



MAGYAR AGRÁR- ÉS ÉLETTUDOMÁNYI EGYETEM

**VADON ÉLŐ NÖVÉNYFAJOK *EX SITU* FENOLÓGIAI VIZSGÁLATA,  
ILLETVE AZ ADATOK ÖSSZEVETÉSE HAZAI ÉS NEMZETKÖZI  
ADATSOROKKAL**

**Doktori (PhD) értekezés**

**VERBÉNYINÉ NEUMANN KRISZTINA**

**Gödöllő**

**2024**

**A doktori iskola:**

**megnevezése:** Környezettudományi Doktori Iskola

**tudományága:** Környezettudományok

**vezetője:** Csákiné Prof. Dr. Michéli Erika  
egyetemi tanár  
Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem  
Környezettudományi Intézet  
Talajtani Tanszék

**témavezető:** Prof. Dr. Czóbel Szilárd  
egyetemi tanár  
Szegedi Tudományegyetem  
Mezőgazdasági Kar,  
Növénytudományi és Környezetvédelmi Intézet

.....

Prof. Dr. Michéli Erika

Az iskolavezető jóváhagyása



.....

Prof. Dr. Czóbel Szilárd

A témavezető jóváhagyása

# Tartalom

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK.....	5
1.1 A téma aktualitása, jelentősége – növényfajok, fenológiájuk és a klímaváltozás.....	5
1.2 Célkitűzés.....	7
2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS .....	8
2.1 A klímaváltozás regionális vonatkozásai.....	8
2.2 A fenológia kutatásának rövid története .....	16
2.3 Fenológia és klímaváltozás .....	20
2.4 A vizsgált életformákhoz kapcsolódó fenológiai kutatások .....	28
2.5 A botanikus kertek szerepe .....	34
3. ANYAG ÉS MÓDSZER .....	40
3.1 Vizsgálati helyszínek.....	40
3.2 Kísérleti növények.....	40
3.3 Kísérleti növények fenntartása .....	43
3.4 Fenológiai adatgyűjtés.....	44
3.5 Meteorológiai adatok.....	46
3.5.2 A meteorológiai állomások adatai .....	46
3.6 Statisztikai elemzés .....	49
4. EREDMÉNYEK ÉS MEGVITATÁSUK.....	51
4.1 A vizsgált életformák fenológiai paraméterei.....	51
4.1.1 Fanerofitonok .....	51
4.1.2 Geofitonok.....	61
4.1.3 Terofitonok .....	69
4.1.4 Hemiterofitonok .....	75
4.1.5 Hemikriptofitonok.....	81
4.1.6 Chamefitonok .....	86
4.2 Életformák összehasonlítása .....	89
5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK .....	92
6. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK .....	96
7.1 ÖSSZEFOGLALÁS.....	97
7.2 SUMMARY .....	99
8. IRODALOMJEGYZÉK.....	101
9. MELLÉKLETEK .....	120
1. melléklet: A vizsgált növényfajok összesítő jellemzése .....	120
2. melléklet: A cserepekben használt talajkeverék vizsgálatának eredményei .....	122
3. melléklet: 2020. év összesített meteorológiai adatai.....	123
4. melléklet: 2021. év összesített meteorológiai adatai.....	124

5. melléklet: 2022. év összesített meteorológiai adatai.....	125
6. melléklet: A vizsgált Fanerofitonok regressziószámításának eredménytáblázata .....	126
7. melléklet: A vizsgált Fanerofitonok magassági adatai.....	131
8. melléklet: A vizsgált Fanerofitonok törzsátmérő adatai.....	135
10. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS .....	136

# 1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

## 1.1 A téma aktualitása, jelentősége – növényfajok, fenológiájuk és a klímaváltozás

A klímaváltozás komoly hatással van a földi életközösségekre (Peñuelas et al. 2017), ez a hatás Európa élővilágát is érinti (Begum et al. 2022). Kontinensünkön 2080-ra az edényes növényfajok több mint fele válhat veszélyeztetetté e hatások következtében (Thuiller et al. 2005). A **klímaváltozás** tehát beláthatatlan következményekkel bír ökoszisztémáinkra nézve. Korunkban az ökológia egyik fő célja annak előrejelzése, hogy a fajok és az ökoszisztémák hogyan reagálnak az éghajlatváltozásra. A **fenológia** a ciklikus biológiai folyamatokat, azok kiváltó és befolyásoló (biotikus és abiotikus) tényezőit, valamint az azonos vagy különböző fajok fenofázisai közötti kölcsönhatásokat vizsgáló tudomány (Lieth 1974). A növényfajok fenológiája érzékeny a klímaváltozásra, így jó **indikátora** annak (Sparks & Menzel 2002, Cleland et al. 2007, Schwartz 2013, Peñuelas et al. 2017). A fenológiai vizsgálatok mára előkelő helyet foglalnak el a globális klímaváltozás kutatásában, köszönhetően annak, hogy az így nyert eredményekkel lehetséges előrejelezni a ciklikus jelenségek bekövetkeztének idejét (Morellato et al. 2016). A klímaváltozás fenológiai modelleken keresztüli **előrejelzésének lehetőségei** azonban még mindig igen korlátozottak (Zhao et al. 2013), így nagyon nagy szükség van a további kutatásokra.

Bár fenológiai kutatásokat már az ókor óta végeztek (Schwartz 2013), jelentőségük akkor nőtt meg igazán, amikor a XX. században a klímaváltozás ténye és hatásai egyre nyilvánvalóbbá váltak (Chmielewski et al. 2013). A fenológiai kutatások száma az 1990-es évek óta rohamosan nő (Chmielewski et al. 2013, Piao et al. 2019), számuk az *app.dimensions.ai* tudományos publikációkat figyelő oldal (Dimensions Software 2018-) adatai szerint az utóbbi négy évtizedben többször megduplázódott, legutóbb az utóbbi 8 évben. A fenológiai témájú tudományos cikkek száma 2022-re meghaladta a 2700-at.

A világszerte végzett fenológiai kutatások többsége **nem követi** nyomon a vizsgált egyedek **teljes éves fenológiai ciklusát** (Katal et al. 2022), mivel utóbbit sokkal nehezebb vizsgálni, mint más, egyszeri adatfelvételezést igénylő növényi jellegeket (Wolkovich et al. 2014). Általánosságban véve a **legtöbb fenológiai kutatás a fásszárúakra** és a gazdaságilag hasznosított növényekre fókuszál (Katal et al. 2022, Horbach et al. 2023). Annak ellenére, hogy becslések szerint a világ növényfajainak több mint 50%-a (FitzJohn et al. 2014) és a mérsékelt égövi ökoszisztémák növényfajainak 85%-a nem fásszárú (Ellenberg 1996), a fenológiai kutatások, különösen a lombhullással és a levelek szenescenciájával kapcsolatban, hagyományosan a fákra és a cserjékre vagy a haszonnövényekre összpontosítottak (Chmielewski & Rötzer 2001, Vitasse et al. 2011, Panchen et al. 2014, 2015). A különböző életformák fenológiai mintázatának a környezeti hatásokra adott válaszai meglepően **kevés kutatás tárgyát képezték**.

A **Kárpát-medence** különösen érzékeny a klímaváltozás hatásaira (Pongrácz et al. 2009, Gálos et al. 2011, Hlásny et al. 2014, Antofie et al. 2015.), így különösen fontos lenne fenológiai kutatásokat végezni a térségben. Ennek ellenére hazánkban nem sok fenológiai kutatás történt (Walkovszky 1998, Eppich et al. 2009, Szabó et al. 2016, Templ et al. 2017). Az Országos Meteorológiai Szolgálat által a XX. század második felében működtetett országos fenológiai adatgyűjtő hálózat is sajnálatos módon megszűnt (Hunkár et al. 2012). Magyarország egyetlen botanikus kertje sem csatlakozott eddig a nemzetközi fenológiai adatgyűjtő hálózatokhoz, így

hazánkban jelenleg semmilyen szervezett keretek között végzett, összehasonlításra is alkalmas fenológiai adatgyűjtés nem történik.

**Hazánkban** tudomásom szerint ez idáig nem készült a Raunkiær-féle életforma-osztályozás szerinti különböző életformákhoz tartozó, vadon élő fajok teljes éves ciklusát több éven át figyelemmel kísérő összehasonlító *ex situ* fenológiai kutatás. A kísérlet beállítása hazai viszonylatban szintén újszerű volt.

Általánosan elfogadott nézet, hogy a **városi éghajlati viszonyok** a változó globális éghajlati viszonyokhoz hasonlóknak tekinthetők; ezért sok kutató az urbanizált területeket a globális klímaváltozás kis léptékű kísérleteiként vagy modelljeként tanulmányozza (Ziska et al. 2003). Ez lehetőséget ad a tér-idő helyettesítés („*space for time substitution*”) módszerének (Pickett 1989) alkalmazására, melyben előrejelezzük a klímaváltozás fenológiára gyakorolt esetleges jövőbeli hatásait (Rötzer et al. 2000, White et al. 2002, Christmann et al. 2023). Az összehasonlító kutatásom számára kiválasztott két helyszín egyaránt egy-egy város területén található, azonban míg a budapesti helyszín egy sűrűn, többemeletes épületekkel beépített, forgalmas városi környezetben található, a gödöllői helyszín az egyetem kampuszának gyéren beépített területén, négyhektáros botanikus kertben, természetes erdőfolt közvetlen szomszédságában, és a tájvédelmi körzethez tartozó erdő közelében található. A budapesti helyszínen így érvényesül a nagyvárosi hőtöbblet hatása. Mivel a kutatások alapján a hőmérséklet tűnik a növények fenológiájára legjobban ható tényezőnek (pl. Cleland et al. 2007, Peñuelas et al. 2009a), a fentieket figyelembe véve a kísérlet számára kiválasztott gödöllői és budapesti helyszín közti fenológiai eltéréseket részben tekinthetjük a **jövőben várható fenológiai változásoknak**.

A két eltérő mezoklimatikus kísérleti helyszínen a – lehetőség szerint – fajonként genetikailag azonos egyedeket – a meteorológiai paraméterek hatásának elkülöníthetőségét zavaró egyéb paraméterek minél hatékonyabb kizárása érdekében – azonos protokoll szerint helyeztem ki és gondoztam. Az adatgyűjtés heti rendszerességgel, szintén azonos protokoll szerint, a két helyszínen lehetőség szerint azonos napon történt. A kísérlet beállítása a nemzetközi fenológiai hálózatok állomásain alkalmazott protokollnak megfelel. Kutatásom tehát hiánypótlónak tekinthető. Jelen munkával a nemzetközi szaktereknek megfelelő, összehasonlító fenológiai kutatások fontosságára szeretném felhívni a hazai szakmai közönség figyelmét.

## 1.2 Célkitűzések

A fentiek alapján a következő célokat tűztem ki.

- A Raunkiær-féle életforma-osztályozás hat életformájának (mikrofanerofiton, chamefiton, hemikriptofiton, geofiton, hemiterofiton, terofiton) életformáinként öt-öt, lehetőleg hazánkban őshonos, vadon élő fajának, két eltérő mezoklimatikus helyszínen három éven át tartó összehasonlító fenológiai vizsgálata.
- *Ex situ* kísérlet beállítása két különböző mezoklimatikus helyszínen, a klimatikus tényezőket befolyásoló egyéb zavaró tényezők lehető legnagyobb mértékű kizárásával. Ennek érdekében a fajonkénti lehető legnagyobb genetikai azonosság szem előtt tartása, azonos talajkeverék alkalmazása, azonos méretű cserepek használata és azonos öntözési protokoll követése.
- Adatgyűjtés a vizsgálatba vont fajok lehető legtöbb fenofázisáról a teljes naptári év során.
- A fenológiai eltérések klimatikus paraméterekkel való összevethetősége érdekében az *ex situ* kísérlet helyszíneire meteorológiai állomások telepítése és meteorológiai adatok (hőmérséklet, csapadék, relatív páratartalom, légnyomás, szélereősség, napsugárzás és szélereősség adatainak) gyűjtése.
- Rögzíteni a vizsgált fajok fenológiájának alakulását fenofázisonként, helyszínenként, valamint ezek alapján megállapítani a vizsgált életformák fenofázisonkénti fenológiai érzékenységét.
- Rögzíteni a vizsgált fajok és életformák fenológiai mintázatában tapasztalható évenkénti eltéréseket a két eltérő mezoklimájú helyszínen.
- Megállapítani a vegetációs időszak hosszának helyszínenkénti alakulását.

Fontos megjegyezni, hogy ugyan a kísérleti növényanyag beszerzésénél törekedtem a fajonkénti lehető legnagyobb genetikai azonosság biztosítására, a különböző fajok nem azonos helyszínről kerültek a kísérletbe, így a fenológiai megfigyeléseknél csak a nevelési helyszín hatását vettem figyelembe, a származási helyszín hatásának figyelembe vétele nem volt a kísérlet célja.

## 2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

### 2.1 A klímaváltozás regionális vonatkozásai

Földünk átlaghőmérséklete emelkedik, mely hatással van a földi életközösségekre (Peñuelas et al. 2017). A bolygó átlaghőmérséklete az ipari forradalmakat megelőző időszakhoz képest mára kb. 1.1 °C-kal emelkedett meg, mely érinti Európa élővilágát is (Begum et al. 2022). A 21. század folyamán további 2–4 °C hőmérséklet-emelkedés várható (IPCC 2013). A Kapcsolt Összehasonlító Modell Projekt 5 (Coupled Model Intercomparison Project 5) előrejelzései szerint Euráziában az 1850. és 2005. között mért évtizedenkénti 0.074 °C hőmérséklet-emelkedéshez képest a 21. században évtizedenkénti 0.08–0.72 °C emelkedés várható (Peng et al. 2019). A hőmérséklet-emelkedés mértéke tehát nagy valószínűséggel meg fogja haladni a Párizsi Éghajlatváltozási Egyezményben kitűzött célokat, melyek a globális átlaghőmérséklet emelkedésének jóval 2 °C alatt tartása az iparosodás előtti szinthez képest ([http1](http://www.unfccc.int/)). Tudva azt, hogy az 1,5 °C hőmérséklet-emelkedéshez képest 2 °C hőmérséklet-emelkedésnél az éghajlatváltozás káros hatásai ugrásszerűen megnőnek (IPCC 2022), ez a jövőkép különösen drámai. A legpesszimistább forgatókönyvek által a XXI. század végére jósolt felmelegedés mértéke azonos nagyságrendű a jégkorszakok leghidegebb időszaka óta bekövetkezett melegedés mértékével (4–7 °C) (Czucz 2009). A megfigyelt hőmérséklet-változások komoly hatással vannak az élőlényekre. E gyors hőmérséklet-emelkedés és egyéb változó környezeti tényezők, mint pl. a légköri CO<sub>2</sub> koncentrációjának emelkedése, változó csapadékmennyiség és – eloszlás drámaian megváltoztatja a növény- és állatfajok, populációk és életközösségek életlehetőségeit az egész bolygón (Walther et al. 2002, Parmesan & Yohe 2003, Root et al. 2003, Walker et al. 2006). A globális felmelegedés hatására csökken a szárazföldi ökoszisztémák által hasznosítható élőhelyek területe, valamint visszafordíthatatlanul megváltozik az ökoszisztémák összetétele (IPCC 2022).

A **földtörténet** során korábban lejátszódott klímaváltozások természetes eredtűek voltak, a mai és feltételezhetően a jövőbeli klímaváltozás fő előmozdítója azonban az emberi hatás (IPCC 1996). A jégkorszakok utáni időszakot is nagymértékű felmelegedés (5–7 °C) és jelentős tengerszint-emelkedés (100 m) jellemezte, ezek a változások azonban 5-10 000 év alatt következtek be, így az élővilágnak volt ideje alkalmazkodni vagy elvándorolni (Schneider 2004). A mai emberi hatások okozta klímaváltozás a korábbi éghajlatváltozásoknál összehasonlíthatatlanul gyorsabban következik be, ezáltal kevéssé valószínű, hogy a paleoklimatikus viszonyok analógok lennének a mai klímaváltozással és mintául szolgálhatnának a jelenleg zajló klímaváltozás hatásainak kutatásához (Cooperative Holocene Mapping Project 1988, Overpeck et al. 1992, Wright et al. 1993, Root et al. 2006).

1988-ban megalakult az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület (IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change), amelynek létrehozását az ENSZ Környezetvédelmi Programja (UNEP) és a Meteorológiai Világszervezet (WMO) kezdeményezte, illetve az ENSZ Közgyűlése az éghajlatváltozással foglalkozó határozatában megerősítette. Célja, hogy értékelje és összefoglalja az emberi tevékenység által kiváltott klímaváltozással kapcsolatos kutatási eredményeket. Saját kutatást nem végez, hanem referált tudományos publikációkat dolgoz fel, és ezek tartalmát jelentéseiben foglalja össze ([http2](http://www.ipcc.ch/)). A szervezet tevékenységét 2007-ben Nobel-díjjal jutalmazták (Czucz 2009) A szervezet 2007-ben kiadott jelentésében az éghajlatváltozás legfontosabb hatásaiként a tengerszint-emelkedést, az óceánok elsavasodását, a az extrém időjárási jelenségek megszorodását, és a biodiverzitás csökkenését jelölte meg. Ez utóbbi esetben kiemelte az élőhelycsökkenést és a fajkihalásokat (IPCC 2007). A Föld ökoszisztémáinak 60% a degradálódott és vizes élőhelyeinek 87% - a tűnt el az éghajlatváltozás,



a környezetszennyezés, valamint a tengerparti és folyótorkolati régiókban folyó városépítés miatt (Nemzeti Természetvédelmi Alapterv 2022). Az IPCC 2013-as jelentése kiemeli továbbá a hó- és jégretegek eltűnését (IPCC 2013).

Az IPCC 2022-es jelentése (IPCC 2022) úra megerősíti azt a megállapítást, hogy a korunkban tapasztalható nagyfokú és gyors klímaváltozás az emberi tevékenységre vezethető vissza. A jelentés megerősíti továbbá, hogy az alkalmazkodás és a mérséklés az éghajlatváltozás kockázatainak csökkentésére és kezelésére szolgáló kiegészítő stratégiák. A jelentés kiemeli, hogy a globális felmelegedés 2030 és 2052 között valószínűleg eléri az 1,5°C-ot, amennyiben a jelenlegi ütemben tovább növekszik. Ahhoz, hogy a felmelegedés ne lépje túl a kidolgozott alkalmazkodási modellekben szereplő 1,5 °C-os emelkedést, az üvegházhatású gázok kibocsátását 2030-ra a 2010-es szinthez képest 45 %-kal kellene csökkenteni. A jég- és hómentes szárazföldi területek több mint 70%-a valamilyen emberi használatban áll. A jelentés felhívja a figyelmet a helyes tájhasználat fontosságára, hiszen a talajviszonyok változásai – akár a földhasználatból, akár az éghajlatváltozásból eredően – hatással vannak a globális és a regionális éghajlatra. Az éghajlatváltozás hátrányosan érinti az élelmezésbiztonságot és a szárazföldi ökoszisztémákat, valamint hozzájárul az elsivatagosodáshoz és a talaj degradációjához számos régióban. A méheket és más beporzókat – amelyek a globális élelmezésbiztonság szempontjából létfontosságúak – egyre nagyobb veszély fenyegeti, mely veszélyt az egyéb káros emberi tevékenységeken kívül a klímaváltozás okoz (Nemzeti Természetvédelmi Alapterv 2022).

Az éghajlatváltozás legszembetűnőbb hatása a fajok földrajzi elterjedésének eltolódása, melyeket, a hőmérséklet- és csapadékviszonyok megváltozása idéz elő. Általánosságban véve 1 °C-os hőmérséklet-változás 160 km-rel tolja északra az biogeográfiai régiókat. Az éghajlatváltozás egyik legjelentősebb hatása a talajnedvesség csökkenése, az aszályveszély növekedése. Összességében a fajok klímaváltozásra való reagálási képessége nagymértékben függ attól, hogy képesek-e „követni” az éghajlat változását az új területeken való megtelepedéssel, vagy hogy képesek-e megváltoztatni életmódjukat (például virágzási vagy párzási időszak), hogy alkalmazkodjanak a eredeti élőhelyük megváltozott körülményeihez. Az éghajlatváltozás a bolygó összes ökoszisztémáját érinti, azonban nem egyforma mértékben és módon. A mediterrán éghajlat életközösségei különösen érzékenyek, mivel a megnövekedett hőmérséklet és a szárazság kedvez a gyepevegetáció és sivatagi életközösségek kialakulásának és fennmaradásának. A hegyvidéken élő fajok szintén igen érzékenyek a megváltozott körülményekre, mivel a fajok felfelé vándorlása csak korlátozott mértékben lehetséges (Thuiller 2007).

A XX. század második felében az északi féltekén a szárazföldi növény- és állatfajok elterjedési területe évtizedenként átlagosan 6,1 km-rel tolódott észak felé, hegyvidékeken évtizedenként 6,1 méterrel felfelé, a fenológiai események pedig évtizedenként átlagosan 2,3–5,1 nappal tolódtak korábbra. Ezek a változások szignifikánsan korrelálnak a hőmérséklet és a csapadék változásaival (Parmesan 2006, Thuiller 2007).

Az éghajlatváltozás hatásainak kutatása igen nehéz feladat, mivel nehéz elválasztani más tényezők hatásaitól. A **különböző tényezők hatásai egymással kölcsönhatásba** is lépnek, sok esetben össze is adódnak (Root et al. 2006, Thuiller 2007). A klímaváltozással kapcsolatos, egyik potenciálisan legsúlyosabb veszélyeztető tényező, mely komoly kihívás elé állítja a természetvédelmet az **élőhelyfragmentáció** és az éghajlatváltozás szinergikus hatása.

A hőmérséklet emelkedésének és a klímaváltozás során megváltozó egyéb tényezők hatására azok a fajok, amelyek nem tudnak a megváltozott körülményekhez alkalmazkodni, megpróbálnak elvándorolni, ahogyan ez a korábbi éghajlatváltozások során is bekövetkezett. A jégkorszaki átmenet során sok faj túlélte a vándorlást és sikeresen elérte a számára megfelelő új élőhelyet. Ma azonban sokszor áthatolhatatlan akadályt jelentenek a vándorlás során az

autópályák, mezőgazdasági területek, ipari parkok és városok (Root et al. 2003, 2006). Egy másik figyelemre méltó probléma, hogy az éghajlatváltozás sok esetben lehetőségeket teremt a korábban ártalmatlan **idegenhonos fajok** számára azáltal, hogy fokozza szaporodási képességüket, túlélésüket és versenyképességüket az őshonos növény- és állatvilággal szemben. Számos faj, köztük a mikroorganizmusok elterjedését mérhetetlenül megnövelte az emberi gazdasági tevékenység és kereskedelem globalizációja. Az éghajlatváltozás, a fajok inváziója és a természetes élőhelyek lecsökkent területeinek kombinációja valószínűleg elősegíti a biotikus homogenizációt, különösen a biológiai sokféleség gócpontjain, és elősegíti a növények, állatok és mikroorganizmusok közötti előre nem látható kölcsönhatásokat (Thuiller 2007). Rövid- és középtávon a természetes élőhelyek fragmentálódása és az invazív fajok terjedése nagy mértékben fenyegeti a biológiai sokféleséget. Amennyiben kitekintünk a távolabbi jövőbe (min. 50 év múlva és azon túl), az éghajlatváltozás hatásai valószínűleg egyre hangsúlyosabbak lesznek a többi tényezőhöz képest (Thuiller 2007). A hőmérséklet-emelkedés és egyéb stressztényezők – különös tekintettel az élőhelyek csökkenésének, fragmentálódásának – hatásai összeadódnak, ezáltal megszakadhatnak a fajok közti kapcsolatok, mely a társulások, életközösségek átformálódásához, és végső soron számos kihaláshoz vezethet (Root et al. 2003).

