Edelényi, M. and Jereb, L. 2014: Systematic analysis of time series – CReMIT. *Infocommunication Journal*, 6 (1): 16-22.
- Pretzsch, H. 1992: Zunehmende Unstimmigkeit zwischen erwartetem und wirklichem Wachstum unserer Waldbestände. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 111: 336-382. DOI: [10.1007/bf02741687](https://doi.org/10.1007/bf02741687)
- Rasztoivts, E.; Móricz, N.; Berki, I.; Pötzelsberger, E. and Mátyás, Cs. 2012: Evaluating the performance of stochastic distribution models for European beech at low-elevation xeric limits. *Időjárás*, 116 (3): 173-194.
- Scharnweber, T.; Manthey, M.; Criegee, C.; Bauwe, A.; Schroder, C. and Wilmking, M. 2011: Drought matters – Declining precipitation influences growth of *Fagus sylvatica* L. and *Quercus robur* L. in north-eastern Germany. *Forest Ecology and Management*, 262 (6): 947-961. DOI: [10.1016/j.foreco.2011.05.026](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.05.026)
- Sneyers, R. 1992: On the use of statistical analysis for the objective determination of climate change. *Meteorologische Zeitschrift*, 1 (5): 247-256.
- Solyomos R. 2009: A klímaváltozás hatása az erdők fanövedékére. „Klíma-21” Füzetek, 56: 43-47.
- Somogyi, Z. 2008: Recent trends of tree growth in relation to climate change in Hungary. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*, 4: 17-27.
- Somogyi Z. 2009. A klíma, a klímaváltozás és a fanövekedés néhány összefüggése. „Klíma-21” Füzetek, 56: 48-56.
- Spiecker, H.; Mielkainen, K.; Köhl, M. and Skovsgaard, J.P. (eds) 1996: Growth trends in European forests. Springer, Berlin. DOI: [10.1007/978-3-642-61178-0](https://doi.org/10.1007/978-3-642-61178-0)
- Stojanović, D.B.; Kržič, A.; Matović, B.; Orlović, S.; Duputic, A.; Djurdjević, V.; Galic, Z. and Stojnić, S. 2013: Prediction of the European beech (*Fagus sylvatica* L.) xeric limit using a regional climate model: An example from southeast Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 176: 94-103. DOI: [10.1016/j.agrformet.2013.03.009](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.03.009)
- Szabados I. 2004: A kocsánytalantölgy évgyűrűszélessége és a különféle csapadékösszegek kapcsolata. *Erdészeti Kutatások*, 91: 19-25.
- Szabados, I. 2006: The effect of the precipitation on the tree ring width. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 1 (2): 39-44.
- Szőnyi L. 1962: Adatok néhány fafaj vastagsági növekedéséhez. *Az Erdő*, 11: 289-300.
- Zingg, A 1996: Diameter and basal area increment in permanent growth and yield plots in Switzerland. 239-265. In: Spiecker, H.; Mielkainen, K.; Köhl, M. and Skovsgaard, J.P. (eds): Growth trends in European forests. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: [10.1007/978-3-642-61178-0_18](https://doi.org/10.1007/978-3-642-61178-0_18)

Érkezett: 2016. július 6.

Közlésre elfogadva: 2016. szeptember 27.