A különböző **modellek** különböző előrejelzéseket adnak a fajok elterjedésére vagy a biológiai sokféleségre vonatkozóan hasonló környezeti változási forgatókönyvek esetén, megmutatva korlátaikat. Nem könnyű pontosan előrejelezni az összetett kölcsönhatásokat (például az óceán és a légkör között), és figyelembe venni az üvegházhatású gázok kibocsátásának különböző forgatókönyveit. Összességében elmondható, hogy az élővilág klímaváltozásra adott válaszainak előrejelzésével kapcsolatban rendkívül hiányosak az ismereteink. Ennek javítása érdekében nagy lépést jelent a klímaváltozással kapcsolatos globális adatbázisok létrehozása (Thuiller 2007).

Bármily hiányosak is a klímaváltozás hatásaira vonatkozó **előrejelzések**, nélkülözhetetlenek a **természetvédelmi feladatok** tervezéséhez. Például a fajok elterjedésének előrejelzései segítik a fenyegetett élőlények kezelési terveinek kidolgozását azáltal, hogy segítenek azonosítani az elterjedéshez szükséges ökológiai folyosókat, az újratelepítés lehetséges helyszíneit és a védelmet igénylő területeket (Thuiller 2007). Az utóbbi időben a természetvédelem szemlélete változni kezdett, olyan szempontok is bekerültek a tervezési és döntési folyamatokba, mint az éghajlatváltozáshoz való alkalmazkodás figyelembe vétele és olyan stratégiák tesztelése, mint az élőhelyek restaurációja, ökológiai folyosók létrehozása és az ökoszisztémák megváltozott feltételekkel szembeni ellenálló képességének növelése (Thomas et al. 2004, Thuiller 2007). A klímaváltozás hatásainak mérséklése (pl. a biodiverzitás-vesztés minimalizálása) érdekében elengedhetetlen a klímavédelmi szempontok figyelembevétele a természetvédelemben, valamint a természetvédelmi szempontok integrálása a föld- és tájhasználat-tervezés során, különösen, ha a felmelegedés mértéke a 21. században átlépi a kritikus 1,5-2 °C-t (Thomas et al. 2004, Meehl et al. 2007).

Az IPCC 2022-es jelentése a biológiai sokféleséggel kapcsolatban a következőket állapította meg: A globális felmelegedés korlátozása a lakható éghajlat biztosítása érdekében és a biológiai sokféleség védelme egymást kölcsönösen támogató célok, amelyek megvalósítása elengedhetetlen ahhoz, hogy fenntartható és méltányos előnyöket biztosítsunk az emberek számára. Számos, az ökoszisztémák védelmét, fenntartható kezelését és helyreállítását célzó, szárazföldi és óceáni alapú cselekvések járulékos előnyökkel járnak az éghajlatváltozás mérséklésével, az éghajlathoz való alkalmazkodással és a biológiai sokféleséggel kapcsolatos célkitűzésekben. Az éghajlatváltozás mérséklésére és az ahhoz való alkalmazkodásra szűklátókörűen összpontosító intézkedések közvetlen és közvetett negatív hatással lehetnek a természetre és az természet által nyújtott ökoszisztéma-szolgáltatásokra. A szűken vett, a biológiai sokféleség védelmét és helyreállítását célzó intézkedések általában fontos hozzáadékkal járnak az éghajlatváltozás mérséklése szempontjából, de ezek az előnyök nem optimálisak a

biológiai sokféleséget és az éghajlatot egyaránt figyelembe vevő intézkedésekhez képest. Az éghajlat, a biológiai sokféleség és az emberi társadalom összekapcsolt rendszerként való kezelése kulcsfontosságú a szakpolitikai beavatkozások sikeres eredményeihez (IPCC 2022).

**Európára** nézve a jelentés kiemeli a növekvő vízhiányt, a szélsőséges csapadékeloszlásból, és hó- és jégtakaró csökkenéséből eredő jelentősen növekvő árvízveszélyt, és ezek káros hatásait a mezőgazdaságra és ökoszisztémára. Hangsúlyozza továbbá, hogy az európai ökoszisztémák igen érzékenyek a klímaváltozás káros hatásaira, mivel az emberi hatások már eleve erős nyomot hagytak rajtuk. Az éghajlatváltozással kölcsönhatásba lépő nem az éghajlatból eredő veszélyek, mint például az élőhelyek csökkenése és fragmentálódása, a túlhasználat, a túlzott vízkivétel, az eutrofizáció és szennyezés, amelyek mindegyike csökkenti az ökoszisztémák rezilienciáját. Európában megfigyelhető bizonyos klímaérzékeny őshonos, főleg vizes élőhelyekhez köthető faj kihalása. A klímaváltozás hatására fellépő szárazodás és aszályveszély által különösen veszélyeztetettek a mérsékelt égövi és boreális erdők, továbbá a tőzegmohalápok, melyek jelentősen hozzájárulnak a szén megkötéséhez. A beporzók elterjedésének csökkenése az éghajlatváltozás hatására Európa számos európai területén jelentkezik. A nem megfelelő táj- és földhasználatból eredő jelentős mértékű és kiterjedésű talajerózió szintén hozzájárul az éghajlat további kedvezőtlen változásához. Egyre több területen jelentkezik a hőség és szárazság hatására erdő- és egyéb tüzek, melyek óriási kárt tesznek a természetes növény- és állatvilágban, valamint mesterséges létesítményekben (IPCC2022).

Az éghajlatváltozásért jelentős részben a megemelkedett széndioxid-koncentráció a felelős. Ennek következtében a növényzet könnyebben tudja felvenni a szén-dioxidot a légkörből. Ez többlet tápanyagforrásként jelentkezik, hiszen a fotoszintézis folyamatát, valamint a növények vízgazdálkodását is hatékonyabbá teszi (kevesebbet kell nyitva tartani a gázcsere nyílásokat, sőt akár kevesebb gázcsere nyílás is elég a felvételhez). Mindezek a növények számára fokozódó szervesanyag-termelést tesznek lehetővé (megfelelő fény-, víz-, ásványi anyag- és tápanyag-ellátottság mellett). A növényi termelés fokozódását a világ számos pontján sikerült már kimutatni, például évgyűrűvizsgálatok segítségével (Czucz 2009).

Az olyan éghajlatú területeken, ahol a **víz** a biológiai produkciót limitáló legfőbb tényező (**hazánk** jelentős része is ide tartozik), döntő jelentőségű lesz, hogy a jövőben növekedni vagy csökkenni fog-e az életközösségek számára hozzáférhető víz mennyisége. Az egyre erősebb és egyre gyakoribb aszályos időszakok erősen befolyásolják az életközösségek állapotát (Czucz 2009). Hazánkban az éves csapadékmennyiség a XX. században jelentősen csökkent. Elsősorban tavasszal, amely időszakra nézve az évszakos csapadékösszeg az ezredforduló körül a múlt század elei eleiértéknek csupán a kb. 75%-a volt (Várallyai 2007). További problémát okozhat, hogy a kevesebb csapadék intenzívebben érkezik. Ez egyrészt a csapadék hasznosulását, vagyis a vízháztartást rontja, mert kevesebb víz szivárog be a talajba, másrészt növeli a lefolyást, ami az árvízveszély fokozódását jelenti (Várallyai 2007). Az eddigi ismeretek alapján feltételezhető, hogy Magyarországon – hosszú távon – fokozatos felmelegedés, a csapadék mennyiségének csökkenése és a szélsőséges időjárási események gyakoriságának, valamint intenzitásának növekedése várható (Várallyai 2007).

Spanyolország és Olaszország területén, mely területek a közönséges bükk (*Fagus sylvatica*) déli elterjedési határainál fekszenek, az emelkedő hőmérséklet károsan érinti a bükkfák növekedését (Czucz 2009). Ez a probléma hazánkat is jelentősen érinti. Magyarország felszínének kb. 23%-át **erdők** borítják, melyek jelentős természetvédelmi, klímaszabályzó és gazdasági értéket képviselnek (http3). A klímaváltozás érdeinket is jelentősen érinti. A Kárpát-medencére vonatkozóan a regionális klíma-előrejelzések az éves és az évszakos átlaghőmérsékletek szignifikáns növekedését jelzik (Bartholy et al. 2014). A hőmérséklet-emelkedés mértéke a 21. század vége felé erősödik, az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület A1B kibocsátási

forгатókönyve (IPCC 2007) alapján a nyarak a 2071-2100-as időszakra több mint 3,5 °C-kal melegebbek lehetnek az 1981-2010-es periódushoz képest (Gálos et al. 2015). Az éves csapadékösszegek alig mutatnak változást, azonban a csapadék éven belüli eloszlása jelentősen átalakulhat (Pongrácz et al. 2011). A téli csapadék mennyisége a század végére több mint 10-15%-kal növekedhet, ezzel szemben a nyarak csapadékösszege csökkenhet, melynek mértéke a 2071-2100-as időszakra a 20%-ot is meghaladhatja a XX. század végéhez képest (Gálos et al. 2015).

Klíamodellek előrejelzései szerint Európa északi része melegebbé és csapadékosabbá, míg a Mediterrán térség melegebbé és szárazabbá válhat (Jacob et al. 2013). Az átmeneti zónában, így Magyarországon is, a csapadékváltozások előjele kevésbé egyértelmű, inkább klímamodell- és évszakfüggő, a melegedő tendencia azonban jelentős (Bartholy & Pongrácz 2017, Gálos & Somogyi 2017).

Az erdei ökoszisztémák működése szempontjából a hőmérséklet- és csapadékatlagok változása mellett fontos még, hogy a jövőben gyakrabban fordulhatnak-e elő az eddigi sokéves átlagnál jóval szárazabb nyarak. Amennyiben a nyári hónapokban az egyes fafajok által felvehető vízmennyiség a szükségesnél kisebb, akkor ez hazánkban a fafajok természetességének limitáló tényezőjévé válhat (Mátyás et al. 2010). A 21. századi klímaelőrejelzések alapján az átlaghőmérséklet emelkedése és a csapadékmennyiség csökkenése az erdészeti szempontból meghatározó időszakok közül a kritikus hónapokban (július-augusztus) a legnagyobb, de jelentős a fő növekedési periódusban (május-augusztus) is (Gálos & Führer 2018). Amennyiben a szélsőségesé váló csapadékeloszlás következtében a csapadék nagy része heves esőzések formájában, egy-két nap alatt hullik le, amit hosszabb csapadékmentes időszak követ, akkor még ha egy adott időszak csapadékösszege nem is változik, a lefolyás nagysága nő, ezzel együtt a csapadék hasznosulása romlik, azaz a növények által felvehető vízmennyiség csökken (Gálos & Führer 2018).

Az átlaghőmérséklet emelkedése és a csapadékmennyiség csökkenése az egyes fafajok elterjedése, vitalitása, növekedése és szervesanyag-produkciója (növedék) szempontjából fontos időszakok közül a kritikus hónapokban (július-augusztus) a legnagyobb, de jelentős a fő növekedési periódusban (május-augusztus) is. A magasabb hőmérséklet-növekedést serkentő hatása azonban csak addig érvényesül, ameddig a transzspirációhoz szükséges talajból felvehető vízmennyiség rendelkezésre áll. Azonban az egyre inkább egyenlőtlené váló csapadékeloszlás miatt még konstans, vagy növekvő csapadékösszeg mellett sem kizárt, hogy több szélsőségesen aszályos periódus fog a jövőben előfordulni, mely nemcsak fanövekedés csökkenést, hanem a mortalitás kockázatának növekedését is eredményezheti (Somogyi 2018). Az éghajlat változásával az idős faegyedek ugyan még sokáig túlélhetnek, de az újulat számára már nem lesz megfelelő a klíma (Czúcz 2009).

Amennyiben az összefüggő száraz periódusokat még szélsőségesen magas hőmérsékleti viszonyok is jellemzik, akkor abiotikus és biotikus kárláncolat indulhat el, ami súlyosan érinti az erdők egészségi állapotát, szervesanyag-képzését, vízháztartását, szénforgalmát, végső esetben elterjedését is (Führer 2010, Mátyás et al. 2010, Móricz et al. 2013, Berki et al. 2014, Somogyi 2016, 2018, Czímber & Gálos 2016, Illés & Fonyó 2016, Janik et al. 2016, Mátyás 2017, Csáki et al. 2018). Szélsőséges esetekben a kártevők/kórokozók elszaporodása tömeges mortalitáshoz vezethet (Csóka et al. 2009, 2011, Molnár et al. 2010, Rasztovits et al. 2014). A klímaváltozás káros hatásainak csökkentése érdekében erdeink esetében is fontos az alkalmazkodás (adaptáció). A fafajmegválasztás és az erdészeti célú döntéstámogatás megalapozásához az éghajlati tendenciák hosszú távú előrejelzése szükséges (Gálos & Führer 2018).

Klímaszimulációk alapján a jelenlegi **erdészeti klímakategóriák** által elfoglalt területek a hőmérséklet emelkedése és a kritikus időszakban elérhető csapadék csökkenése következtében

jelentősen el fognak tolni. A hűvösebb, csapadékosabb klímát igénylő fajok által meghatározott területek csökkenése, míg a szárazságtűrőbb, melegigényesebb fajok által meghatározott területek térnyerése várható. Az erdészeti klímakategóriák területarányának 21. század első felére-közepére vonatkozó előrejelzése szerint az 1981-2010-es periódushoz képest a bükkös klíma területe drasztikusan csökkenni fog, a jelenlegi teljes erdőterület 4%-áról 2%-ára, az erdőssztyepp klímájú területek kiterjedése pedig várhatóan jelentősen nő majd, a jelenlegi teljes erdőterület 10%-áról 36%-ára. A magasabban fekvő hegyvidékek makroklímája még alkalmas lehet a bükk számára, de a dombvidékeken már a gyertyános-tölgyesek kialakulását lehetővé tévő klíma is visszaszorul a kocsánytalan tölgyes, illetve cseres tölgyes számára kedvező klímának helyet adva, melynek országos összterülete megfelelő lehet, majd a 2041-2070-es időszakra várhatóan még tovább csökken. A pesszimistább előrejelzések a század közepére a síkvidékek teljes területére már erdőssztyepp klímát jeleznek (Gálos & Führer 2018). A drasztikusan változó klimatikus körülmények hatására szükséges lesz bevezetni az eddig nem szereplő sztyepp erdészeti klímakategóriát, melynek területaránya a 2021-2050-es időszakra elérheti a jelenlegi teljes erdőterület 4%-át (az ország területének 11%-át), majd a század második felében még tovább növekedhet. Az elkövetkezendő 30 évben ebbe a klímakategóriába várhatóan az Alsó-Tiszai-ártér erdészeti tájat teljesen, a Mezőföld, a Körös-Maros köze és a Duna-Tisza közti hátság erdészeti tájainak pedig egyes területrészeit sorolhatjuk majd. A század közepére előrevetített klimatikus viszonyok mellett az olyan klímaadottságú területek, ahol a természetes előfordulású zárt erdők még eredményesen művelhetők, nagymértékben csökkenhetnek, a jövedelmező gazdálkodásra kevésbé alkalmas erdőssztyepp klímájú területek nagysága pedig jelentősen, a jelenlegi erdőterület több mint egyharmadára növekedhet. Az eddigi erdőssztyepp klímakategória területének fele, az ország területének több mint 10%-a, a mainál még melegebb és szárazabb, sztyepp klímájú lehet. Az átlagos klimatikus viszonyok változásával egyidejűleg az 1981-2010-es periódushoz képest 2021-2050-re az aszályos és a szélsőségesen aszályos évek száma megduplázódhat, mely az érzékeny fafajok egyedeinek mortalitási kockázatát fokozza. A terjedő sztyepp klímakategóriában az erdőtakaró fenntartása is kétségessé válhat (Gálos & Führer 2018). Az Alföldre egykor jellemző, erdőfoltok és tisztások sajátos mozaikjából álló, európai viszonylatban is különleges erdőssztyepp élőhelyeknek a többsége mára sajnos eltűnt hazánk területéről, megmaradt állományait erősen veszélyezteti a klímaváltozás és a káros emberi tevékenység következtében fellépő talajvízszint-süllyedés, az özöngyomok megjelenése és a túltartott vadlétszám (Czucz 2009).

A klímaváltozás az egész Földön hatással van a gazdaságra és az emberi egészségre, így Európában is. A mezőgazdaságra gyakorolt hatása a legszembetűnőbb, mivel a mezőgazdaság eredményességét közvetlenül befolyásolják az abiotikus környezeti tényezők és az ökoszisztéma-szolgáltatások elérhetősége. Ezen felül a klímaváltozás hatására megnövekedett árvízveszéllyel is számolnunk kell, mely nem csak a mezőgazdaságot érinti hátrányosan. Gondot okoz továbbá a 21. században várható tengerszint-emelkedés. Az emberi egészségre gyakorolt negatív hatások sem elhanyagolhatóak, mint például a nyári hőség miatt megnövekedett halálozás, a megnövekedett fertőzésveszély, az extrém időjárási viszonyok (pl. áradások, viharok) okozta veszélyek, az egészséges vízhez és élelmiszerhez való hozzájutás korlátozódása, a mentális egészségre gyakorolt hatások (Ciscar 2009).

Az éghajlatváltozás érinti a **természetvédelmet** is, hiszen számos fajt leginkább a változó környezeti tényezők veszélyeztetnek (Salguero-Gomez et al. 2012). Európában 2080-ra az edényes növényfajok több mint fele válhat veszélyeztetetté e hatások következtében (Thuiller et al. 2005).

A **Kárpát-medence** különösen érzékeny a klímaváltozás hatásaira (Pongrácz et al. 2009, Gálos et al. 2011, Hlásny et al. 2014, Antofie et al. 2015.), így különösen fontos fenológiai kutatásokat végezni a térségben.

Thuiller és mtsai (2005) 21. századra vonatkozó előrejelzése szerint a Pannon Biogeográfiai Régióba, várhatóan főleg a Kelet-Mediterráneumból, új növényfajok fognak érkezni. A fajkicserélődés aránya akár 66%-os is lehet. A régió jelenlegi növényfaj-diverzitásának nagy részét elveszítheti, fajkészletében óriási változás várható.

A klímaváltozás és a hatására fellépő vízhiány áldozataivá válhatnak hazánk értékes **lápjai** és láprétjei, így veszélybe kerülhet sok, az ezekhez az élőhelyekhez kötődő specialista faj. Élőhelyeinek, a mozaikos szerkezetű lápréteknek a pusztulása sodorhatja végveszélybe az Európa-szerte veszélyeztetett réti angyalgyökér (*Angelica palustris*) hazai állományait. E faj közvetlen rokonságában számos gyógy- és fűszernövény található, kipusztulása pótolhatatlan genetikai veszteséget jelentene (Czúcz 2009). A jégkori reliktumfajok is hasonló sorsra juthatnak. A hegyi szirtipáfrány (*Woodsia ilvensis*) állományai fogyatkozóban vannak (Czúcz 2009). A nagy természetvédelmi értékkel bíró **üde gyepeinket** szintén szintén fenyegeti a klímaváltozás, a számukra kedvező hűvösebb, csapadékosabb klíma melegedése, szárazodása, és létrejöttükben, fennmaradásukban létfontosságú szerepet játszó hagyományos, extenzív tájhasználat felhagyása (Czúcz 2009).

**Ligeterdeink** az általános szárazodás és a részben ennek hatására terjedő idegenhonos növények, valamint a szélsőséges hidrológiai rezsim révén fellépő időszakos magas vízállás és túlzott mértékű tartós vízborítás miatt szintén érintettek a klímaváltozás negatív hatásai által (Czúcz 2009). **Szikes** réteink és mocsaraink a lecsapolások és tájátalakítások során óriási veszteségeket szenvedtek, azonban a maradékuk fennmaradását is súlyosan veszélyezteti a talajvízszint-csökkenés, és ennek hatására bekövetkező sziktelenedés, kilúgzás (Czúcz 2009). **Száraz gyepeink**, elsősorban a kedvezőtlen vízgazdálkodású homokpusztagyepeink a sivatagosodás áldozataivá válhatnak. Az eredeti elterjedési területükhöz képest rendkívül kis területre zsugorodott löszgyepeink fajkészletének szegényedését, az állományok leromlását, homogenizálódását is felgyorsítja a klímaváltozás (Czúcz 2009).

A klímaváltozás negatívan érinti hazánk összes vizes élőhelyét. A hazánkban jellemző természetes vizes élőhelytípusok zömének természetvédelmi helyzete a 2019-ben leadott, az élőhelyvédelmi irányelv végrehajtásáról szóló országjelentés (Nemzeti Természetvédelmi Alapterv 2022, [http21](http://21)) szerint rossz. Egyik legfőbb veszélyeztető tényezőjük az emberi hatásokra visszavezethető vízhiány, illetve a természetes vízjárás megváltozása. Ezen élőhelytípusok a klímaváltozás hatásainak is jobban kitettek. Többek között az élőhelyi viszonyok megváltozásának következménye az idegenhonos inváziós fajok széles körű elterjedése és a szukcessziós folyamatok felgyorsulása (Nemzeti Természetvédelmi Alapterv 2022). A Nemzeti Természetvédelmi Alapterv a vizes élőhelyek megmentése és a klímaváltozás hatásainak pufferelese érdekében a következőket javasolja:

„Vizes élőhely-rekonstrukciók és élőhely-rehabilitációk esetében a térségi vízgazdálkodás, vízvisszatartás megoldási lehetőségeinek előtérbe helyezése a talajvíztükör megemelésével, összhangban a klímaváltozás hatásainak lehetséges puffereelésére, a VKI szellemiségének a VGT-be való beültetésével és a szükséges földhasználati mód váltásokkal (bizonyos, mély fekvésű, rendszeresen belvízjárta területek feladása), szemben a korábban alkalmazott, gátakkal körül vett árasztásokkal” (Nemzeti Természetvédelmi Alapterv 2022).

A természeti erőforrások között a termőtalaj hazánk egyik legértékesebb, feltételesen megújuló erőforrása, amelynek ésszerű és fenntartható használata, védelme, állagának megőrzése és sokoldalú funkcióképességének fenntartása a környezetvédelem és a biomassa termelés alapvető közös feladata, a fenntartható fejlődés egyik alapeleme. A klímaváltozás hatásainak mérséklésére irányuló stratégia szempontjából elsősorban a talajok vízháztartási tulajdonságai a legfontosabbak, mert a talaj hazánk legnagyobb kapacitású, természetes víztározója. A vízerózió megjelenése a klímaváltozás következtében egyre inkább szélsőséges formában fordulhat elő.

Vagyis a mozgási energia megnövekedése következtében a talajkészlet még inkább veszélyeztetetté válik, amely ellen céltudatos vízgazdálkodással és helyes mezőgazdasági gyakorlattal lehet védekezni (Várallyai 2007).

A klímaváltozás a fajok elterjedési területének változását, a fajok „vándorlását” eredményezi, amelyhez hasonlóra a földtörténeti múlt során többször is volt már példa (pl. jégkorszakok idején és utána). A jelenlegi helyzet azonban több szempontból is különbözik a korábbiaktól. A fajok vándorlását erősen korlátozza az élőhelyfragmentáció, az ökológiai folyosók hiánya, és az eddigi klímaváltozásoknál jelentősen gyorsabb változás is kihívás elé állítja a korábbi areájukat elvesztő fajokat. A fajok hőmérséklet-változás hatására bekövetkező vándorlásában hazánk esetében a Kárpátok kelet-nyugati irányban húzódó hegyvonulata komoly akadályokat jelent. A fajok vándorlásából adódó probléma a hazánkban is egyre nagyobb számban megjelenő, idegenhonos, sokszor inváziós faj, melyek megjelenését, megtelepedését és terjedését az emelkedő hőmérséklet (pl. az egyre enyhébb telek) tesznek lehetővé (Czúcz 2009).

A klímaváltozás káros hatásainak enyhítésére a Magyar Országgyűlés 2008-ban elfogadta az első Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégiát, majd 2018-ban a második, megújított **Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégiát** (Czúcz 2009, Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégia 2018) A 2018-ban elfogadott stratégia megállapítja, hogy az erdők a mitigációs célok megvalósulásához a légköri széndioxid jelentős mennyiségű megkötésével, annak átmeneti vagy tartós tárolásával, fosszilis eredetű nyersanyaga felhasználásának kiváltásával, másrészt a kedvező mikro-, mezo- és makroklimatikus hatásai révén járulnak hozzá. A klímaváltozás veszélyezteti az erdők stabilitását, egészségi állapotát, így az erdők szénmegkötő, széntároló képességét is, ezért a stratégia kiemelt hangsúlyt helyez az erdők szénmegkötő képességének megőrzését támogató intézkedésekre, az erdők klímaváltozáshoz történő alkalmazkodásának (adaptáció) elősegítésére (Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégia 2022).

A 2022-ben elfogadott **V. Nemzeti Környezetvédelmi Program** mellékleteként létező V. Nemzeti Természetvédelmi Alapterv a Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégiával összhangban meghatározza az állam természetvédelmi feladatai kapcsán követendő kiemelt célokat, kijelöli a cselekvési irányokat, nemcsak a természetvédelmi igazgatási szervek, hanem minden állami szerv számára. Az NTA a klímaváltozást a természetvédelmet érintő jelentős és gyakran váratlan veszélyhelyzetként írja le. A tervben megfogalmazott stratégiai célok összhangban állnak az alkalmazkodás kapcsolódó célkitűzéseivel. A terv kiemelt célja például az élőhelyek megőrzése – és így a biológiai sokféleség megvédése. Ehhez kapcsolódik a „Zöld infrastruktúra” koncepciója, amely a természetes és természetközeli élőhelyek létező vagy megtervezendő elemeinek hálózatával az ökológiai és tájökológiai kapcsolatok működőképességének fenntartására, illetve kialakítására törekszik, elősegítve ezzel az ökológiai rendszerek alkalmazkodó-képességének javítását. A terv rögzíti továbbá, hogy a vízgazdálkodás erősen érintett a klímaváltozás hatásai által, ezért kiemelt figyelmet kell fordítani a vízgazdálkodás kérdéseire és a vízmegőrzésre.

Hazai természeti értékeink megőrzése és a klímaváltozás hatásainak mérséklése érdekében **kiemelt fontosságú lenne** a vizes élőhelyek vízmegtartó képességeinek visszaállítása, az élőhelyek mozaikosságának fenntartása, a Nemzeti Ökológiai Hálózat továbbfejlesztése, a csapadékvíz és talajvíz megtartását előtérbe helyező vízkészlet-gazdálkodás, a jelenlegi vízelvezetési gyakorlat felülvizsgálata, a folyamatos erdőborítottságot biztosító természetközeli erdőgazdálkodás, az erdőössztyepp zónába kis záródottságú erdőterületek fenntartása, őshonos fafajok telepítése, extenzív vadgazdálkodás bevezetése, a hagyományos tájgazdálkodás elemeinek (kaszálás, legeltetés) fenntartása, újraélesztése, védőzónák fenntartása érzékeny területek körül, ahol lehetséges és indokolt, kevésbé intenzív mezőgazdasági gyakorlat alkalmazása, a mezőgazdasági táj heterogenitásának növelése, finomstruktúrák kialakítása és

fenntartása, valamint kisebb környezetterheléssel járó gazdálkodási módok előtérbe helyezése (Czucz 2009).

## 2.2 A fenológia kutatásának rövid története

A fenológiai megfigyelések szinte egyidősek az emberiséggel. E megfigyelések a letelepedett, földművelő életforma elterjedésével vált hangsúlyosabbá (Schwartz 2013). Kínában már 3000 évvel ezelőtt történtek tudatos fenológiai megfigyelések (Chu 1931). Írott formában pedig már az Újszövetségben is találunk rá példát. „*Vegyetek példát a fügefáról. Amikor hajtása már zsendül és levelet hajt, tudjátok, hogy közel van a nyár*” (Márk 13:28).

A fenológiai megfigyelések története nagyjából **három fő szakaszra** osztható (Piao et al. 2019). Az első időszakot (Kr. e. 10. század – Kr. u. 17. század körül) a mezőgazdasági tevékenység megszervezése szempontjából fontos évszakok, időszakok azonosítása jellemezte. A fenológia ebben az időszakban leginkább a növények és állatok a természetben ciklikusan változó jelenségeinek empirikus leírása volt. A második korszak (17. század–1990-as évek) a fenológia, mint tudományág megszületését és kezdeti fejlődését jelentette (Piao et al. 2019). Ebben az időszakban a természettudósok elkezdtek feljegyezni a különböző fenológiai események időpontját, illetve statisztikai és kísérleti megközelítéssel vizsgálni a mögöttük rejlő mechanizmusokat. Reaumur először 1735-ben vezette be a „degree-day” fogalmát (Reaumur 1735), Charles Morren pedig 1853-ban alkotta meg a „fenológia” szakkifejezést. Statisztikai modelleket fejlesztettek ki a fenológiai események bekövetkeztének ideje és az éghajlati tényezők kapcsolatának megállapítására (Schwartz, 2013), és kísérleteket végeztek a megfigyelt fenológiai mintázatok megértésének érdekében. Ebben az időszakban kezdtek kiépülni a fenológiai megfigyelő hálózatok szerte a világon (Barck et al. 1753; Chen 2013, Defila 2008). Ahogy a klímaváltozás ténye és hatásai egyre nyilvánvalóbbá váltak, úgy nőtt meg az ilyen jellegű kutatások iránti igény. A fenológiai megfigyeléseket és kutatásokat illentően ez a fordulópont az 1990-es években következett be (Chmielewski et al. 2013), mely a fenológiai kutatások harmadik szakaszának kezdetét is jelzi. A jelenleg is tartó harmadik időszak a modern fenológia korszaka (az 1990-es évektől napjainkig), amelyben a kifinomultabb monitorozási technikák és modellezési megközelítések rohamos fejlődése nagymértékben ösztönözte a fenológiai, mint tanulmányág gyors fejlődését (Piao et al. 2019). A modellek új lehetőséget kínáltak a már meglévő, régebbi adatsorok vizsgálatára is. Bár napjainkban egyre nagyobb teret kap a távérzékeléssel végzett adatgyűjtés a fenológia kutatásában (Zhang et al. 2004, Yao et al. 2017, Qiu et al. 2020, Shin et al. 2023), a hagyományos terepi megfigyelések („*ground-based observations*”) ma sem alábecsülendők, értékes, közvetlen adatokkal szolgálnak a fenológiában bekövetkezett változásokról (Piao et al. 2019). A hagyományos, közvetlen terepi és a távérzékeléssel végzett megfigyelések közvetlen bizonyítékot szolgáltatnak a növényfenológia térbeli eltéréseire, valamint annak esetleges időbeli trendjeire. A növények fenológiáját azonban számos környezeti tényező befolyásolja, amelyek maguk is gyakran korrelálnak (Keenan & Richardson 2015, Richardson et al. 2018). Ezért kizárólag fenológiai megfigyelésekkel rendkívül nehéz a fenológia különböző mozgatórugóinak hatását elkülöníteni egymástól. Ezért a manipulatív kísérletek nagyon hasznos eszköznek bizonyulnak a fenológiai vizsgálatokban, és első kézből szolgáltatnak közvetlen bizonyítékot a fenológiai változásokra (Piao et al. 2019).

A történelem legrégebb óta tartó fenológiai feljegyzései Japánhoz köthetőek, a Kiotói Császári Udvarban Kr. u. 705. óta rögzítik a cseresznyevirágzás kezdetének időpontját. A legtöbb ilyen jellegű kutatás azonban Európában készült (Menzel 2002, Aono & Kazui 2008, Menzel 2013). A legrégebbi, leghosszabb rendelkezésre álló adatsor, melyet modern modellezésnek vetettek alá, egy Franciaországból származó, a pinot noir szőlőfajta adatait tartalmazó, 1370 –2003 között rögzített adatsor volt (Chuine et al. 2004).



**Európában** *Carl Linné* (1707–1778) az alapvető botanikai rendszerező munkája mellett évenként adatokat gyűjtött a vadmadarak költözésének és visszatérésének idejéről. Feljegyezte, hogy mikor áll be a tavaszi olvadás, melyek a legelőbb virító tavaszi növények, mikor hozzák termésüket. A többéves megfigyelés alapján hasznos következtetéseket vont le a mezőgazdászok számára. Elkészítette Skandinávia természeti kalendáriumát. Ezekkel a tanulmányaival Linné tulajdonképpen megalapította a fenológia tudományát (Hunkár et al. 2012). 1750 és 1752 között ő hozta létre Európa első fenológiai megfigyelő hálózatát (Schnelle 1955).

*Adolphe Quetelet* (1796–1874) fizikus, mint a Brüsszeli Obszervatórium alapítója és a Brüsszeli Tudományos Akadémia állandó titkára, 1841-ben hálózatot hoz létre a növények és állatok „Periodikus jelenségeinek megfigyelésére”. Útmutatót ad a megfigyelések módszerére, melyben kiköti, hogy mindenhol azonos időpontban történjenek a megfigyelések- a növényekre vonatkozóan is (Hunkár et al. 2012). *Charles Morren* (1807-1858) a Liège-i Egyetem botanika professzora vitatta Quetelet instrukcióit a periodikus jelenségek megfigyelésére vonatkozóan. Álláspontja szerint a jelenség időpontjának feljegyzéséből állítandó össze a természet kalendárium. Ő használta először tudományos cikkben („*Souvenirs phénologiques de l’hiver 1852-1853*”) a fenológia, mint diszciplína kifejezést is (Hunkár et al. 2012). Végző soron, a fenológia, mint tudományterület az ő elméletéből származik, mely szerint „a periodikus események megfigyelésének célja az idő által uralt életjelenségek megismerése” (Morren, 1843).

Európa egyik legrégebbi fenológiai megfigyelése a híres Marsham családtól, az angliai Norfolkból származik. A megfigyelések igen hosszú ideig, 1736-tól 1947-ig tartottak (Sparks & Carey 1995). Ezt követték Hermann Hoffmann (1819-1891) és Egon Ihne (1859-1943) német botanikusok, a fenológiai tudományterületének jeles terjesztőinek megfigyelései 1883 és 1941 között. Ők alapították a második nemzetközi (európai) fenológiai megfigyelő-hálózatot (Ihne & Hoffmann 1884, Schnelle 1955, http4, http5). Az elsőt a szintén német, mannheimi *Societas Meteorologica Palatina* tartotta fenn (Schnelle 1955).

A nemzetközi meteorológiai szervezet (*Organisation Météorologique Internationale*) Agrármeteorológiai Bizottsága 1932 szeptemberében Münchenben tartott üléseiben foglalkozott azzal a kérdéssel is, hogy miként kellene a növényfejlődési megfigyeléseket nemzetközileg megszervezni. 1935-ben e bizottság határozata kimondta, hogy a fenológiai vizsgálatok során mindenütt ugyanazokat a növényfajokat kell megfigyelni, és egységesen kell meghatározni a különböző fejlődési szakaszokat („fitofázist”) (Hunkár et al. 2012).

Egy egységes módszereken alapuló, nemzetközi fenológiai monitoring hálózat felállításának az ötlete először 1953-ban, a Meteorológiai Világszervezet (WMO) Agrometeorológiai Bizottságának első ülésén merült fel (Chmielewski et al. 2013). 1957-ben, Fritz Schnelle (1900-1990) és Erik Volkert (1907-1980), a Nemzetközi Biometeorológiai Társaság kezdeményezésére aztán létre is hozták a fenológiai megfigyelő kertek hálózatát. A ma is működő hálózat Skandináviától Macedóniáig Európa különböző éghajlati öveiben biztosítja az egységes szempontok szerinti megfigyeléseket (Hunkár et al. 2012).

A XX. század második felében, számos európai ország hozott létre, a nemzeti meteorológiai szolgálat felügyelete alatt, országos, fenológiai megfigyelő hálózatot. Többek közt Albánia, Ausztria, Csehország és Szlovákia, Oroszország és Észtország, Németország, Szlovénia, Lengyelország, Spanyolország és Svájc (Schnelle 1955, Menzel 2013). A WMO ezredfordulón kiadott jelentésében a fenti országokon kívül még Horvátországot, Litvániát, Lettországot, Olaszországot, Franciaországot, Macedóniát, Romániát, Moldovát és Magyarországot említi meg, mint ahol létezik rendszeres, országos fenológiai adatgyűjtés (WMO 2000). A II. világháború után létrehozott hálózatok elődei több európai országban már a XIX. században is léteztek (Schnelle 1955, WMO 2000, Menzel 2013). Franciaországban a *Meteo France* égisze alatt működő fenológiai adatgyűjtő hálózatot az 1880-as években hozták létre, mely sajnos

később feledésbe merült. Az Egyesült Királyságban a *Royal Meteorological Society* 19875-től, Ausztriában a *Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik* 1851-től, Németországban pedig a *Deutscher Wetterdienst* 1881-től működtetett ilyen hálózatot (Schnelle 1955, Menzel 2013, Nordt et al. 2021).

A XX.század végére számos fenológiai megfigyelő hálózat jött létre. Ezek egy része nemzeti hálózatként működött, más része nemzetközi szintű volt, különböző, főképp európai országok botanikus kertjeit összekapcsolva, megfigyeléseiket összehangolva (pl. IPG Kertek, GPM Program, PhenObs Hálózat, *bővebben lásd 2.5 fejezet*). A különböző hálózatok megfigyelései azonban nem egységes módszertan alapján történtek, az adatokat külön tárolták, mely az összehasonlíthatóságot igencsak megnehezítette. Az osztrák meteorológia szolgálat (*Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik*) által életre hívott (<http6>), 2004 és 2009 között megvalósított *COST725 ACTION* (Cost 725 Akció) elnevezésű, európai szintű program a különböző helyeken, különböző formátumban tárolt adatok egységesítésének, szabványosításának és harmonizálásának feladatát, valamint egy egységes adatbázis létrehozását tűzte ki maga elé (Nekovar et al. 2008, Hunkár 2012, Menzel 2013, Templ et al. 2018). A program keretén belül kidolgozták a fenológiai megfigyelések egységes útmutatóját (<http7>). A program egyik említésre méltó eredménye, hogy publikálásra került 542 növényfaj 1971 és 2000 között, 21 országban végzett, 125 000 megfigyelésből álló adatsorának tudományos feldolgozása (Menzel et al. 2006). A COST ACTION 725 projekt utódjaként működő Pan European Phenology (PEP) projekt keretein belül létrehozott és folyamatosan bővülő Páneurópai Fenológiai Adatbázis (PEP725) mindenki számára szabadon hozzáférhető, oktatási, kutatási célra korlátozás nélkül felhasználható. Az adatbázis 32 ország meteorológiai szolgálata által gyűjtött adatbázist tartalmazza, köztünk az OMSZ által 1973 és 1997 között gyűjtött adatokat. Ezen kívül szerepelnek még az adatbázisban az 1968 óta önkéntesek által gyűjtött fenológiai adatok. A program legtöbb partnere folyamatosan szolgáltatja a fenológiai megfigyelések adatsorait. Az adatbázis 2018-ig vadon élő és termesztésbe vont, összesen 265 növényfaj 46 fenofázisának kb. 12 milliárd megfigyelését gyűjtötte össze, mely megtalálható a projekt erre a célra létrehozott honlapján (Templ et al. 2018, <http8>).

**Kelet-Ázsia** fenológiai kutatásai nagy múltra tekintenek vissza. Japánban a cseresznyevirágzás kezdetének időpontját a kora-középkor óta minden évben rögzítik (Aono & Kazui 2008). Az országos, fenológiai megfigyelő hálózatokat az 1950-es és 1980-as évek között építették ki. Az ezredforduló óta Kína, Japán és Dél-Korea hálózatai komoly fejlődésen estek át. Jelenleg a hálózatok főleg a fenológiai események tér- és időbeli eloszlására, ezek klímaváltozással való összefüggéseire egyed- és populáció szinten, a genetikai diverzitás és a növények klímaváltozásra adott válaszainak kapcsolatára, valamint a vegetációs időszak változásaira koncentrálnak (Chen 2013). Ez utóbbit a közvetlen fenológiai adatgyűjtésen kívül a távérzékelés nyújtotta lehetőségekkel egészítik ki (Chen 2013, Zhao 2013, Yao et al. 2017, Luo et al. 2020, Jia et al. 2021, Shin et al. 2023).

**Észak Amerikában**, az Amerikai Egyesült Államokban bár már az 1950-es évektől történtek fenológiai megfigyelések, az Országos Fenológiai Hálózat (*USA National Phenology Network*, rövidítve USA-NPN) megalapítására csak a 2000-es évek közepén került sor. Kanadában az országos fenológiai adatgyűjtő hálózat a *PlantWatch* a NatureWatch hálózat keretein belül működik (Schwartz et al. 2013, <http9>). A közelmúltban az Egyesült Államokban életre hívott projekt a Chicagói Botanikus Kert által koordinált *Project Budburst* és a telefonos applikációként működő *iNaturalist*. Mindkét projekt alapja az ún. „*citizen science*”, tehát nagy részben civil önkéntesek munkáján alapuló adatgyűjtés (<http10>, <http11>, Primack et al. 2021).

2012-ben egyedülálló nemzetközi együttműködésre vette kezdetét. Összesen nyolc észak-amerikai, európai és ázsiai botanikus kert kezdett hosszú távú közös projektbe, melynek keretén

belül azonos szempontok alapján 1597 fászfű (fa- cserje- és lián-)faj teljes levélfejlődését, és több mint 400 fászfű faj terméshozásának fenológiáját vizsgálják (Panchen et al. 2014, 2015, Gallinat et al. 2018).

**Hazai viszonylatban** *Kitaibel Pál* (1757-1817) volt az első, aki botanikai és földrajzi terepmunkája során följegyezte az egyes fajok virítási idejét, időtartamát. Ezekből az élőhelyek eltérő éghajlati adottságaira következtetett. Néhány haszonnövény- egyes gyümölcsfák és gabonafélék fenológiai adatainak országos feltérképezése céljából felhívást tett közzé. Sajnos kevés adat érkezett, így nem tudta megrajzolni a virágzási fenológiai térképet (Both 2009, Hunkár et al. 2012).

Hazánk legrégebbi és ez idáig egyetlen, folyamatosan végzett fenológiai adatgyűjtése elsősorban nem tudományos céllal készült. A kőszegi szőlősgazdák 1740 óta vezetik az ún. *Szőlő Jövésnek Könyvét*. A nevezetes könyvben a kezdeti év óta minden év Szent György napján, vagyis április 24-én rajzzal rögzítik a környékbeli szőlők hajtásának pillanatnyi állapotát. "*Eleitül ezen Nemes Városban bevett szokás szerint Szent György napján, úgymint szokott, bírói választás napján az hegyesterek az tanácsházba szoktak szőlő jövéseket hozni, melyek által az városi lakosok is az borbéli terméshez reménségek volt, és ezen jövések akkoráig könyvben nem rajzoltattak..*". olvasható a kőszegi Szőlő Jövésnek Könyve első lapján ([http12](http://12))

Mivel a meteorológiai adatok és a növényfajok fenológiai jellemzői közti kapcsolat létezése nyilvánvalónak tűnt, a XIX. század második felében megalakuló nemzeti meteorológiai szolgálatok mérési programjában szerepelt a növények megfigyelése is. A *Magyar Királyi Meteorológiai és Földdelejtességi Intézet* 1871-1885 közti időszakból származó évkönyveiben 57 helyszínről vannak, összesen 200 növényfajt érintő megfigyelések, melyek közül 9 településről származnak hosszabb, legalább 7 éves adatsorok. Ezen adatsorok különböző, őshonos növényfajok különböző fenológiai eseményeinek bekövetkeztét jegyezték fel a megfigyelési pontokon (Hunkár et al. 2012). Ezt követően 1910-ben a *Magyar Földrajzi Társaság*, később pedig 1934-ben az *Erdészeti Kutató Intézet* létesített növényfenológiai hálózatot.

*Réthy Antal* 1936-ban a következőket írta: „Hazánkban sok helyen végeznek rendszeres növényfenológiai megfigyeléseket s a feljegyzéseket a klimatológia már régóta felhasználja. A Magyar Földrajzi Társaság Alföldi Bizottsága által szervezett, jelenleg mintegy 60 állomást magába foglaló hálózat megfigyelései úgy a hazai, mint a nemzetközi éghajlatkutatás szolgálatában állnak. A megfigyelők jelentései a Meteorológiai Intézetbe futnak be, s 15 állomás adatai a Meteorológiai Intézet közlései alapján E. Ihne professzor szerkesztésében, a Darmstadtban megjelenő „*Phaenologische Mitteilungen*” című kiadványában megjelennek” (Réthy 1936).

A fenológiai megfigyelések célja a XX. század közepéig a természettudományos érdeklődés és ismeretszerzés voltak, ezután a mezőgazdasági termelés fellendítése, a termés optimalizálás és vegyszeres növényvédelem tervezése kerültek előtérbe (Hunkár et al. 2012).

Az *Országos Meteorológiai Szolgálat* (OMSZ) égisze alatt 1951-ben kezdték megszervezni az országos fenológiai hálózatot. Elkészítették az „*Útmutatás növényfenológiai megfigyelésekre*” c. kiadványt, amelyben Csapody Vera rajzaival 75 vadon termő növény szerepel. A hálózatban túlnyomórészt a vadon termő növények fenológiai megfigyelését végezték, mintegy 200 helyen, főként a csapadékmérő állomások észlelői. A mezőgazdasági növények megfigyelését 13 helyen, mezőgazdasági kutatóintézetekben, fajta kísérleti állomásokon kezdték meg (Hunkár et al. 2012). Az OMSZ által végzett megfigyelések sem térben, sem időben nem voltak egységesek (Dunay 1984). A hálózatot az addig összegyűlt tapasztalatok alapján, 1961-ben újraszervezték, a korábban bezárt állomások helyét újak vették át. „*Útmutatás kultúrnövény fenológiai megfigyelésekre*” címmel útmutatót adtak ki, mely alapján az újjászervezett hálózat 80 állomáson 34 növény faj megfigyelését végezte (Hunkár et al. 2012). Az állomásokon a fenológiai adatok

mellett a mezőgazdasági termelés szempontjából fontos egyéb adatokat is gyűjtött, mint pl. a növények általános állapota vagy az esetleges károk. Sokszor a különböző állomások, különböző növényfajok megfigyelését végezte, volt ahol gabona-, máshol zöldség, vagy gyümölcsfajok monitoringja történt. A vadon élő növényfajok körét felülvizsgálták, majd igazodva a nemzetközi protokollokhoz, a megfigyeléseket 36 faj bevonásával folytatták. Ebben volt 10 fafaj, 10 cserjefaj, valamint 16 lágyszárú faj. A hálózatot 1975-ben ismét újjászervezték, mely így már 33 vadon élő növények megfigyelésével, és 236 kultúrnövények megfigyelésével foglalkozó állomásból állt. Az 1980-as években sajnos a vadon élő növények megfigyelésére kevesebb figyelmet fordítottak. A megfigyeléseket a MÉM-NAK növényvédő szakembereire bízták, olyan hivatalos személyekre, akik abban a mezőgazdasági termelőüzemben dolgozik ahol a megfigyelés történt, hogy az adatok hitelességéhez kétség ne férhessen. Az 1983-ban sokadszorra újjászervezték, a természetes vegetáció megfigyelésére immár kevesebb figyelmet fordító hálózat végül az ezredfordulóig működött, amikor az OMSZ anyagi gondok miatt az egész hálózat megszüntetése mellett döntött (Hunkár et al. 2012). Magyarországon ilyen szintű, országos, fenológiai megfigyeléseket végző hálózatot sajnálatos módon azóta sem hoztak létre. Az Amerikai Egyesült Államokban működő *iNaturalist* alkalmazáshoz hasonló, közösségi adatgyűjtésen alapuló, fenológiai megfigyelésekre is alkalmas kezdeményezés a *Vadonleső*, azonban még sajnos nem tett szert akkora népszerűsége, hogy érdemi országos adatbázist hozzon létre (http13).

## 2.3 Fenológia és klímaváltozás

A **fenológia** a ciklikus biológiai folyamatokat, azok kiváltó és befolyásoló (biotikus és abiotikus) tényezőit, valamint az azonos vagy különböző fajok fenofázisai közötti kölcsönhatásokat vizsgáló **tudomány** (Lieth 1974, Rathcke & Lacey 1985, Schwartz 2013). A fenológiai kifejezés a görög „phaino” szóból ered, mely megjelenést jelent (Rathcke & Lacey 1985). A fenofázis vagy fenológiai esemény a fejlődés egy adott szakasza, például rügyfakadás, virágzás, termésérlelés, lombhullás vagy szeneszcencia (Cleland et al. 2007).

A fenológiai kutatások szempontjából fontos, hogy bármely fenológiai esemény mintázata kvantitatívan definiálható statisztikai eloszlásként, amelyet olyan paraméterek jellemeznek, mint az előfordulás ideje (kezdet, átlaga, módja), időtartama (időbeli tartománya) és szinkronitása (szórás, variancia) (Rathcke & Lacey 1985). A fenológiai kutatásokban fontos mérőszám a **fenológiai érzékenység**, mely azt mutatja meg, hogy 1 °C hőmérséklet-változás mellett hány nappal tolódik el az adott fenológiai esemény (Cleland et al. 2012, Wang et al. 2015).

A fenológiai események érzékenyek a klímaváltozásra, így **jó indikátorai** annak (Sparks & Menzel 2002, Cleland et al. 2007, Schwartz 2013, Peñuelas et al. 2017). Számos kutatási eredmény igazolja, hogy a hőmérséklet változása jelentősen befolyásolja a növények különböző fejlődési fázisait. A **hőmérséklet** a növények fenológiáját befolyásoló egyik **fő tényező**, melynek változásai komoly hatással vannak a növények földrajzi eloszlására is (Hopkins & Hüner 2008, Lambert et al. 2008). A hőmérséklet mellett a napsugárzás és az elérhető vízmennyiség szabályozzák a növények fenológiáját (Zhao et al. 2013). Az éghajlat változása erősen befolyásolja a növények fenológiáját, felgyorsítva vagy késleltetve a fenofázisokat (Sherry et al. 2007, Wolkovich et al. 2021). Befolyásolja a fenológiai fázis bekövetkeztének idejét, a fenológiai aktivitás intenzitását és a reprodukciót (Wolkovich et al. 2021). A fenológia a növények a felmelegedésre legerősebben válaszoló aspektusa, és ezt a jelenséget a legkönnyebb megfigyelni (Sparks & Menzel 2002). Így nem meglepő, hogy az élőlények klímaváltozásra adott plaztikus válaszai közül bolygószerte a fenológia a legjobban kutatott és dokumentált jelenség (Parmesan & Yohe 2003, Root et al. 2003, Menzel et al. 2006). Annak ellenére, hogy milyen fontos növényi jelleg, a növényi jellegekkel foglalkozó kutatásokban még mindig nem

kapott elég figyelmet, mivel rendszeres adatgyűjtést igényel, így sokkal nehezebb vizsgálni, mint más, egyszeri adatfelvételezést igénylő jellegeket (Wolkovich et al. 2014).

Általában a **hőmérsékletet** tekintik a növényfenológia legfontosabb befolyásolójának (Cleland et al. 2007, Peñuelas et al. 2009a, Chuine 2010, Szabó, Vincze & Czucz 2016). Először 1735-ben, Réne Antoine Ferchault Réaumur publikálta nézeteit miszerint a tavaszi fenofázisok bekövetkeztét a megelőző időszakban akkumulálódott hőmérséklet okozza (Reaumur 1735). Bár az éves átlaghőmérséklet hatása tagadhatatlan (Menzel & Fabian 1999, Chmielewski & Rötzer 2001, Menzel et al. 2006), a különböző fenofázisokra eltérő időszakok hőmérséklete mutatkozik a legerősebb befolyásoló tényezőnek (Fitter et al. 1995, Chmielewski & Rötzer 2001, Gill et al. 2015, Zhang et al. 2015, Chitu & Paltineanu 2020). Például a koratavasszal (áprilisig) virágzó fajok virágzásának idejére leginkább a virágzást megelőző két hónap hőmérséklete, míg a nyáron virágzó fajok esetében a virágzást megelőző négy hónap hőmérsékleti értékei bizonyultak meghatározónak (Fitter et al. 1995). Szabó, Vincze és Cúc (2016) is hasonló eredményre jutottak, azt találták, hogy a virágzást megelőző 2-3 hónap átlaghőmérséklete a meghatározó a virágzás idejét illetően. A melegedés a tavaszi fenofázisok korábbra, míg az őszi fenofázisok későbbre tolódását, ezáltal a vegetációs időszak hosszabbodását okozza (Menzel et al. 2006). Mindazonáltal a növények a hőmérséklet változására adott fenológiai válaszaik messze nem lineárisak (Fu et al. 2015). Ezen kívül kutatások igazolják, hogy a tavaszi időszakban a fenológia érzékenyebben reagál a nappali időszakban bekövetkező hőmérséklet-emelkedésre, mint az éjszakaira, mind faj, mind életközösség-szinten (Piao et al. 2015, Rossi & Isabel 2017). Figyelembe véve, hogy az elmúlt évtizedekben az éjszakai időszak melegedése gyorsabb volt mint a nappalié (Davy et al. 2017) az aszimmetrikus melegedés fenológiai modellekből való hiányzása a tavaszi fenológia hőmérséklet-érzékenységének alulbecsléséhez vezethet (Piao et al. 2015). Szintén fontos megjegyezni, hogy bár a tavaszi fenofázisok nagy korrelációt mutatnak az őket megelőző néhány hónap átlaghőmérsékletével, nem szabad figyelmen kívül hagyni a fotoperiódus és a vernalizáció esetleges módosító hatását sem (Körner & Basler 2010, Tookey & Battey 2010, Cook et al. 2012b). A hőmérséklet emelkedése egy bizonyos szint után a rügyfakadás fenológiai érzékenységének csökkenéséhez vezet, valószínűleg mivel az egyre melegedő telek nem biztosítják a tavaszi generatív fázis megindulásához elengedhetetlen téli nyugalmi állapothoz szükséges alacsony hőmérsékletet (Fu et al. 2015, Vitasse et al. 2018). A **fotoperiódus** szintén fontos tényező a növények fenológiája számára (Flynn & Wolkovich 2018, Körner & Basler 2010). Kulcsszerepe van az őszi fenofázisok (lombszíneződés és lombhullás) szabályozásában (Cooke et al. 2012). Mérsékelt égövi erdőkben a növények fenológiáját az **elérhető víz** és tápanyagok mennyisége is befolyásolja, ennek mértéke azonban kisebb a hőmérséklet és fotoperiódus hatásához képest (Jaworski & Hilszczański 2013). Sherry és mtsai (2007) manipulációs kísérlete azt az eredményt hozta, hogy a megemelt hőmérséklet önmagában is hatással volt a vizsgált fajok reprodukciós fenológiájára, a megemelt hőmérséklet öntözéssel együtt, szintén, azonban az öntözés önmagában csekély hatással volt a vizsgált fenofázisokra. Amelia és mtsai (2017) kutatása, azt találta, hogy a virágzás idejét az adott területen lévő növényfajok diverzitása is befolyásolja. Kimutatták, hogy a csökkent növényfaj-diverzitás a legtöbb faj virágzását korábbra tolta.

A legtöbb kutatás a magasabb átlaghőmérséklet hatására **előbbre tolódott virágzásról** (Menzel & Fabian 1999, Chmielewski & Rötzer 2001, Schwartz et al. 2006, Menzel et al. 2006, Verbényiné Neumann & Czobel 2021, Verbényiné Neumann et al. 2023), és sokszor intenzívebb reprodukciós fenológiáról számol be (Wookey et al. 1993, Alatalo & Totland 1997, Stenstrom & Jonsdottir 1997, Price & Waser 1998, Cleland et al. 2012). A tavaszi fenofázisok korábbra tolódását leginkább Európában, Észak-Amerikában és Kelet-Ázsiában kutatták, mind hagyományos terepi adatgyűjtéssel, mind távérzékeléssel. A legkülönbözőbb területen, módszerrel, időtávlatban és fajokon végzett kutatás mind kimutatta a tavaszi fenofázisok korábbra tolódását (Piao et al. 2019). Az emelkedő hőmérséklet hatására a virágzás **hossza**

általában csökken (Sherry et al. 2007, Miller-Rushing & Inouye 2009, Bock et al. 2014, Nagahama et al. 2018, Stephens et al. 2022).

Menzel és Fabian (1999) az IPG hálózat adatainak elemzésekor arra jutottak, hogy Európában 1959 és 1993 között a **tavaszi fenofázisok**, pl. a rügyfakadás 6 nappal korábbra tolódtak. Ez 6 nap/1°C fenológiai érzékenységet jelent. Menzel és mtsai (2006) a COST action 725 adatbázis elemzésekor arra jutottak, hogy a tavasz kezdete évtizedenként átlagosan 2,5 nappal tolódott korábbra a vizsgált időszakban. Megállapították, hogy a tavasz kezdetének átlagos fenológiai érzékenysége 2,5 nap/1°C, míg az ősz fenológiai érzékenysége 1 nap/1°C. A hőmérséklet emelkedése a tavasz kezdetét korábbra, míg az ősz bekövetkeztét későbbre tolta. Megállapították továbbá, hogy a fenológiai változások a hőmérsékletnek voltak köszönhetőek (Menzel et al. 2006). Zohner és Renner (2018) a PEP725 adatai alapján a fás- és lágyszárú növényzet tavaszi kizöldülésének („*leaf-out*”) 4.3 ± 0.2 nap/1°C-os előretolódásával számol. Parmesan és Yohe (2003) globális metaanalízise a tavaszi fenofázisok évtizedenkénti 2,3 napos korábbra tolódását állapította meg, míg Root és mtsai (2003) kutatása globálisan évtizedenként 5,1 napos eltolódást talált. Menzel (2000) az IPG hálózat adatbázisa alapján megállapította, hogy a tavaszi fenofázisok 1959 és 1996 között átlagosan 6,3 nappal tolódtak korábbra. Fitter és Fitter (2002) többszáz növényfajt vizsgált, és megállapította, hogy az 1954–1990 közötti időszak átlagához képest az 1990-es években a fajok virágzása átlagosan 4,5 nappal korábbra tolódott. Az Egyesült Államokban orgona, alma és szőlő vizsgálatával megállapították, hogy a tavasz a XX. század második felében 2-8 nappal korábbra tolódott (Schwartz & Reiter 2000, Wolfe et al. 2005). Rötzer & Chmielewski (2001) kutatása kimutatta, hogy Európában 1 °C hőmérséklet-emelkedés a vegetációs időszak kezdetét 6,7 nappal tolja korábbra. Schwartz és mtsai (2006) az 1955 és 2002 közötti időszakra nézve azt találták, hogy az északi féltekén az első levelek megjelenésének időpontja („*first leaf date*”) évtizedenként 1,2 nappal, míg az utolsó fagyos nap évtizedenként 1,5 nappal tolódott korábbra. Bertin (2008) azt találta, hogy a kilombosodás („*leafing*”) és a virágzás 1°C hőmérséklet-emelkedés mellett átlagosan 4-5 nappal korábbra tolódott.

A **távérzékeléssel** végzett kutatások általában a vegetációs időszak kezdetére és végére fókuszálnak (Cleland et al. 2007). Ezen kutatások, összhangban a hagyományos terepi adatgyűjtések eredményeivel a vegetációs időszak kezdetének jelentős korábbra tolódását állapították meg (Piao et al. 2019).

A hagyományos, terepi adatgyűjtésekhez hasonlóan, a **manipulációs (melegítéssel) kísérletek** is a növények fejlődésének és virágzásának korábbra tolódását figyelték meg (Arft et al. 1999, Price & Waser 1998, Dunne et al. 2003, Morin et al. 2010), a legnagyobb előretolódást a kora tavaszi fajok mutatták (Dunne et al. 2003). Sherry és mtsai (2007) melegítéssel kísérletében a korai fajok virágzása korábbra, míg a később virágzóké későbbre tolódott, feltételezhetően, hogy elkerülik a nyári hőmérsékleti csúcsot.

Fenológiai szempontból a tavaszhoz képest az **ősz** egy sokkal kevésbé kutatott időszak (Gallinat et al. 2015, Xie et al. 2018). A az eddig végzett kutatások azonban kimutatták, hogy a korunkban tapasztalható klímaváltozás későbbre tolta az őszi fenofázisokat, a levélszíneződést és lombhullást (pl. Parmesan & Yohe 2003, Kunken et al. 2004, Bertin 2008, Gill et al. 2015, Jeong et al. 2011, Menzel et al. 2006, Piao et al. 2006, Verbényiné Neumann et al. 2023). Menzel és Fabian (1999) az IPG hálózat adatainak elemzésekor arra jutottak, hogy Európában 1959 és 1993 között az őszi fenológiai események, mint pl. a levélszíneződés 4,8 nappal későbbre tolódtak. Menzel és mtsai (2006) a COST action 725 adatbázis elemzésekor megállapították, hogy az ősz fenológiai érzékenysége 1 nap/1°C. Menzel (2000) az IPG hálózat adatbázisa alapján megállapította, hogy az őszi fenofázisok 1959 és 1996 között összesen átlagosan 4,5 nappal tolódtak későbbre. Menzel és mtsai (2006) elemzése szerint 1971 és 2000 között a levélszíneződés fenológiai érzékenysége Németországban 2,4 nap/1°C volt, míg a tavaszi fenofázisoké -4,6 nap/1°C. A magasabb hőmérséklet hatására a tavaszi fenofázisok korábbra,

míg az őszi későbbre tolódtak. Néhány korábbi (Estiarte & Peñuelas 2015, Liu et al., 2016) és a PhenObs Hálózat adatait feldolgozó kutatás (Sportbert et al. 2022) azt találta, hogy szárazabb körülmények között az őszi szenescencia korábbra tolódik.

Az eddigi eredmények alapján úgy tűnik, hogy a klímaváltozás, főleg a hőmérséklet-emelkedés őszi fenofázisokra gyakorolt hatása gyengébb, mint a tavaszokra gyakorolt hatása, különösen Európában (Piao et al. 2019). Menzel és mtsai (2006) 21 ország fenológiai adatbázisát felhasználva arra jutottak, hogy a levélszíneződés és lombhullás 1971 és 2000 között évtizedenként mindössze 0,2 nappal tolódott későbbre, és az adatbázis mindössze 48 %-a mutatott későbbre tolódást. A PEP725 adatbázist feldolgozva arra jutottak, hogy 1982 és 2011 között a későbbre tolódás csupán 0,1 nap volt évtizedenként (Piao et al. 2019). Kínában ezzel szemben az eltolódás mértéke évtizedenként 2,6 nap volt (Ge et al., 2014, Piao et al. 2019). Jeong és Medvigy (2014) az Amerikai Egyesült Államokban a levélszíneződés évtizedenkénti 2,4-3,6 napos eltolódását találta. A kora tavaszi fajok fenológiája mutatja a legnagyobb eltolódást (Fitter & Fitter 2002, Menzel 2003, Sparks & Menzel 2002, Menzel et al. 2006), valószínűleg a tavaszi hónapok nagyobb hőmérsékleti ingadozása miatt, és jobban jelezték a hőmérséklet változását (Menzel et al. 2006) Galen & Santon 1995 szerint ennek oka, hogy ezen fajok fenológiáját nagyban befolyásolja a hóolvadás ideje. Az őszi fenológia és hőmérséklet kapcsolata homályosabb volt. A levélszíneződés későbbre tolódott, a termésérés azonban korábbra. A fenológiai érzékenység tavasszal  $-4,6$  nap / $1^{\circ}\text{C}$ , ősszel  $+2,4$  nap / $1^{\circ}\text{C}$  volt, a kora tavaszi fázisok voltak a legerősebbek. Felmerül a kérdés, hogy az emelkedő őszi hőmérséklet akadályozni fogja-e a vernalizációt, és ez végső soron későbbre tolja-e majd a tavaszi fenofázisokat (Menzel et al. 2006). A tavaszi fenofázisok korábbra tolódása tehát egyértelműen korrelál a hőmérséklet emelkedésével, míg az őszi fenofázisokat azonban több tényező is befolyásolja (Estrella & Menzel 2006, Menzel 2003). A tavaszi fenofázisok bekövetkeztének ideje korrelál az őszi fenofázisok bekövetkeztének idejével (Piao et al. 2019). Ennek oka lehet, hogy a korábbra tolódott tavaszi aktivitás felgyorsítja a talajnedvesség csökkenésének ütemét, mely nyári szárazsághoz vezet (Buermann et al. 2013), és végső soron korábbra tolja az őszi szenescenciát (Piao et al. 2019).

Az őszi fenofázisok mozgatórugóinak megértése és előrejelzése összességében sokkal bonyolultabb feladat mint a tavaszi fenofázisoké (Sparks & Menzel 2002). Az őszi fenofázisok ideje azonban sokkal kevésbé változik az egyes évek között, valamint kevésbé érzékeny a hőmérsékletre, mint a tavaszi fenofázisoké (Barr et al. 2004).

A fenofázisok korábbra és későbbre tolódása természetesen hatással van a **vegetációs időszak hosszára** is. A Nemzetközi Fenológiai Kertek (IPG) hálózat adatai alapján úgy tűnik, hogy az 1960-as évektől az ezredfordulóig a vegetációs időszak 10,8 nappal hosszabb lett (Menzel & Fabian 1999, Menzel 2000). Chmielewski és Rötzer (2001) fásszárúak esetében az 1969–1998 közötti időszakra 5 nap/ $1^{\circ}\text{C}$  fenológiai érzékenységet mutatott ki. A távérzékelés új távlatokat nyitott a fenológia kutatásában, különösen a vegetációs időszak kezdetének és végének táji léptékű vizsgálatában. (Piao et al. 2019). Távérzékeléssel gyűjtött adatok alapján az 1980-as években a vegetációs időszak kezdete globálisan  $8 \pm 3$  nappal előre tolódott, míg a vegetációs időszak vége  $4 \pm 2$  nappal későbbre (Menzel & Fabian 1999). A kitolódott vegetációs időszak egyik következménye az északi féltekén a vegetációs időszakon belüli fagyos napok (minimum hőmérséklet  $< 0^{\circ}\text{C}$ ) megnövekedett száma, különösen a tavaszi időszakban (Liu et al. 2018).

A fenológiai változások befolyásolják az egyedek **fizikai állapotát** („*fitness*”) (Willis et al. 2008, Burkle et al. 2010), az egyedek közti interakciókat (Miller-Rushing et al. 2010, Yang & Rudolf 2010), az életközösségek szerkezetét és az **ökoszisztéma működését** (Suttle et al. 2007, Mooney et al., 2009, Yang & Rudolf 2010). A klímaváltozás azon túl, hogy megváltoztathatja a növények fenológiáját, negatívan befolyásolhatja az egyedek fizikai állapotát is, mivel számukra esetleg kedvezőtlen abiotikus feltételeket teremt, valamint megváltoztatja a **fajok közti kapcsolatok**

erősségét („*phenological mismatch*”) (Prather et al. 2023). Ezek a fenológiai eltérések megbonthatják a **trofikus szintek** kapcsolatát is (Tylianakis et al. 2008, Renner & Zohner 2018). A felmelegedés hatására megváltozhat a növények kapcsolata a versenytársaikkal, a növényevőkkel, patogénekkal és szimbiotákkal, mely befolyásolja a növényfajok teljesítményét („*species performance*”) (Post & Pedersen 2008, Hegland et al. 2009, Van der Putten et al. 2010). Egy **faj teljesítménye** („*species performance*”) megmutatja, hogy az adott faj hogyan veszi fel és hasznosítja az erőforrásokat a populáció méretének fenntartásához és növeléséhez, mely befolyásolja a növényközösségek változásának ütemét és irányát (Sheley et al. 2006, James 2012). Cleland és mtsai (2012) azt állapították meg, hogy azok a fajok, amelyek fenológiája előbbre tolódott, nagyobb teljesítményt mutattak. Azonban a késleltett fenológiai is előnyös lehet azon fajok számára, amelyek a vegetációs időszak későbbi szakaszában aktívak, és szemben a kora tavaszi fajokkal, kevésbé érzékenyek a felmelegedésre (Menzel et al. 2006, Miller-Rushing & Primack 2008a). Cleland és mtsai (2012) szerint a magasabb hőmérséklet hatására felgyorsult fenológia és a növények teljesítménye közti korreláció azokban az életközösségekben megfigyelhető, ahol a hőmérséklet és nem a csapadék (talajnedvesség) a növények fejlődését befolyásoló fő (limitáló) tényező. A fajok teljesítményét megemelkedett hőmérséklet mellett számos egyéb tényező is befolyásolja, mint a trofikus kapcsolatok, valamint a növény-beporzó kapcsolatok is (Hegland et al. 2009). A különböző taxonómiai csoportok és trofikus szintek közti eltérő fenológiai érzékenység megváltoztathatja a növények és növényevők közti kapcsolatot (Tylianakis et al. 2008). A virágzás-fenológiában bekövetkezett változások így megszakíthatják a növények és beporzók közti kapcsolatot (Forrest & Miller-Rushing 2010). Ahol a növények fenofázisait elsősorban a hőmérséklet szabályozza, a beporzókét pedig a fotoperiódus, ez könnyen a kapcsolat megszakadásához vezethet (Cleland et al. 2007). A növény-állat (pl.: növény-növényevő, növény-beporzó, stb.) kapcsolatok akkor is megszakadhatnak, ha eltérően reagálnak a bekövetkező hőmérséklet-emelkedésre (Parmesan 2006). A klímaváltozás hatására bekövetkező fenológiai eltolódás részben vagy teljesen megszüntetheti a mutualisztikus kapcsolatokban résztvevő fajok életciklusának időbeli átfedését (Rafferty et al. 2015). A növény-állat kölcsönhatásokban bekövetkező változások, a fenológiai szinkron megbomlása nagymértékben megváltoztathatja a növénytársulások szerkezetét és dinamikáját (Parmesan 2006, Kharouba et al. 2018) de jelenleg még messze vagyunk attól, hogy általános következtetéseket vonjunk le (Kharouba et al. 2018). A kompetíciós vagy a ragadozó-zsákmány közti kapcsolatok megszakadása veszélyeztetheti az emberiség számára nélkülözhetetlen ökoszisztéma-szolgáltatások fennmaradását is, és számos kihaláshoz vezethet (Root & Schneider 1993, Millennium Ecosystem Assessment 2005).

A **túlélés** gyakran a fenológiai események időzítésén múlik (Forrest & Miller-Rushing 2010), mely pedig közvetlenül befolyásolja a **populációdinamikát**. Végző soron tehát a klímaváltozás okozta fenológiai eltolódások (phenological shifts) befolyásolják a populációk fennmaradását („*population persistence*”) (Amy et al. 2021). A **reprodukciós fenológiában** bekövetkezett változások általában megváltoztatják a populációdinamikát és a társuláson belüli viszonyokat a jövő generációira nézve, és így befolyásolhatják az evolúciós folyamatokat is (Fitter & Fitter 2002; Sherry et al. 2007). A virágzás-fenológiában bekövetkezett változások megszakíthatják a növények és beporzók kapcsolatát, különösen, ha a beporzók jelenléte időszakos („*seasonal*”), ez csökkentheti a maghozamot és a rovarbeporzók táplálékforrását, csökkentve ez által mindkét résztvevő faj túlélési esélyeit. (Fitter & Fitter 2002, Memmott et al. 2007). A korábbra tolódott virágzás megkönnyíti a növények számára, hogy magot érleljenek a forró és száraz nyárközepi időszak előtt. Ez javíthatja a növények fizikai állapotát (plant fitness), azonban megnövelheti annak a veszélyét, hogy egy késői fagyeseemény kárt okoz bennük (Körner 2003, Inouye 2008, De Valpine & Harte 2001). Springate és Kover (2014) szerint a korábbra tolódott fenológia negatívan befolyásolja a növénypopulációkat. Más kutatások eredményei (Willis et al. 2008, Hulme et al. 2011, Cleland et al. 2012) szerint azok a fajok, amelyek fenológiája követi a



felmelegedést, előnybe kerülhetnek (megnövekedett abundancia) azokkal szemben, amelyek fenológiája nem követi a klímaváltozást. Előbbieket hátrányosan érinti a rendelkezésükre álló rövidebb vegetációs időszak, és a mutualista kapcsolatok esetleges megszakadása (Cleland et al. 2012). Láthatjuk tehát, hogy a fenológiai események a növények fizikai állapotára („*fitness*”) gyakorolt hatásaival kapcsolatban és a növényfajok fennmaradása szempontjából oly fontos mutualista kapcsolatok terén nincs egyetértés, míg egyes kutatások szerint a fenológiai előretolódása (pl. Parmesan 2006, Forrest & Miller-Rushing 2010), mások szerint az eltolódás hiánya veszélyezteti (pl. Cleland et al. 2012) e kapcsolatok megmaradását.

Egyes kutatások szerint azonban a **reproduktív fenológiai események** bekövetkeztének ideje megbízhatatlan mércéje lehet a populáció fennmaradását fenyegető veszélyeknek, még akkor is, ha a korábbi virágzás jelentős szaporodási veszteségekkel jár. Ehelyett az éghajlatváltozás egyéb, kevésbé szembetűnő demográfiai hatásai növelhetik a növénypopulációk **kihalási kockázatát**. A szaporodási fenológiában bekövetkezett változásokra vonatkozó bőséges bizonyíték, valamint kevés bizonyíték arra vonatkozóan, hogy ezek a változások ténylegesen befolyásolják a szaporodási sikert, értékesek, de hiányos, sőt félrevezető képet festhetnek a populációk klímaváltozásra adott válaszairól (Iler et al. 2019).

Fontos megjegyezni, hogy a reproduktív fenológia klímaváltozásra adott eltérő válaszai megkönnyíthetik az **idegenhonos fajok invázióját** is (Prevéy & Seastedt 2014, Sherry et al. 2007, Mojzes et al. 2020), mely súlyos következményekkel jár az ökoszisztémák egészségére nézve (Suttle et al. 2007). Az invazív fajok fenológiai érzékenysége nagyobb mint az őshonosaké, így fenológiájukkal jobban követik a megváltozott éghajlati viszonyokat (Willis et al. 2010, Zettlemoyer et al. 2019). Kutatások igazolták, hogy azok a fajok, melyek fenológiája követi a hőmérséklet változását, előnybe kerülnek azokkal szemben (nagyobb abundanciát mutatnak), amelyek nem, vagy kevésbé követik a változásokat (Willis et al. 2008, Cleland et al. 2012). Sherry és mtsai (2007) melegítéssel kísérletük során azt találták, hogy a nyári hőmérsékleti csúcs előtt virágzó fajok virágzása korábbra, míg az ez után virágzó fajok virágzása későbbre tolódott, egy fenológiai niche-t nyitva, mely a jövőben megkönnyítheti a nem őshonos, özőnfajok terjedését.

A növények esetében a fenológiai események időzítése kritikus lehet a túlélés és a szaporodás szempontjából (Rathcke & Lacey 1985). A klímaváltozás már a 21. század elején is mérhetően **befolyásolta a fajok elterjedési területét**. E hatás a jövőben várhatóan erősödni fog. 2,7 °C feltételezett hőmérséklet-emelkedés mellett 2080-ra a vizsgált európai fajok (1350 faj) több mint fele kerülhet sérülékeny vagy veszélyeztetett státuszba. E hatást enyhítheti a fajok potenciális elvándorlása, azonban a fajok potenciális elterjedési területének bármilyen csökkenése megnöveli a lokális kihalás esélyét (Thuiller et al. 2005). Amennyiben az elvándorlás lehetőségével nem számolunk (mely számos esetben tényleg korlátozott (Czucz 2009)), a vizsgált európai fajok több mint fele sérülékeny státuszba kerül, vagy ki is halhat (Thuiller et al. 2005). Bár az éghajlatváltozásra adott helyi evolúciós válaszok nagy gyakorisággal fordultak elő, nincs bizonyíték a fajok abszolút klímatoleranciájának változására. Ezt a nézetet támasztja alá a közelmúltbeli éghajlati felmelegedés hatására, a fajok elterjedési területének déli és alacsony tengerszint feletti magasságú peremterületei mentén észlelt populációkihalások nagy száma, ami a sok faj elterjedési területeinek összehúzódását, valamint bizonyos faj kihalását eredményezte (Parmesan 2006). A fajok sarkvidékek felé történő elmozdulása és ezzel párhuzamosan a melegkedvelő fajok és társulások tényerése bolygó-szerte megfigyelhető (Parmesan 2006). A jelenségről összességében elmondható, hogy globálisan évtizedenként 6,1 km-es a sarkvidékek irányába és a 6,1 m-es a hegycsúcsok irányába történő fajvándorlással, valamint a tavaszi fenofázisok évtizedenkénti 2,3 napos korábbra tolódásával kell számolnunk (Parmesan & Yohe 2003).

A növényfajok klímaváltozásra adott válaszainak vizsgálatakor egyre nagyobb szerepet kapnak a **melegítési kísérletek** („*warming experiments*”) (Arft et al. 1999, Sherry et al. 2007, Peñuelas et al. 2009, Morin et al. 2010, Kröel-Dulay et al. 2015, Stuble et al. 2021) E kísérletek értékes eredményekkel szolgálnak a klímaváltozás kutatásában, azonban az előrejelzésekben való felhasználásuknál figyelembe kell venni, hogy ezen eredmények sokszor eltérnek a terepi megfigyelések eredményeitől. Wolkovich és mtsai (2014) kimutatták, hogy a melegítési kísérletek igencsak alulbecsülik a növényfenológiai változásokat. Azt találták, hogy a növényfajok tavaszi fenológiai eseményeinek (virágzás és rügyfakadás) korábbra tolódása a melegítési kísérletekben 4-8,5-ször kisebb mértékű a hosszú távú terepi megfigyelések során rögzített értékek.

A klímaváltozás hatására bekövetkező **fenológiai változások visszahathatnak a klímaváltozás** alakulására is (Peñuelas et al. 2009, Richardson et al. 2009). Ez a növényfenológia vízháztartásra és a földi ökoszisztémák és az atmoszféra közti energiaticserélődésre gyakorolt hatásán keresztül valósul meg (Peñuelas et al. 2004, Richardson et al. 2013). A nagyobb lombzat pl. együtt jár a lombkorona párologtató-képességének növekedésével, megváltozott albedóval és megnövekedett felületi aerodinamikai érdességgel, ami elősegíti a turbulencia kialakulását és a hó légkörből való felvételét és leadását oda (Richardson et al. 2013). A felszín hosszabb idejű növényborítása együtt jár a növények megnövekedett párologtatásával, azonban ezzel egyidejűleg a talaj párologtatása csökken. Ahol a talajnedvesség nem limitáló tényező, ott a korábbra tolódott tavaszi fenológiával együtt megnő az evapotranspiráció és a vegetáció nagyobb összborítást, ösztömeget ér el, különösen nyáron (Piao et al. 2019). Fontos megjegyezni, hogy a korábbra tolódott tavaszi növényborítás a párologtatás okán tavasszal és a nyár elején a talajfelszínre nézve hűtő hatással bír, ez a hatás a talajnedvesség párologtatás miatti csökkenésével csökken, majd az ellenkezőjére fordul és melegítő hatássá alakul (Piao et al. 2019). A növényfenológiai változások jövőbeli, az éghajlati rendszerekre való visszahatásának előrejelzése érdekében e szempontok növényfenológiai modellekbe való beépítése kulcsfontosságúnak tűnik az előrejelzés bizonytalanságai ellenére is (Diez et al. 2012).

A **városi éghajlati viszonyokat** a változó globális éghajlati viszonyokhoz hasonlónak tekintik; ezért sok kutató az urbanizált területeket a globális klímaváltozás kis léptékű kísérleteiként vagy modelljeként tanulmányozza (Ziska et al. 2003). Ez lehetőséget ad a tér-idő helyettesítés (space for time substitution) módszerének (Pickett 1989) alkalmazására, melyben előrejelezzük a klímaváltozás fenológiára gyakorolt esetleges jövőbeli hatásait (Rötzer et al. 2000, White et al. 2002, Christmann et al. 2023).

A városi környezetben a növények tavaszi fenofázisai általában korábbra tolódnak mint a környező területeken (Rötzer et al. 2000, Jochner & Menzel 2015, Yao et al. 2017, Luo et al. 2020, Meng et al. 2020, Qui et al. 2020, Jia et al. 2021, Christmann et al. 2023), valamint előfordulhat, hogy hosszabban virágoznak mint a környező rurális területeken (Davis et al. 2016). Az őszi fenofázisok pedig későbbre tolódnak (Neil & Wu 2006, Jochner & Menzel 2015). A megváltozott fenológiát a legtöbb kutatás **városi hősziget**-hatásnak („*urban heat island effect*”) tulajdonítja (Zhang et al. 2004, Neil & Wu 2006). Ziska és mtsai. (2003) szerint erős a korreláció a magas hőmérséklet/magas CO<sub>2</sub>-koncentráció és a korábbra tolódott virágzás között, azonban a hőmérséklet és a CO<sub>2</sub>-koncentráció hatását nem vizsgálták külön. A városi környezet vizsgálatakor nem szabad figyelmen kívül hagyni a fenológiára ható, a természetes környezettől eltérő hatásokat, mint az eltérő légnedvesség-viszonyokat (Pavon & Briones 2001), a fényszennyezést (Longcore & Rich, 2004, Škvareninová et al. 2017, Masetti 2018), a megváltozott talajviszonyokat (Hermann et al. 2018), növény-állat kapcsolatokat (Harrison et al. 2015) és genetikai változatozást (Gorton et al. 2018) valamint a légszennyezést (Mitchell et al. 2018, Grange et al. 2017). A növényfenológia városi környezet hatására bekövetkező elretolódását tehát nem szabad kizárólag a megemelkedett hőmérséklet - a városi hősziget-hatás

- számlájára írni, hiszen ez a jelenség a környezettel való összetett interakcióknak tudható be (Park et al. 2023). Egyes kutatások szerint a városi környezettel szembeni, tehát különböző területek között megvalósuló fenológiai érzékenységet a fent felsorolt zavaró tényezők miatt nem lehet a globális felmelegedéssel szembeni jövőbeli (tehát időbeli) fenológiai érzékenységgel analógnak tekinteni (Wohlfahrt et al. 2019).

Park és mtsai (2023) szerint az urbanizációra adott fenológiai válaszok feltárására szolgáló modellek, amelyek kizárólag a hőmérséklettel való kölcsönhatásra összpontosítanak, valószínűleg túlságosan leegyszerűsítettek. Azonban más kutatók (Zhang et al. 2004, Jochner & Menzel 2015; Lahr et al. 2018, Christmann et al. 2023) szerint a városi környezet bár nem tökéletes modellkörnyezet, de több jellemzője – megemelkedett hőmérséklet és CO<sub>2</sub>-koncentráció, és egyre súlyosbodó szárazságok - miatt alkalmas a növények klímaváltozásra adott jövőbeli válaszainak kutatására.

Összességében elmondható, hogy a városias környezetben a növények többsége korábban virágzik, mint a városon kívüli, azt körülvevő övezetben, azonban a különböző fajok fenológiája eltérő mértékben reagál a városi környezetre: a rovarmegporzású, a kora tavaszi virágzású, az egyéves, a rövid-életű és a lágyszárú fajok fenológiájára erősebben hat a városi környezet. A kutatások alapján a hőmérséklet tűnik a növények fenológiájára legjobban ható tényezőnek (Neil & Wu 2006).

A **növények fejlődési szakaszainak szinkronitása** kritikus fontosságú az ökoszisztéma működésének szempontjából. A Páneurópai Fenológiai Adatbázist (PEP725) felhasználva kimutatták, hogy a globális felmelegedés megváltoztatja a mérsékelt övi növényfajok rügyfakadása és virágzása esetében a populáción belüli szinkronitását. A magasabb hőmérséklet akár 55%-kal csökkenti az egyedek közötti szinkront. Ezek az eredmények előre vetítik a génáramlásra és a trofikus kölcsönhatásokra gyakorolt következményeket. A vizsgált fajok között volt többek közt a saját kísérletemben is szereplő *Galanthus nivalis* és *Prunus spinosa* is (Zohner & Renner 2018).

A kutatások többsége **nem követi** nyomon a vizsgált egyedek **teljes éves fenológiai ciklusát** (Katal et al. 2022). A legtöbb kutatás egyes fenofázisokat céloz meg, legtöbbször a virágzás kezdete, vagy legfeljebb a reprodukzív fenológiai eseményeit vizsgálja (pl. Menzel et al. 2006, Sherry et al. 2007) Viszonylag kevesen vizsgálták a fenofázisok egymásra hatását, egymás közti viszonyait (Liu et al. 2016, Ettinger et al. 2018, Buonaiuto & Wolkovich 2021, Sportbert et al. 2022). Ezen kutatások különböző összefüggéseket fedeztek fel a vizsgált fajok adott éven belüli fenofázisai között. Néhány korábbi (Primack 1987, Ettinger & Wolkovich 2018), és a PhenObs Hálózat adatait feldolgozó friss kutatás azt találta, hogy azon fajok, amelyek korábban kezdtek növekedni, általában korábban is hoztak leveleket, valamint amelyek korábban kezdtek virágozni, korábban is fejezték be a virágzást, és korábban hoztak termést, és szintén korábbra tolódott a szeneszcenciájuk kezdete is (Sportbert et al. 2022). Az őszi fenofázisok korábbra tolódása érdekes eredmény, hiszen ellentmond a korábbi kutatásoknak (pl. Parmesan & Yohe 2003, Kunken et al. 2004, Menzel et al. 2006, Piao et al. 2006, Jeong et al. 2011, Gill et al. 2015). Mivel a fajon belüli (intraspecifikus) válaszok évek közti eltérése nem elhanyagolható (Cleland et al. 2012, Liu et al. 2016, Bucher et al. 2018), különösen fontos a többéves és hosszú távú fenológiai kutatásokat folytatni, hogy el lehessen különíteni az évjáráthatást az éghajlatváltozás hatásától, ki lehessen szűrni, mely fenológiai mintázatok állandóak az évek során és különböznek a különböző klimatikus viszonyok között (Ettinger et al. 2018).

A **klímaváltozás** tehát **beláthatatlan következményekkel** bír a földi ökoszisztémákra nézve. Korunkban az ökológia egyik fő célja annak **előrejelzése**, hogy a fajok és az ökoszisztémák hogyan reagálnak az éghajlatváltozásra. E kutatások nagy része e célokat a fenológia kutatásán keresztül tervezi elérni. A fenológia pontos előrejelzése tehát sok tudományterületen aktuális cél,

de ezek a területek nagyon eltérő perspektívákkal tekintenek a kérdésre (Pau et al. 2011). A társulásokkal foglalkozó ökológusok olyan lokális, rövid távú (általában 1-3 éves) kutatásokra összpontosítanak, amelyek a páronkénti fajkölcsonhatásokat, a trofikus kapcsolatokban bekövetkező változásokat vagy az erőforrásokért való versengést vizsgálják (Sargent & Ackerly 2008, Miller-Rushing et al. 2010, Thackeray et al. 2010). Az éghajlatközpontú tanulmányok hosszú távú (évtizedes) és szinoptikus (ökoszisztémáktól biomokig terjedő) megfigyelésekre támaszkodnak, hogy azonosítsák a minden szinten közös éghajlati hatásokat a fenológiában (Menzel et al. 2006, Schwartz et al. 2006). A fajspecifikus fenológiai kutatások eredményeit folyamat-alapú modelleken keresztül extrapolálták az idő- és térbeli eltolódások előrejelzésének érdekében (Chuine & Beaubien 2001, Morin et al. 2009), azonban ezek a modellek sem veszik figyelembe, hogy ezen folyamatok a társulások szintjén zajlanak (Pau et al. 2011).

A fenológiai vizsgálatok mára előkelő helyet foglal el a globális klímaváltozás kutatásában, köszönhetően annak, hogy az így nyert eredményekkel lehetséges előrejelezni a ciklikus jelenségek bekövetkeztének idejét (Morellato et al. 2016). Ezen eredmények felhasználása a természetvédelem tervezésében azonban sajnos még gyerekcipőben jár (Morellato et al. 2016). Más kutatók szerint, bár a fenológia jól detektálható összefüggéseket mutat az éghajlattal, a genetikától a táji léptékekig; azonban a módszerek még mindig csak igen gyengén képesek megmagyarázni a fajok, élőhelyek fenológiájában tapasztalható különbségek okait, és előrejelezni ezek jövőbeli változásait (Pau et al. 2011). A klímaváltozás fenológiai modelleken keresztüli előrejelzésének lehetőségei tehát még mindig igen korlátozottak (Zhao et al. 2013).

## 2.4 A vizsgált életformákhoz kapcsolódó fenológiai kutatások

A klímaváltozásra a különböző fajok (Root et al. 2003, König et al. 2018) és funkciós csoportok eltérően reagálnak (Lavorel & Garnier 2002, Ibañez et al. 2020). Számos kutatás igazolta, hogy a **korán virágzó fajok érzékenyebben reagálnak** a klímaváltozásra, mint a később virágzóak (pl. Mosquin 1971, Fitter & Fitter 2002, Sparks & Menzel 2002, Menzel et al. 2006, Miller-Rushing & Primack 2008, Cook et al. 2012a, 2012b, Wolkovich et al. 2012, 2014). Jelenleg úgy tűnik, hogy a virágzás és termésérlelés időtartama, az őszi szenescencia bekövetkeztének ideje és a vegetációs időszak hossza az egyes fajok esetében filogenetikailag rögzített tulajdonság (Sporbert et al. 2022).

Nedves kontinentális éghajlaton a **kora tavaszi fajok** tűnnek a legérzékenyebbnak a hőmérsékletre, azonban az előrejelzésekkel ellentétben a később virágzó fajoknál nincs szimmetrikus hőmérséklet-érzékenység növekedés, mivel szinte minden faj jóval az őszi hőmérsékletváltozás előtt virágzik (Wolkovich et al. 2014). A magasabb hőmérséklet hatására mind az egyéves, mind az évelő fajok virágzása előbbre tolódik, azonban nem minden csoport reagál egyformán. A koratavasszal virágzó fajok nagyobb elöretolódást mutatnak, mint a tavasz közepén vagy még később virágzóak (Fitter & Fitter, 2002, Hepper 2003, Traidl-Hoffmann et al. 2003). Ezen kívül a **rovarmegporzású** növényfajok nagyobb elöretolódást mutatnak, mint a szélmegporzású fajok (Fitter & Fitter 2002) valamint az egyéves fajok virágzásának elöretolódása jelentősebb, mint az évelőké (Fitter & Fitter 2002). A magasabb szélességi fokokon megtalálható növényfajok várhatóan szintén érzékenyebben fognak reagálni az emelkedő hőmérsékletre (Pau et al. 2011). A különböző biotopok éghajlatváltozásra adott válaszaiban is eltérések várhatóak. Míg a mérsékelt égövi fajok várhatóan időbeli (fenológiai) eltolódással fognak reagálni, addig a trópusi területeken a fajok területi elterjedésének változása vagy evolúciója várható (Pau et al. 2011). A különböző növényi jellegeket tekintve („*traits*”) azt találták, hogy a kisebb termetű fajok, különösen a lágyszárúak esetében, korábban virágoztak a nagyobbakhoz képest (Sporbert et al. 2022). Sherry és mtsai (2007) kimutatták, hogy magasabb

hőmérséklet hatására az évelő fajok reprodukzív fenológiájának időtartama hosszabb volt, mint az egyéveseké.

A **melegítéssel kísérletek** is arra az eredményre jutottak, hogy a kora tavaszi fajok fejlődésének és virágzásának hőmérséklet-emelkedés hatására bekövetkezett korábbra tolódása nagyobb mértékű, mint a később virágzó fajoké (Price & Waser 1998, Arft et al. 1999, Dunne et al. 2003). Sherry és mtsai (2007) kimutatták, hogy a felmelegedés előretolta a nyári hőmérsékleti csúcs előtt virágzó fajok fejlődését, de késlelteti a hőmérsékleti csúcs után virágzó fajok fejlődését, ami egy olyan nyitott fenológiai rést eredményez, amely megkönnyítheti a nem őshonos fajok jövőbeni invázióját. Nemcsak a koratavasszal virágzó fajok fenológiája érzékenyebb a hőmérséklet változására, hanem a különböző életközösségek fenológiai érzékenysége között is jelentős eltérés figyelhető meg. Például az erdők tavaszi kilombosodása érzékenyebb a hőmérséklet változására mint a szavannák kiszáradása, ennél még kevésbé érzékeny a gyepvegetáció aktivitása, tehát e három vegetáció típus aktivitása különböző mértékben tolódik el ugyanakkora hőmérséklet-változás hatására (Zhang et al. 2004).

A kora tavaszi fajok fenológiájának erőteljesebb eltolódásának ennek egyik lehetséges oka, hogy míg a nedves kontinentális éghajlaton a növények fejlődését vegetációs időszak kezdetekor főleg az abiotikus tényezők határozzák meg, addig a vegetációs időszak későbbi periódusaiban megnövekszik a szerepe a biotikus interakcióknak, tehát nagyobb az erőforrásokért folytatott versengés, mivel ebben az időszakban a fenofázisok átfedésének esélye nagyobb (Morales et al. 2005).

A különböző életformák fenológiai mintázatának a környezeti hatásokra adott válaszairól **kevés kutatás történt**. A meglévő kutatások is elsősorban a tundra övezetben (Molau 1997, Molau et al. 2005) és Dél-Amerikában (Ramírez 2002, Golluscio et al. 2005, Campanella & Bertiller 2008) zajlottak. Ramírez (2002), a venezuelai szavanna különböző élőhelytípusain vizsgálta az eltérő életformák fenológiai mintázatát. A különböző életformák fenológiai mintázatai között jelentős eltérést tapasztalt, a vizsgálat azonban csak a különböző funkciós csoportok életstratégiájára terjedt ki (pl. az egyéves és évelő lágyszárúak valamint liánok az esős évszakban virágoztak, a fák és cserjék azonban épp ellenkezőleg a száraz évszakban). Nem vizsgálták a különböző csoportok fenológiájának a hőmérséklet és/vagy csapadék változására adott, esetlegesen eltérő mértékű és/vagy irányú választ. Campanella Bertiller (2008) Patagóniában a különböző vizsgált fajok fenológiai válaszai között mutatott ki különbséget, a különböző életformák fenológiai válaszai alapján a vizsgálat során nem voltak elkülöníthetőek. Molau és mtsai (2005) a virágzás megjelenésének időpontja szempontjából vizsgálták a Raunkiaer-féle életformákat, és a fenológiai válaszok szempontjából szignifikáns különbséget mutattak ki köztük. Életformákon belül a legnagyobb szórást (SD) a terofitonok mutatták, legkisebbet, szinte elhanyagolható, a hemikriptofiták.

Míg a lágyszárúak virágzási idejét sok kutatásban tanulmányozták, viszonylag **kevés adat áll rendelkezésre a lágyszárú fajok levél- és termésfenológiájáról** (Nordt et al. 2021). Becslések szerint a világ fajainak több mint 50%-a (FitzJohn et al. 2014) és a mérsékelt égövi ökoszisztémák fajainak 85%-a nem fásszárú (Ellenberg 1996). A lágyszárú fajok nagy aránya ellenére a fenológiai kutatások, különösen a lombhullással és a levelek szenescenciájával kapcsolatban, hagyományosan a fákra és a cserjékre vagy a haszonnövényekre összpontosítottak (Chmielewski & Rötzer 2001, Vitasse et al. 2011, Panchen et al. 2014, 2015).

Általánosságban véve a **legtöbb fenológiai kutatás a fásszárúakról** és a gazdaságilag hasznosított növényekről készült (Katal et al. 2022). A Raunkiaer-féle életforma osztályozás életformái közül tehát a legnagyobb figyelem a **fanerofitonokra** irányult (pl. Walkovszky 1998, Chmielewski & Rötzer 2001, Estrella & Menzel 2006, Menzel et al. 2006, Morin et al. 2010,

Hänninen 2011, Vitasse et al. 2011, Panchen et al. 2014, 2015, Gallinat et al. 2015, Gill et al. 2015, Buonaiuto & Wolkovich 2021, Verbényiné Neumann et al. 2023).

A legtöbb fásszárúakat célzó kutatás kimutatta, hogy a magasabb hőmérséklet hatására a **tavaszi fenofázisok** (rügyfakadás, kilombosodás, növekedés kezdete és virágzás) előbbre tolódtak (Walkovszky 1998, Chmielewski & Rötzer 2001, Schieber et al. 2009, Morin et al. 2010, Chitu et al. 2020, Vander et al. 2022a, 2022b, Verbényiné Neumann et al. 2023). Számos kutatás igazolta, hogy a tavaszi kilombosodás („*leaf out*”) korábbra tolódik a magasabb hőmérséklet hatására (Menzel & Fabian 1999, Chmielewski & Rötzer 2001, Menzel et al. 2001, 2006, Richardson et al. 2006, Wesolowski & Rowinski 2006, Delbart et al. 2008, Carroll et al. 2009, Morin et al. 2009, Vitasse et al. 2011, Chen & Xu 2012, Cong et al. 2012, Panchen et al. 2014, Zhang et al. 2015). Zhang és munkatársai (2015) azt találták, hogy a kilombosodás a február–március–áprilisi időszak átlaghőmérsékletére a legérzékenyebbek. Az időszak átlaghőmérsékletének 1°C-os emelkedésénél a tavaszi fenofázisok 4 nappal való korábbra tolódását figyelték meg, a fenológiai érzékenység azonban nagy mértékű eltérést mutatott fajok és térségek között. Panchen és mtsai (2014) azt találták, hogy a cserjefajok előbb lombosodnak ki, mint a fafajok. Miller-Rushing és Primack (2008b) a kísérletben is szereplő közönséges fagyallal (*Ligustrum vulgare* L.) kapcsolatban megállapították, hogy 1 °C hőmérséklet-emelkedés 6 nappal tolta korábbra a faj virágzását. Az emelkedő hőmérséklet hatására a kilombosodás mellett a fafajok virágzás is korábbra tolódik (pl. Vitasse et al. 2014, Chitu & Paltineanu 2020, Wang et al. 2022). Morin és mtsai (2010) **melegítési kísérlete** kimutatta, hogy a rügyfakadást és a növekedés kezdetét a magasabb hőmérséklet előbbre tolta, azonban a reakció nem volt lineáris. Richardson és mtsai (2006) szerint a tavaszi fenofázisok idejét a felmelegedés akkumulált mértéke („*Heating Degree Days, HDD*”) határozza meg. Több kutatás kiemelte a korábbra tolódó **tavaszi fenofázisok** esetén fennálló **fagyveszélyt** (Hänninen 1991, 2011, Inouye 2008, Lessard-Therrien et al. 2014, Vitasse et al. 2014, Polgar & Primack 2011, Chitu & Paltineanu 2020, Schermer et al. 2020, Wang et al. 2022). Mivel a legtöbb és legátfogóbb fenológiai kutatás a gazdaságilag hasznosított növényfajról készült, ez igaz a fásszárúakra is, tehát a gyümölcsfák és a borszőlő a történelmi időktől fogva e kutatások célcsoportjai voltak (Chmielewski et al. 2004, Chuine et al. 2004, http12, Aono & Kazui 2008, Chmielewski et al. 2013, Chitu & Paltineanu 2020). E kutatások mind beszámolnak a tavaszi fenofázisok korábbra tolódásáról. Ki kell emelni, hogy ezen belül a kora tavaszi fenofázisok reagáltak a legérzékenyebben a felmelegedésre (Chmielewski et al. 2004, Zhang et al. 2015, Chitu & Paltineanu 2020). Chitu és Paltineanu (2020) romániai alma- és körtefák hosszú távú adatsorainak vizsgálatakor azt találták, hogy míg a rügyfakadás és a virágzás kezdete szignifikánsan előbbre tolódott, a virágzás vége nem tolódott szignifikánsan előbbre. Megállapították továbbá, hogy a fák virágzásának ideje a márciusi maximum-és átlaghőmérséklettel korrelált a legerősebb mértékben.

A **fásszárúak őszi fenofázisai**, bár a lágyszárúakénál jobban kutatott terület, még így is alulmarad a tavaszi fenofázisaikhoz képest (Hänninen 2011, Gallinat et al. 2015). Az őszi fenofázisokat befolyásoló tényezők szerepe sokkal kevésbé tisztázott, mint a tavasziaké (Menzel et al. 2006, Vitasse et al. 2011, Chen et al. 2020, Zani et al. 2020). Ellentétes hatások és folyamatok (korábbra és későbbre tolódás) egyszerre figyelhetők meg (Gill et al. 2015, Chen et al. 2020, Zani et al. 2020).

A legtöbb kutatás kimutatta, hogy a magasabb hőmérséklet hatására az őszi fenofázisok **későbbre tolódnak** (pl. Menzel & Fabian 1999, Menzel et al. 2006, Schieber et al. 2009, Ibanez et al. 2010, Gill et al. 2015, Zhang et al. 2015, Vander et al. 2022a, 2022b, Xing et al. 2022, Verbényiné Neumann et al. 2023). Az őszi fenofázisok nagyobb mértékben tolódnak későbbre az alacsony szélességi körökön (az északi félteke 25 és 49 szélességi foka között), mint a magasaknál (az északi félteke 50 és 70 szélességi foka között) (Gill et al. 2015). Zhang és mtsai

(2015) azt találták, hogy az őszi fenofázisok az augusztus–szeptember–októberi időszak átlaghőmérsékletére a legérzékenyebbek. Az időszak átlaghőmérsékletének 1°C-os emelkedésénél az őszi fenofázisok 2,1 nappal való későbbre tolódását figyelték meg. Gill és mtsai (2015) kutatása szerint az októberi hőmérséklet van a legnagyobb befolyásoló erővel az őszi fenofázisok bekövetkeztének idejére. Ezt követi lehűlés akkumulált mértéke („*Cooling Degree Days, CDD*”), a szélességi fok, és csak legvégül a csapadékösszeg. Morin és mtsai (2010) **melegítési kísérlet** során kimutatták, hogy magasabb hőmérséklet mellett az őszi levélszíneződés későbbre tolódik, a kapcsolat azonban nem lineáris.

**Ellentétes hatásként** működhet az őszi szénescenziát jelentősen befolyásoló **fotoperiódus**, tehát a nappalok őszi rövidülése, mely biztonsági mechanizmusként megakadályozhatja, hogy a lombszíneződés és lombhullás túl későre tolódjon, megvédve így a fákat az esetleges őszi fagyveszélytől (Chen et al. 2020). Tanino és mtsai (2010) szerint a rövid fotoperiódus és a magasabb hőmérséklet együttes hatása előbbre tolhatja az őszi fenofázisokat. Szintén érdekes kérdés a **csapadék** szerepe. Lehetséges, hogy míg a magasabb éjszakai hőmérséklet későbbre tolja a lombszíneződés kezdetét, addig a magasabb nappali hőmérséklet a nagyobb arányú párologtatásból kifolyólag korábbra tolja azt (Wu et al. 2018, Chen et al. 2020). A nyári és őszi szárazság korábbra tolja az őszi fenofázisokat (Chen et al. 2020). Leuzinger és mtsai (2005) azt találták, hogy a szárazság korábbra tolhatja a lombszíneződést és –hullást, míg a nedves talajnedvesség későbbre tolhatja. Xie és mtsai (2018) az Egyesült Államokban végzett kísérleteik során ezzel szemben azt találták, hogy a vegetációs időszakban tapasztalható meleg és szárazság későbbre tolja a lombszíneződést, míg a heves esőzésekkel párhuzamosan tapasztalt magasabb hőmérséklet okozta stressz korábbra tolja azokat. Több kutatás is azt találta, hogy a megváltozott tavaszi és nyári hőmérséklet hatása ellensúlyozza az őszi hőmérséklet szénescenziára gyakorolt hatását, tehát az őszi fenofázisok a magasabb őszi hőmérséklet ellenére korábbra tolódnak (Liu et al. 2019, Chen et al. 2020). Zani és mtsai (2020) előrejelzése szerint a megnövekedett fotoszintetikus aktivitás hatására a 21. század végéig az őszi szénescencia a várt 2-3 hetes későbbre tolódás helyett 3-6 nappal korábbra fog tolni.

Vander és mtsai (2022a, 2022b) a kísérletben is szereplő *Cotinus coggygria* és *Prunus spinosa* vizsgálatokkor azt találták, hogy magasabb hőmérséklet hatására a vizsgált fajok tavaszi fenofázisai korábbra, míg őszi fenofázisai későbbre tolódtak.

Az őszi fenofázisokban bekövetkezett **változások komoly hatással lehetnek** az egyedek reprodukív kapacitására, az inváziós fajok terjedésére, megkönnyíthetik a patogének terjedését, átalakíthatják a táplálékláncot, összességében tehát a fajok közti kapcsolatot és az életközösség produktivitását (Gallinat et al. 2015). Az inváziós fajok előnyt kovácsolhatnak a vegetációs időszakuk őszi meghosszabbodásából (Fridley 2012).

A legértékesebb eredmények a hosszú távú kutatásokból származnak, melyek legnagyobb részét a **fenológiai megfigyelő hálózatok** szolgáltatták (Menzel & Fabian 1999, Menzel 2000, Chmielewski & Rötzer 2001, Menzel et al. 2006, Chmielewski et al. 2013, Zohner & Renner 2018, Piao et al. 2019, Tian et al. 2021). A kutatások azt találták, hogy a magasabb hőmérséklet hatására a tavaszi fenofázisok előbbre, az őszi későbbre tolódtak, így a vegetációs időszak mindkét irányba kitolódott (Menzel & 1999, Menzel 2000, Chmielewski & Rötzer 2001, Menzel et al. 2006, Richardson et al. 2006).

A **PEP725** adatai alapján a kilombosodás 1982 és 2011 között **Európában** évtizedenként 4,2 nappal korábbra tolódott (Fu et al. 2014), míg az őszi szénescencia évtizedenként 0,1 nappal későbbre tolódott (Pio et al. 2011). Az IPG hálózat adatai szerint 1959 és 1996 között Európában a tavaszi fenofázisok – levelek megjelenése és virágzás („*leaf out*”, „*flowering*”) – évtizedenként 2,1 nappal korábbra tolódtak, míg az őszi szénescencia évtizedenként 1,6 nappal későbbre tolódott (Menzel 2000). Az **IPG** hálózat 1960-as és 1990-es évek között gyűjtött, kb.

30 éves adatsora alapján megállapították, hogy a tavaszi fenofázisok – többek közt a kilombosodás („*leaf-out*”) – összesen 6-6,3 nappal korábbra, míg az őszi – többek közt a lombszíneződés – összesen 4,5-4,8 nappal későbbre tolódtak, így a vegetációs időszak hossza a vizsgált időszakban 10,8 nappal kitolódott (Menzel & Fabian 1999, Menzel 2000). Az IPG hálózat 1969 és 1998 között négy fászfajról gyűjtött adatai szerint a vegetációs időszak hosszának fenológiai érzékenysége 5 nap/1°C. A megfigyelési időszakban a vegetációs időszak kezdete 8 nappal, tehát évtizedenként kb. 2,7 nappal tolódott korábbra. Ez leginkább a márciusi, illetve februártól ápriliséig mért hőmérséklettel korrelált. A mérések alapján Európában a vegetációs időszak kezdetének fenológiai érzékenysége 6,7 nap/°C, tehát az átlaghőmérséklet 1 °C emelkedésének hatására 6,7 nappal tolódott korábbra. A vegetációs időszak kezdete a február–áprilisi hőmérséklet változására mutatkozott a legérzékenyebbnek. Az időszakban bekövetkezett 1 °C hőmérséklet-emelkedés hatására 7 nappal tolódott korábbra (Chmielewski & Rötzer 2001). A **COST Action 725** program 1971 és 2000 között Európában gyűjtött adatai alapján a tavaszi fenofázisok fenológiai érzékenysége 4,6 nap/°C, míg az őszi lombszíneződésé 2,4 nap/°C volt. Tehát a tavaszi fenofázisok 1 °C-os hőmérséklet-emelkedés hatására 4,6 nappal korábbra, míg az őszi lombszíneződés 2,4 nappal későbbre tolódott (Menzel et al. 2006). Az adatok feldolgozása során kiderült, hogy a fenológiai változásokat leginkább a hőmérséklet idézte elő, az adott fenológiai esemény a bekövetkeztének hónapjában, valamint az azt megelőző két hónapban mért átlaghőmérséklettel korrelált a legnagyobb mértékben (Menzel et al. 2006). A vizsgált fenológiai esemény a tavaszi időszakban a bekövetkezése előtti hónapban mért hőmérséklet-emelkedésre adott fenológiai érzékenysége tavasszal 2,5 nap/°C, míg ősszel 1 nap/°C volt. Tehát 1°C tavaszi hőmérséklet-emelkedés hatására a tavaszi fenofázisok 2,5 nappal korábbra, míg az őszi 1 nappal későbbre tolódtak (Menzel et al. 2006).

Európa-hoz képest **Észak-Amerikában** a fászfajok tavaszi fenofázisainak lassabb, a XX. század második felében (1965-2001) évtizedenkénti 0,5 napos előretolódását figyelték meg (Wolfe et al. 2005).

Egy tölgyfajokat vizsgáló **melegítési kísérlet** kimutatta, hogy a rügyfakadást és a növekedés kezdetét a magasabb hőmérséklet ugyan előbbre tolta, ez a reakció azonban nem volt lineáris. A rügyfakadás időpontját elsősorban a hőmérséklet befolyásolta, a **csapadék** mennyiségének hatása elhanyagolható volt. Ugyanebben a kísérletben a lombszíneződés időpontjában eltérés mutatkozott az évek között, azonban erre sem a hőmérséklet, sem a csapadék nem volt kimutatható hatással (Morin et al. 2010). Ellentétben ezzel, Schieber és mtsai (2009) közép-európai bükkösökben a május és augusztus között hullott csapadék mennyisége, és a lombszíneződés ideje között erős korrelációt mutattak ki.

A leghosszabb **hazai** adatsorunk az **akácról** (*Robinia pseudoacacia* L.) áll rendelkezésre. A történelmi Magyarország különböző területein 1851-től jegyezték fel a faj virágzásának kezdetét, mely a közel 150 éves időtartam alatt jelentős előretolódást mutatott. Budapest környékén pl. május 31-ről május 15-re tolódott kb. 1,7 °C változás mellett, mely jelentős, 11,3 nap/1°C fenológiai érzékenységnek felel meg (Walkovszky 1998). Szabó és mtsai. (2016) megállapították, hogy az akác virágzását leginkább befolyásoló tényező az április–májusi átlaghőmérséklet, valamint a március–májusi átlaghőmérséklet.

Viszonylag kevesen vizsgálták a **fenofázisok egymásra hatását** (lásd 2.3 fejezet). Fászfajok esetében, egy kutatás során négy faj kilombosodásának („*leaf-out*”) és virágzásának időbeli és térbeli mintázatának elemzésekor kiderült, hogy bár mindkét tavaszi fenológiai esemény korábbra tolódott a hőmérséklet emelkedésével, az előretolódás nem volt egyenlő mértékű (Buonaiuto & Wolkovich 2021). Az első esemény jobban reagált erősebben a felmelegedés éghajlatra, függetlenül attól, hogy virágzás vagy lombosodás történt-e először. Következésképpen 1950-2013 között a lombosodás és a virágzás közti időszak évtizedenként



0,6-1,3 nappal meghosszabbodott (Forrest & Miller-Rushing 2010). Több kutatás igazolta, hogy az őszi fenofázisok bekövetkeztének ideje pozitív korrelációt mutat a tavaszi fenofázisok idejével, tehát, ha egy adott faj esetében a tavaszi fenofázisok korábban következnek, az őszi is korábbra tolódnak (Fu et al. 2014, Keenan & Richardson 2015). Fontos tényező a fajok téli nyugalmi időszakában szükséges alacsony hőmérséklet, melynek elmaradása megzavarja a tavaszi fenofázisokat is. Polgar és Primack (2011) megállapították, hogy bár a felmelegedés hatására a fajok tavaszi fenofázisai egyelőre egyre előbbre tolódnak, azonban a dormancia megtöréséhez („*breaking dormancy*”) szükséges alacsony téli hőmérsékletet („*chilling requirement*”) kritikus szint fölé emelkedése későbbre tolhatja a kilombosodást. Bár a tavaszi kilombosodást („*leaf-out*”) a téli hőmérséklet, a tavaszi hőmérséklet és a fotoperiódus változásai együttesen befolyásolják, így mégis már vannak területek, ahol érzékelhető a kilombosodás későbbre tolódása (Yu et al. 2010).

A **lágyszárú fajok** fenológiájának kutatása jóval alulmarad a fásszárúak körében végzett kutatásokhoz képest (Horbach et al. 2023). Ezen kívül, míg a fásszárúak önálló életformaként képezik a kutatások tárgyát, a lágyszárúakról lényegesen kevesebb a kifejezetten életformákat célzó kutatás (pl. Eppich et al. 2009, Montserrat-Martí et al. 2011). A legtöbb kutatás különböző életformákhoz tartozó lágyszárúakat vizsgált, nem különösebben figyelembe véve a vizsgált fajok életforma-szerinti hovatartozását (pl. Fitter & Fitter 2002, Hepper 2003, de Frenne et al. 2011, Horbach et al. 2023). A lágyszárú fajok esetében a virágzás mint fenológiai esemény jól kutatott terület, azon belül is a virágzás kezdetének idejére fókuszált a legtöbb kutatás (Fitter & Fitter 2002, Eppich et al. 2009, deFrenne et al. 2010, Craine et al. 2012, Segrestin et al. 2020, Renner et al. 2021). Egy müncheni botanikus kertben végzett hosszú távú fenológiai megfigyelés eredményei szerint az ott található lágyszárú fajok tavaszi hőmérsékletre adott fenológiai érzékenysége 2,6-4,6 nap/1°C (Renner et al. 2021). A lágyszárúak viszonylag kevés információ áll rendelkezésünkre a levelek megjelenéséről („*leaf-out*”) és későbbi fenofázisokról, mint pl. termésérés és szenescencia (Sherry et al. 2007, Gallinat et al. 2015, Bucher & Römermann, 2021, Bandoc et al. 2022). A lágyszárúak szenescenciája egyes fajok esetén már május közepén megkezdődik, a legtöbb faj a szenescencia maximumát augusztus közepén éri el. Ezzel szemben vannak örökzöld lágyszárú fajok is (pl. a kísérletben is szereplő *Vinca minor*), mely még október közepén sem mutatja a szenescencia jeleit (Horbach et al. 2023). Horbach és mtsai (2023) kimutatták, hogy a lágyszárú fajok fenológiájában tapasztalható szórás jóval nagyobb mint a fásszárúakénál tapasztalható szórás. Ez igaz volt minden egyes fenofázisra külön-külön. Ez arra enged következtetni, hogy a lágyszárú fajok nagyobb időbeli niche-t foglalnak el, hogy elkerüljék a versenyt (Horbach et al. 2023). A kutatás érdekes eredménye, hogy erős kapcsolatot találtak a funkcionális növényi jellegek („*functional trait*”) és a növények fenológiája között.

A lágyszárúakon belül a legtöbb, kifejezetten életformákat célzó kutatás a **geofitonokról** áll a rendelkezésünkre (Tarasjev 1997, Kunkel et al. 2004, Turisova et al. 2007, Eppich et al. 2009, Thomson 2010, Khodorova & Boitel-Conti 2013, Snopková & Hýrošová 2017, Crişan et al. 2018, Puchałka et al. 2022). A geofiták növekedését és virágzását leginkább befolyásoló tényező a hőmérséklet (Khodorova & Boitel-Conti 2013). A korai geofiták esetében a fagyos napok száma és a hóolvadás időpontja szintén fontos befolyásoló tényező (Eppich et al. 2009, Snopková & Hýrošová 2017, Bandoc et al. 2022). Eppich és mtsai (2009) az ELTE Fűvészkertben kb. negyven éven át gyűjtött, a bimbózás, virágzás és hervadás kezdetének időpontjait tartalmazó adatsor feldolgozásakor azt találta, hogy a nevezett fenofázisokra az átlagos napi hőingás, a hőösszeg és a fagyos napok száma volt a legerősebb hatással. A geofiták sokszor lassan terjedő, a lombhullató erdők akjnövényzetéhez tartozó fajok, melyek nem képesek az élőhelyük gyors megváltozására, gyors elvándorlásra. Így a klímaváltozáshoz való alkalmazkodó-képességük rövid- és hosszú távú fennmaradásuk záloga (deFrenne et al. 2010).

Ezért különösen fontos a geofitonok klímaváltozásra adott válaszainak kutatása. A geofitonok fenológiájának Kárpát-medencei változásai kevésbé kutatott terület (Eppich et al. 2009, Szabó et al. 2016, Verbényiné Neumann & Czóbel 2021, Verbényiné Neumann et al. 2023).

A magasabb hőmérséklet (évi átlaghőmérséklet, és/vagy tél végi, tavaszi hőmérséklet) korábbra tolja a geofitonok növekedését és virágzását (Turisova et al. 2007, Eppich et al. 2009, Snopková & Hýrošová 2017, Verbényiné Neumann & Czóbel 2021, Puchalka et al. 2022, Verbényiné Neumann et al. 2023). Snopková és Hýrošová (2017) a kísérletben is szereplő hóvirággal (*Galanthus nivalis* L.) kapcsolatban azt találták, hogy Besztercebánya környékén a márciusi átlaghőmérséklet 1 °C-os emelkedése a faj virágzását 5 nappal korábbra tolja. Ugyanebben a kutatásban azt fedezték fel, hogy a hóvirág virágzásának idejét leginkább a február–márciusi átlaghőmérséklet, valamint a hóborításos napok száma befolyásolja a legerősebben. Turisova és mtsai (2007) Szlovákiában végzett kutatásukban azt találták, hogy a kísérletben is szereplő gyöngyvirág (*Convallaria majalis* L.) virágzása az 1986 és 2006 közötti időszakban 2 nappal korábbra tolódott. Szabó, és mtsai (2016) a gyöngyvirág hazai virágzását is tartalmazó, 1952 és 2000 között rögzített adatsorának vizsgálatakor azt találta, hogy a faj virágzása a vizsgált időszakban egyértelműen korábbra tolódott. A legerősebb befolyásoló tényezőnek a március–áprilisi átlaghőmérséklet bizonyult. A faj virágzása az ország különböző területein eltérő mértékben tolódott korábbra.

Viszonylag kevesen vizsgálták a **chamefitonok** fenológiáját (Montserrat-Martí et al. 2011). A rendelkezésre álló eredmények az arid zónában keletkeztek (Ghazanfar 1997, Montserrat-Martí et al. 2011, Sakkir et al. 2015), így – főleg a virágzás ideje és az esős időszak kapcsolatáról szóló – eredményeik nem értelmezhetőek meg egy mérséklet égövi életközösségre nézve. Montserrat-Martí és mtsai (2011) kutatásukban nem foglalkoztak a fenológia és klímaváltozás kapcsolatával.

Bár a **Terofitonokat** célzó fenológiai kutatás nagyon kevés készült (Ghazanfar 1997, Hegazy et al. 2018), a lúdfű (*Arabidopsis thaliana* L.) számos fenológiai kutatás modellnövényeként szolgált (Mouradov et al. 2002, Pau et al. 2011, Banta et al. 2012, Chew et al. 2012, Méndez-Vigo et al. 2012, Fournier-Level et al. 2022). Fournier-Level és mtsai (2022) a faj szelekcióját, fenotipikus plaszticitását („*phenotypic plasticity*”) és ezek klímaváltozással való kapcsolatát vizsgálták, és arra jutottak, hogy a faj számára előnyösebb a korábbi virágzás. Méndez-Vigo és mtsai (2012) szintén azt találták, hogy a faj virágzása a genetikai szelekció folyamatában van.

A **Hemiterofitonokat** és a **hemikriptofitonokat** mint életformát célzó fenológiai kutatás tudomásom szerint ez idáig nem készült.

## 2.5 A botanikus kertek szerepe

Az arborétumok és botanikus kertek nélkülözhetetlenek a felsőfokú oktatásban, a tudományos kutatásban, valamint a gyakorlati természetvédelemben és a genetikai sokféleség megőrzésében. Hazai botanikus kertjeink leginkább a felsőoktatási intézmények szolgálatára jöttek létre, hiszen elsődleges céljukként az oktatott botanikai tananyagot jelentő növényfajok élő bemutatására adnak lehetőséget (Schmidt et al. 2002).

A világ botanikus kertjeinek különösen nagy szerepe van a klímaváltozással kapcsolatos kutatásokban. A **nagy földrajzi területről** származó növényfajok sokaságát felvonultató és jól dokumentált gyűjteményeiknek köszönhetően különösen alkalmasak olyan kérdések megválaszolására is, melyekre más helyszíneken végzett kutatások keretein belül nem lehetne, vagy sokkal nehezebb lenne választ kapni. Például, hogy hogyan reagálnak a hosszú életű, főleg fásszárú egyedek a klímaváltozásra (Primack et al. 2004, Miller-Rushing & Primack 2008a, Primack & Miller-Rushing 2009). A botanikus kertek már a XX. században is nagyban hozzájárultak a növényfajok klímaváltozásra adott válaszainak megértéséhez, különösen a hőmérséklet rügyfakadás és lombosodás időbeli mintázatára gyakorolt hatása terén (Primack &

Miller-Rushing 2009). A botanikus kertek sokszor **egyedszintű adatokat** gyűjtenek, **rendszeresen**, akár az egyed **teljes élethossza alatt**, mely adatsorok különösen nagy értékkel bírnak a klímaváltozással kapcsolatos kutatások számára (Primack & Miller-Rushing 2009). A botanikus kertekben nagyszámú növényfaj található meg kis területen, **azonos körülmények között**. Ez sok faj fenológiájának szakszerű összehasonlítását teszi lehetővé (Primack & Miller-Rushing 2009). Mindezek a körülmények lehetővé teszik, hogy hosszú távú fenológiai adatgyűjtést végezzenek a kertekben. Ezen kívül több kert már a XIX. század óta **végez fenológiai adatgyűjtést**, ami a később gyűjtött adatokat még értékesebbé teszi, hiszen az adott területről rendelkezésre állnak olyan adatsorok, melyekkel a későbből származó adatok **összehasonlíthatóak** (Harper & Thomson 2004, Harper & Morris 2007, Primack & Miller-Rushing 2009). A botanikus kertek fenológiai kutatásokra való alkalmasságában nagyon fontos tényező az ott **dolgozók szakértelme** és tapasztalata (Primack & Miller-Rushing 2009).

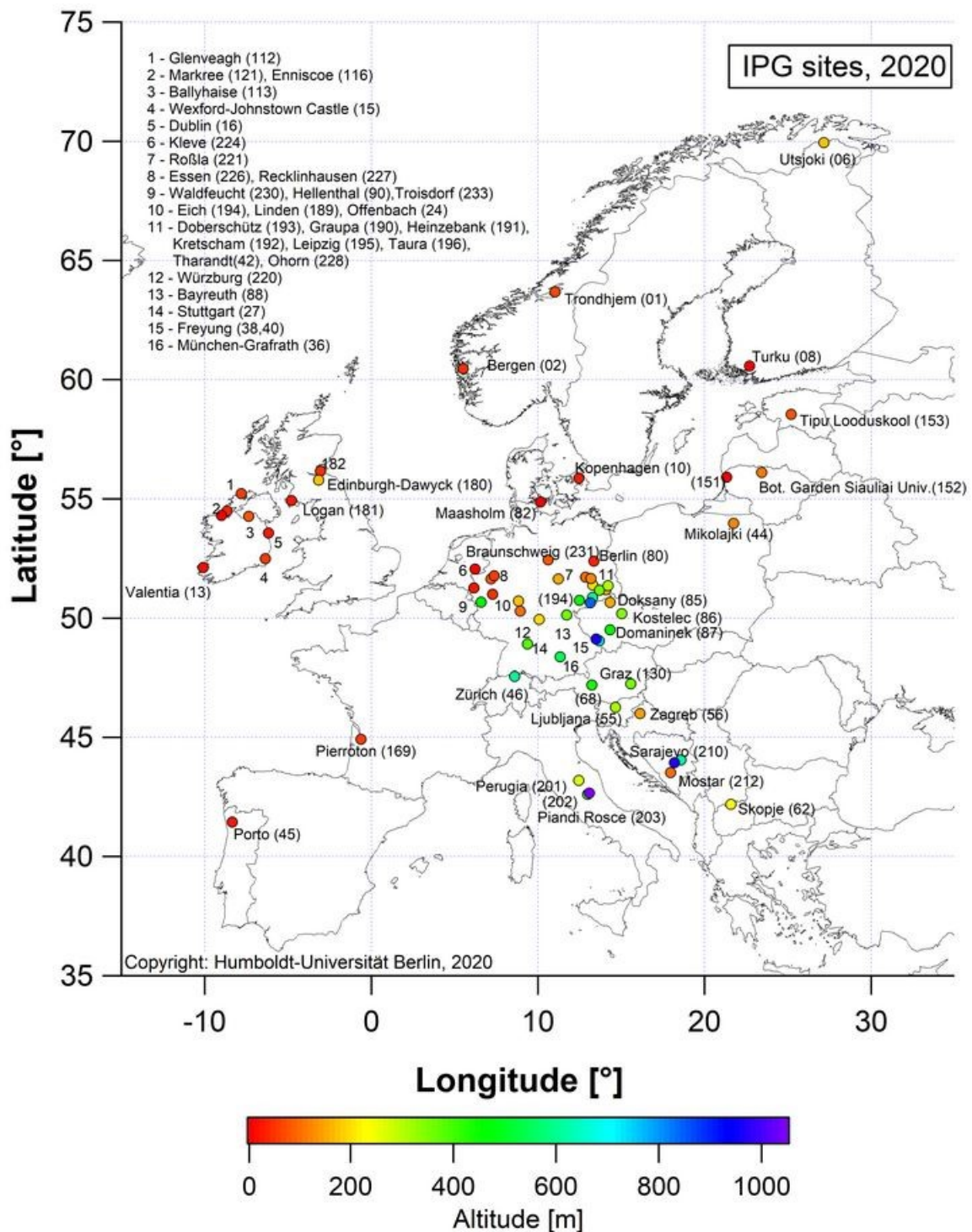
A botanikus kertek sokszor az ott összegyűjtött növények természetes elterjedési határain kívül helyezkednek el, mely értékes lehetőséget nyújt a fajok tűrőképességének, valamint különböző klimatikus tényezőkre adott válaszainak kutatására (Primack & Miller-Rushing 2009).

Sok botanikus kert nagyvárosok területén helyezkedik el, így érintett a **nagyvárosi hőtöbblet** által. Ez a körülmény lehetővé teszi, hogy értékes információkat nyerjünk az alacsonyabb átlaghőmérsékletű vidéki területeken található növények, a hőmérséklet jövőben várható emelkedésére adott válaszaikról. A nagyvárosi környezet azonban nem tekinthető automatikusan a vidéki területek jövőbeli állapotának, hiszen a városokban tapasztalható nagy légszennyezés és egyéb speciális körülmények megkérdőjelezhetik az összehasonlítás érvényességét (Gregg et al. 2003, Wohlfahrt et al. 2019).

A botanikus kertek a korábbi tapasztalatok alapján **új módszereket** dolgoztak ki, melyek fokozták a kutatás ütemét és a tudomány fejlődésére gyakorolt hatását. Ide értendők a filogenetikai és összehasonlító módszerek, valamint a herbáriumi példányok és fényképek online adatbázisai, amelyek lehetővé teszik a vizsgálatok földrajzi, időbeli és taxonómiai kiterjesztését. A botanikus kertek kibővítették közösségi és önkénteseknek szóló tudományos ún. „*citizen science*” („közösségi tudomány”) programjaikat (Primack et al. 2021), mely mozgalom a botanikus kerteken kívül is egyre nagyobb jelentőséggel bír a természetvédelemben és a természetvédelmi kérdésekre irányuló döntéshozatalban (Gray et al. 2016).

A botanikus kertekben folyó klímaváltozással kapcsolatos kutatások az előbbi fő kérdések mentén szerveződnek: Hogyan reagálnak a növények a klímaváltozásra populáció és egyed szinten, rövid és hosszú távon? Mekkora eltérés mutatkozik a különböző növényfajok és populációk klímaváltozásra adott reakciójában? Milyen választ fognak adni a jövőben várható klímaváltozásra? Hogyan védhetjük meg legjobban a klímaváltozás által fenyegetett növényfajokat? Hogyan tudjuk felkelteni a tudományos társadalom és szélesebb társadalmi rétegek érdeklődését az ügy iránt? (Primack et al. 2021).

A botanikus kertekben folyó fenológiai kutatások összehangolása, és hatékonyabbá tétele érdekében a XX. század második felétől főleg Európában, később más földrészekén is botanikus kerteket összekapcsoló, nagy kiterjedésű fenológiai **megfigyelő hálózatok** jöttek létre (Hunkár et al. 2012, Chmielewski et al. 2013, Menzel 2013, Primack et al. 2021). A hálózatok egységes módszertan alapján, ideális esetben hosszú távú, a nagyobb földrajzi kiterjedésből adódóan több szempontból összehasonlítható adatbázist hoztak létre, tartanak karban, bővítenek és bocsátanak a kutatók rendelkezésére. A továbbiakban a három legfontosabb, európai központú hálózatot ismertetem.



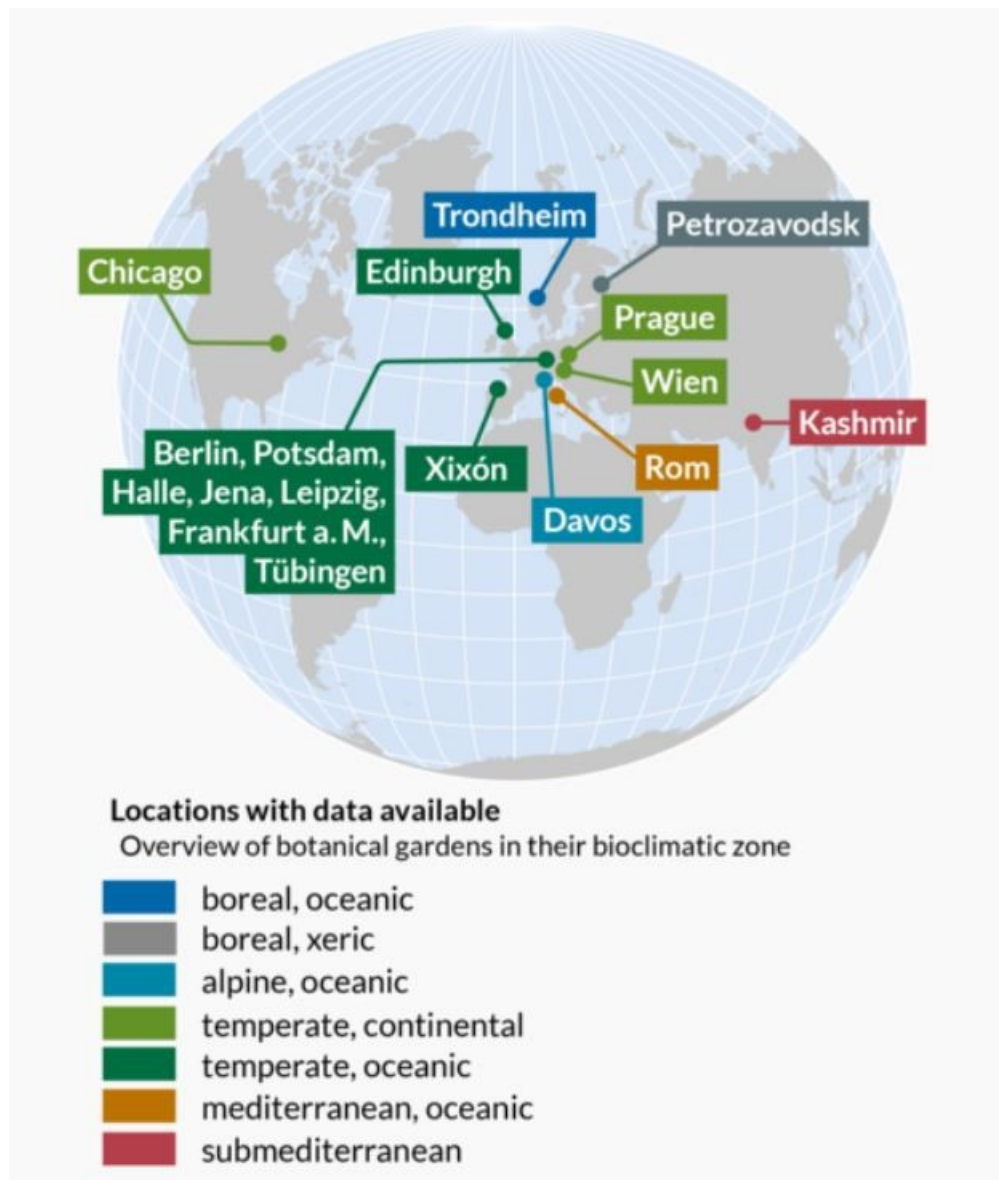
1. ábra: A Nemzetközi Fenológiai Kertek hálózatának tagkertjei 2020-ban. (Forrás: [http14](http://14))

Az **International Phenological Gardens (Nemzetközi Fenológiai Kertek)** hálózat egy egyedülálló, Európában működő fenológiai megfigyelő hálózat, melyet Fritz Schnelle (Deutscher Wetterdienst) és Erik Volkert (Forstliche Fakultät, Universität Göttingen) alapítottak 1957-ben, az akkori Nyugat-Németországban (Schnelle & Volkert 1974, Chmielewski 1996, Menzel 2013, [http15](http://15)). Működése 1959-ben kezdődött meg, Offenbach-ban (a Majna-parti Frankfurt közelében, Németországban), ma 131 kertből áll, melyek 19 ország területét érintik (1. ábra) (Menzel 2013, Renner & Chmielewski 2022).

Az International Phenological Gardens hálózat (IPG) azzal a céllal létesült, hogy hosszú távú adatokat szolgáltatson a klíma és időjárás a növényfajok növekedésére gyakorolt hatásának vizsgálatához. A kutatáshoz fajonként egy anyanövénytől származó, vegetatívan szaporított növényanyagot használtak (Menzel 2013). Az alapötlet az volt, hogy a kutatók rendelkezésére álljon egy összehasonlítható fenológiai adatsor, mely állandóan egy adott helyen lévő, klonálisan azonos növényegyedek azonos protokoll szerinti megfigyeléséből származik (Menzel 2013).

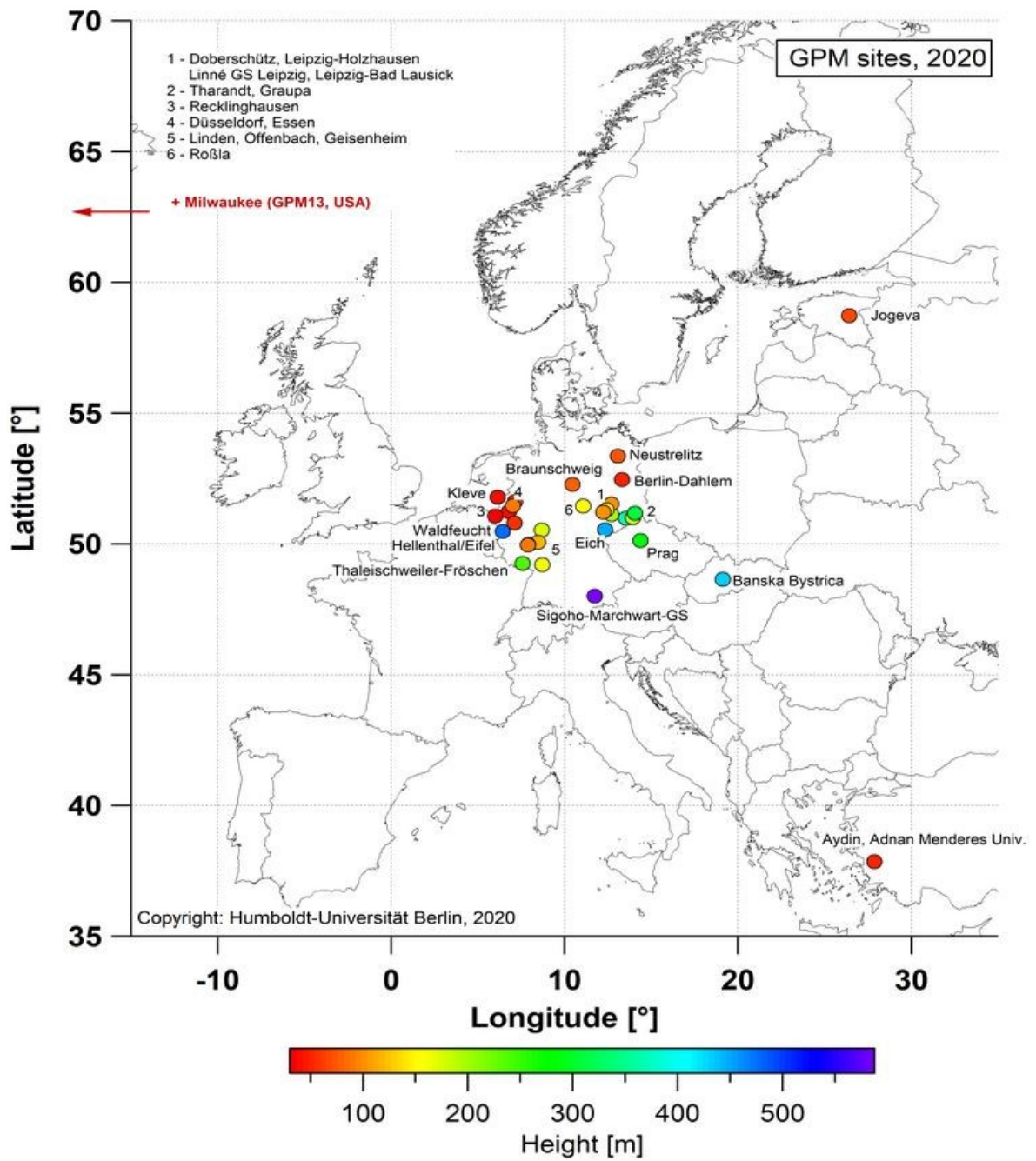
A hálózatot jelenleg a berlini Humboldt Egyetem koordinálja (http15, Chmielewski et al. 2013). A hálózat botanikus kertekből áll, a csatlakozás önkéntes alapon történik (Chmielewski 1996). A megfigyelések azonos szempontok alapján történnek, a megfigyelések alanyaiként 23 különböző, Európában őshonos fásszárú faj, fajonként klonálisan azonos egyedet használnak, melyeket a hálózathoz való csatlakozáskor a koordinátorok juttatnak el a csatlakozó botanikus kertbe (Chmielewski et al. 2013, Renner & Chmielewski 2022). A vizsgált fenológiai paraméterek a rügyfakadás, virágzás kezdete, termésérés, levélszíneződés, levélhullás, melyeket összehasonlítanak a klimatikus paraméterekkel (Menzel 2013).

Később felmerült a meglévő fenológiai hálózatok és adatbázisaik összekapcsolásának ötlete. Így jött létre a **Global Phenological Monitoring (GPM) Programme**, mely a már meglévő adatokat elemzi világszinten (Chmielewski et al. 2013). A hálózat létrehozását eredetileg az ISB (International Society of Biometeorology fenológiai kutatásokért felelős csoportja kezdeményezte, melyet végül 1998/99-ben hoztak létre Németországban, Deuselbach, Blumberg és Tharandt városokban (http20, Chmielewski et al. 2013). A hálózat első eredményeit már 2000-ben publikálták is. A Global Phenological Monitoring Programme (GPM) nemzetközi, kontinenseken átívelő hálózatot, csakúgy mint a IPG hálózatot, jelenleg a berlini Humboldt Egyetem koordinálja, csakúgy mint a (http15, Chmielewski et al. 2013). A hálózat főleg a hőmérséklet fenológiai események idejére gyakorolt hatását vizsgálja. Mivel az arid, szemiárid trópusi területeken, valamint a szubtrópusi övezetben a csapadék a fő meghatározó tényező, ezért a hálózat munkája a mérsékelt égövre korlátozódik (3. ábra). Ez a hálózat gazdaságilag hasznosított fajokra koncentrál, melyek a hálózat kiterjedéséből eredően széles elterjedésűek kell, hogy legyenek, valamint fontos szempont a vegetatív úton való szaporíthatóság. A könnyű megfigyelhetőség érdekében fenofázisaik pedig könnyen felismerhetőek kell, hogy legyenek. Így a megfigyelés tárgyai főleg gyümölcsfák. Létezik egy kiegészítő program, mely díszbokrokat és hóvirág fajokat céloz meg, és ezen fajok virágzás-fenológiáját kíséri figyelemmel. A hálózat elvben interkontinentális, azonban egyetlen USA-beli (Milwaukee) kertet leszámítva, kizárólag Európában képviselteti magát. A legészakibb és legdélibb kertben található cseresznyefák virágzásának kezdeti időpontja között 41 nap különbség mérhető (Chmielewski et al. 2013).



2. ábra: A PhenObs hálózat tagkertjei 2023-ban. (Forrás: [http16](http://16))

2017-ben egy újabb, nemzetközi, botanikus kertekből álló fenológiai megfigyelő hálózat indult útnak. Mivel az IPG fászárúakkal foglalkozik, a GPM pedig gazdaságilag hasznosított fajokra koncentrál, felmerült egy a vadon élő lágyszárúak fenológiájával foglalkozó nemzetközi megfigyelő hálózat létrehozásának szükségessége. A **PhenObs** hálózat működésének első két évében 120, különböző növénycsaládokba tartozó, különböző élőhelyeken előforduló, különböző elterjedési területtel rendelkező lágyszárú faj 14 meghatározott fenofázisának vizsgálatát végezte el a hálózat számára kidolgozott sztenderdizált módszerek alapján. A négy német (Berlin, Halle, Jena, Lipcse) botanikus kert által vezetett hálózat az északi félgömbön működik, tagkertjei megtalálhatóak Európában, Ázsiában és Észak-Amerikában (2. ábra). A kertek elhelyezkedésük alapján a mérsékelt éghajlati övezet legkülönbözőbb éghajlati öveit képviselik (Nordt et al. 2021). Az adatgyűjtés heti szinten történik, az adatokat egy webes felületre töltik fel. (Nordt et al. 2021, [http16](http://16)). Az első két év tapasztalatai alapján véglegesítették az adatgyűjtési protokollt, és kijelölték a vizsgálandó fajok körét, melybe végül 170 fajt vontak be (Nordt et al. 2021). A kutatás során keletkezett teljes adatsor szabadon hozzáférhető. ([http17](http://17)). A program legfrissebb eredményeit Sporbert és mtsai (2022) publikálták.



3. ábra: A Phenological Monitoring (GPM) Programme tagkertjei 2020-ban. (Forrás: http18)

## 3. ANYAG ÉS MÓDSZER

A kísérlet mintájául az *International Phenological Gardens* hálózat (IPG) szolgált. A hálózat azzal a céllal létesült, hogy hosszú távú adatokat szolgáltatson a klíma és időjárás a növényfajok növekedésére gyakorolt hatásának vizsgálatához. A kutatáshoz fajonként egy anyanövénytől származó, vegetatívan szaporított növényanyagot használnak (Menzel 2013). Az alapötlet az volt, hogy a kutatók rendelkezésére álljon egy összehasonlítható fenológiai adatsor, mely állandóan egy adott helyen lévő, klonálisan azonos növényegyedek azonos protokoll szerinti megfigyeléséből származik (Menzel 2013). A hálózat keretein belül végzett megfigyelések a német *Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie* intézet által fenológiai megfigyelések céljából kidolgozott, kódokkal jelölt fenofázis listájának kibővített változata (Koch et al. 2007, Meier et al. 2009) alapján történnek.

### 3.1 Vizsgálati helyszínek

Az összehasonlító kísérlet két helyszínéül a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem Botanikus Kertjét továbbiakban MATE (Gödöllő, 47°35'36.2"N 19°22'06.2"E, 250 m tszf. magasság /Szirmai 2014/), valamint az Eötvös Loránd Tudományegyetem Fűvészkertjét továbbiakban ELTE Fűvészkert, illetve Fűvészkert (Budapest, 47°29'05.6"N 19°05'05.7"E, 114 m tszf. magasság /Orlói 2019/) választottam. Mindkét helyszínen a kísérletben résztvevő 34 növényfaj, helyszínenkénti öt-öt ismétlését lehetőség azonos kitettségi parcellákban helyeztem el.

A MATE Botanikus Kert az Észak-Magyarországi-középhegység nagytáj, Cserhát-vidék középtájának Gödöllői-dombság kistájában (6.3.51) helyezkedik el. A terület mérsékelten meleg-száraz, az évi középhőmérséklet 9,7-10 °C, az évi átlagos napfénytartam 1950 óra, nyáron 780-790, télen 190 óra napsütés várható. Az évi átlagos csapadék 540-580 mm (Dövényi et al. 2008). A kísérleti helyszín általunk mért évi középhőmérséklete (2020., 2021. és 2022. átlaga) 11,35 °C volt.

A MATE Botanikus Kertje több mint 60 éves múltra tekint vissza, 4 hektáros területe természetvédelmi oltalom alatt áll, Gödöllő város helyi jelentőségű természetvédelmi területe (http19). A kísérleti parcellát a 1,5 hektáros, hűvös kontinentális gyertyánelegyes mezei juharostölgyes erdőfolt mellett, a homokpusztagyep szélén helyeztük el.

Az ELTE Fűvészkert a Nagyalföld nagytáj, Duna menti síkság középtáj, Pesti-hordalékkúp-síkság kistájában (1.1.12.) helyezkedik el, mely mérsékelten meleg, száraz éghajlatú terület. Az évi középhőmérséklet 10,2-10,6 °C. Az évi átlagos napfénytartam 1910-1940 óra, nyáron 770-780, télen 180 óra napsütés várható. Az évi átlagos csapadék 520-550 mm (Dövényi et al. 2008). A kísérleti helyszín általunk mért évi középhőmérséklete (2020., 2021. és 2022. átlaga) 13,16 °C volt.

A 250 éve (1771-ben) alapított, ma 2,7 ha területű Fűvészkert országos jelentőségű védett természeti terület. (Papp 2021) A kísérleti parcellát a hazai védett növény gyűjtemény, a Szamóca Kertészet és Tömő utca felőli kerítés között helyeztem el.

### 3.2 Kísérleti növények

Az említett két helyszínen kialakított kísérleti parcellákba a Raunkiær-féle életforma osztályozás (Raunkiær 1934, Turcsányi 1998, Király 2009) hat életformájának – (mikro)fanerofiton, chamefiton, hemikriptofiton, geofiton, hemiterofiton, terofiton —, életformánkénti öt fajának (1.



táblázat), helyszínenkénti öt-öt megfigyelési egysége került elhelyezésre. A megfigyelési egységek azonos méretű cserepek voltak, melyek az adott faj minimum egy egyedét tartalmazták. A kísérleti növények kiválasztásánál törekedtem a fajonkénti lehető legnagyobb genetikai azonosságra. A fásszárúak fajonként klonálisan azonosak, a magról vetett fajok magjait egy növényről gyűjtöttem be, a további években az ezekből származó egyedek magjait használtam, a többi életformánál pedig a példányok fajonként egy helyről kerültek a kísérletbe, szaporításuk kertészetben, vegetatív úton történt. A szaporítás módszeréből adódóan a kertészetben szaporított növényegedek genetikai azonossága is biztosított volt.

1. táblázat: A kísérletben résztvevő növényfajok életforma szerinti csoportosításban

<b>Fanerofitonok</b>	<b>Chamefitonok</b>	<b>Hemikriptofitonok</b>
<i>Cornus sanguinea</i> L.	<i>Dianthus plumarius</i> L.	<i>Euphorbia epithymoides</i> L.
<i>Prunus spinosa</i> L.	<i>Sedum album</i> L.	<i>Ajuga reptans</i> L.
<i>Ligustrum vulgare</i> L.	<i>Vinca minor</i> L.	<i>Inula ensifolia</i> L.
<i>Cerasus fruticosa</i> Pall.	<i>Thymus vulgaris</i> L.	<i>Sedum acre</i> L.
<i>Cotinus coggygria</i> Scop.	<i>Cerastium tomentosum</i> L.	<i>Briza media</i> L.
<i>Amygdalus nana</i> L.	<i>Globularia cordiflora</i> L.	
<i>Rosa spinosissima</i> L.		
<b>Geofitonok</b>	<b>Hemiterofitonok</b>	<b>Terofitonok</b>
<i>Iris pumila</i> L.	<i>Daucus carota</i> ** L.	<i>Hibiscus trionum</i> L.
<i>Polygonatum multiflorum</i> L.	<i>Dipsacus pilosus</i> ** L.	<i>Solanum nigrum</i> L.
<i>Convallaria majalis</i> L.	<i>Dipsacus laciniatus</i> ** L.	<i>Silene alba</i> Mill.
<i>Galanthus nivalis</i> * L.	<i>Capsella bursa-pastoris</i> L.	<i>Portulaca oleracea</i> L.
<i>Eranthis hyemalis</i> * L.	<i>Malva sylvestris</i> ** L.	<i>Consolida regalis</i> Gray
		<i>Papaver rhoeas</i> L.

\* az első év várható virágzási időszaka után kerültek a kísérletbe, így a virágzásuk csak 2021. évtől került feljegyzésre

\*\* életformájukból adódóan az első évben virágzás nem történt, Krumbieger (2008)

A vizsgált növényfajok nevezéktana, valamint életforma besorolása az Új Magyar Fűvészkönyvet (Király 2009) követi a disszertációban.

### Fanerofitonok

A kísérletbe hét, a Kárpát-medencében őshonos, lombhullató faj (*Cornus sanguinea*, *Cotinus coggygria*, *Cerasus fruticosa*, *Prunus spinosa*, *Ligustrum vulgare*, *Amygdalus nana*, *Rosa spinosissima*) klonálisan azonos egyedei kerültek. A kísérletbe fajonként, helyszínenként öt-öt – tehát összesen 10 – egyed került, azonban a klonálisan azonos egyedek beszerzéséből adódó

korlátozott lehetőségek miatt a *Cotinus coggygia* egyedszáma Gödöllőn három, a budapesti helyszínen négy volt, valamint Gödöllőn négy egyed képviselte a *Cornus sanguinea* és a *Cerasus fruticosa* fajt. Az összes többi sorozat teljes létszámú volt.

A *Cornus sanguinea*, a *Cotinus coggygia*, a *Cerasus fruticosa*, a *Prunus spinosa* és a *Ligustrum vulgare* egyedei a MATE Soroksári Botanikus Kertjéből Magyar Lajos tanár úr közreműködésével 2019. november 20. napján kerültek a kísérletbe. A *Rosa spinosissima* és az *Amygdalus nana* egyedei a Budai Arborétumból dr. Diószegi Magdolna segítségével 2020. február 12. napján kerültek a kísérletbe.

A kísérlet felszámolása 2022. december 12. napján a gödöllői helyszínen található fásszárúak elszállításával kezdődött meg, így a *Ligustrum vulgare* gödöllői egyedei teljes lombhullásának ideje nem ismert. A budapesti Fűvészkertben található kísérleti fásszárúak elszállítása 2022. december 27. napján történt meg, mely időpontig minden egyed elérte a teljes lombhullás állapotát.

### Geofitonok

Az *Iris pumila*, *Polygonatum multiflorum* és a *Convallaria majalis* egyedei 2019. december 4. napján a Beretvás Kertészet jóvoltából kerültek a kísérletbe. A *Galanthus nivalis* egyedei 2020. április 30. napján a Fűvészkert egy korábbi kísérletéből kerültem a kísérlet két helyszínére. Az *Eranthis hyemalis* egyedei 2020. december 17. napján az Etter Kft. adományaként kerültek a kísérletbe. Így az utóbbi két faj esetén virágzási adatok csak 2021. és 2022. évekre állnak rendelkezésre.

### Chamefitonok

A *Dianthus plumarius*, a *Vinca minor*, a *Thymus vulgaris*, a *Cerastium tomentosum*, a *Globularia cordifolia* és a *Sedum album* egyedei 2019. december 4. napján a Beretvás Kertészet adományaként kerültek a kísérletbe.

### Hemikriptofitonok

Az *Euphorbia epithymoides*, az *Inula ensifolia*, az *Ajuga reptans*, a *Sedum acre* és a *Briza media* egyedei 2019. december 4. napján a Beretvás Kertészet adományaként kerültek a kísérletbe. A *Sedum acre* egyedei mindkét helyszínen mindkét évben a virágzás utáni egy hónapon belül elpusztultak, pótlásuk 2020 és 2021 őszén a Beretvás Kertészet adományából valósult meg.

### Hemiterofitonok

A *Daucus carota*, a *Dipsacus pilosus*, a *Dipsacus laciniatus*, a *Malva sylvestris* és a *Capsella bursa-pastoris* szaporítóanyagát 2019. október 25. napján a Gödöllői Botanikus Kertben magfogással szereztük be, a vetésre 2020. február 17. napján került sor. A következő vegetációs időszakok szaporítóanyagát a kísérleti egyedekről fogott mag képezte. A 2021. és a 2022. év példányainak vetése 2020 és 2021 novemberében történt. A *Daucus carota* vetése az első két évben sikertelen volt, a harmadik évben nem vetettem el. A *Malva sylvestris* egyedei 2021-re a Fűvészkertben elpusztultak, virágzási adatok ebben az évben csak Gödöllőről állnak rendelkezésre, valamint az újabb vetés eredményeként 2022. évből mindkét helyszínről. A *Dipsacus pilosus* első vetése szintén sikertelen volt, a 2020 őszén történt második vetésből származó egyedekről a 2022. évben mindkét helyszínről rendelkezésre állnak a reprodukciós fenológia adatai. A *Dipsacus laciniatus* vetése mindkét évben sikeres volt, így reprodukciós fenológiai adatok 2021. és 2022. évekből is a rendelkezésünkre állnak. Mivel az első vetésből származó egyedek a második év végén sem pusztultak el, a 2022. évből a 2019 és a 2020 őszén vetett egyedek is szolgáltatottak reprodukciós fenológiai adatokat. A megkülönböztethetőség érdekében a egyedek egyedi azonosítójába bekerült a vetés utáni első évük száma is (pl.: Dips. lac. 2020 G1, Dips lac. 2021 F3). A *Capsella bursa-pastoris* mindkét helyszínen egyéves

növényként viselkedett, a virágzás után mindkét helyszínen mindhárom évben az összes egyed elpusztult, azonban a vetés mindhárom évben mindkét helyszínen sikeres volt.

### Terofitonok

A *Solanum nigrum*, a *Silene alba*, a *Hibiscus trionum*, a *Consolida regalis*, a *Papaver rhoeas* és a *Porulaca oleracea* szaporítóanyag a Hemiterofitonokéhoz hasonlóan a 2019 október 25-ei gödöllői magfogásból származott, majd a következő években a kísérleti egyedek magjai képezték a szaporítóanyagot. A vetések a Hemiterofitonokéval egy időben történtek, tehát mindkét helyszínen 2020 februárjában, 2020 novemberében és 2021 novemberében. A 2020. évben a *Consolida regalis* fűvészkerti vetése, a 2021. évben a *Hibiscus trionum* gödöllői, valamint a 2022. évben a *Hibiscus trionum* fűvészkerti vetése sikertelen, volt, ezen kívül minden faj, mindhárom évben szolgáltatott reprodukciós fenológiai adatokat.

**A kísérletbe vont fajok összesítő jellemzését a 1. melléklet tartalmazza** (Király 2009, Horváth et al. 1995, Tuba et al. 2007).

### **3.3 Kísérleti növények fenntartása**

A kísérleti növények 2019 decembere és 2020 márciusa között azonos méretű műanyag cserepekbe, azonos talajkeverékbe kerültek, a növényeket cserepenként egyedi azonosítóval láttam el, majd a cserepeket elhelyeztem a kísérleti parcellákban. Az egyedi azonosítás lágyszárúak esetén műanyag kertészeti jelölővel, a fásszárúak esetén faiskolai címkével történt, melyre alkoholos filccel és ceruzával írtuk fel az egyedi azonosítót, mely a növény faj nevéből, a helyszín kódjából (G - Gödöllő, F –Fűvészkert), valamint a cserép fajon és helyszínen belüli sorszámából (1-2-3-4-5) állt, pl. 'Galanthus nivalis G2', 'Papaver rhoeas F5', stb.

A cserepek a lágyszárúak esetében 14 cm átmérőjű, egyszerű, kertészeti műanyag cserepek, a fásszárúak esetében 27 cm átmérőjű egyszerű, kertészeti műanyag cserepek voltak.

A cserepekben elhelyezett kísérleti növények túlélése csak kiegészítő öntözés mellett volt biztosítható. Ez május és szeptember között napi egy öntözést jelentett mindkét helyszínen, míg márciusban heti egy, áprilisban és októberben heti két öntözést jelentett. November és február között öntözés nem történt.

A vegetációs időszakban a parcellában rendszeres mechanikai gyomirtást végeztem, a fásszárúak cserepeit a fagy beállta előtt a botanikus kertből származó avarral vettem körbe, hogy a gyökereket megvédjem az esetleges fagykártól. Az egy- és két éves növényeket a vegetációs időszakot megelőző őszen vettem, és vékony, észtországi Hawitt tőzegréteggel fedtem be.

A magfogás a kísérleti helyszíneken a vegetációs időszakban, magéréskor folyamatosan történt, a magok helyszínenként felcímkézve száraz papírtasakban, szobahőmérsékletű helyen várták az őszi vetést.

### Talajvizsgálat

A talajkeverékből 2020 decemberében 5 db egyenként 1 kg-os mintát vettem, melyet az Eurofins MINERÁG Kft. szekszárdi laboratóriumában vizsgáltattam meg. A teljeskörű talajvizsgálatra 2021. 01. 04. és 2021. 01. 25. között került sor. A talajvizsgálat eredményét a 2. melléklet tartalmazza.

A vizsgálat alapján elmondható, hogy a kísérletben használt talajkeverék nem szennyezett, jó tápanyagellátottságú, 3% feletti humusztartalmú, homokos vályog (AK 34) talaj, mely a növények számára összességében megfelelő.

### 3.4 Fenológiai adatgyűjtés

A fenológiai adatgyűjtésre heti rendszerességgel került sor, mindkét helyszínen lehetőség szerint azonos napon. Miller-Rushing és mtsai (2008), Cornelius és mtsai (2011), valamint Panchen és mtsai (2014) is a heti rendszerességű adatgyűjtést ajánlják munkáikban. A heti szintű adatfelvételre kísérlet ideje alatt a gyakorlatban legtöbbször pénteki napon került sor, melyet csak akkor változtattam más napra, ha halaszthatatlan ügy miatt nem tudtam pénteken elvégezni.

A kísérlet mintájául a fentebb említett hálózat szolgált, így a kutatás során igyekeztem minél jobban követni az ott használt protokollt. Az általam vizsgált fenofázisok leírása Meier (2001) munkája alapján a következő:

**Rügyfakadás:** A rügyek felrepedtek, a levelek zöld hegye éppen látszik. Fanerofitonoknál rögzítettem.

**Bimbózás kezdete:** Legalább egy fel nem nyílt bimbó látható a növényen. Az összes vizsgált életforma esetén rögzítettem.

**Virágzás kezdete:** Már legalább egy teljesen kinyílt virág látható a növényen. Virágzat esetében a virágzat virágainak legalább fele teljesen kinyílt. Az összes vizsgált életforma esetén rögzítettem.

**Virágzás vége:** Már legalább egy teljesen kinyílt virág/virágzat látható a növényen. Az összes vizsgált életforma esetén rögzítettem.

**Termésképzés:** Az első éretlen termés megjelent a növényen. Az összes vizsgált életforma esetén rögzítettem.

**Lombszíneződés kezdete:** A levelekelszíneződésének első látható jelei megjelentek a növények. Fanerofiták, valamint a hemikriptofiton *Euphorbia epithymoides* esetében rögzítettem.

**Lombhullás vége:** A növényen eredetileg található összes levél lehullott. Fanerofiták, valamint a hemikriptofiton *Euphorbia epithymoides* és a terofiton *Portulaca oleracea* esetében rögzítettem.

**Szenescencia:** A növény elszíneződik, a levelek lehullanak és/vagy elszáradnak, végül a teljes növény elpusztul (terofitonok, hemiterofitonok) vagy az egyed visszahúzódik (geofitonok). A terofitonok, a hemiterofitonok, a geofitonok (kivéve *Iris pumila* esetében), valamint a hemikriptofiton *Inula ensifolia* esetében rögzítettem. Az adatgyűjtés a cserepekben lévő egyedek állapotának %-os becslésével történt.

**Kikelt egyedek megjelenése:** A magról vetett fajok, tehát a terofitonok és hemiterofitonok esetében feljegyeztem a kikelt példányok megjelenését, a cserepekben lévő szikleveles egyedek számát. Ezeket az adatokat végül nem használtam fel.

**Kifejlett levelek megjelenése:** A terofitonok és hemiterofitonok esetében a kikelt egyedekhez hasonlóan a kifejlett levelek megjelenését, és a kifejlett levelekkel rendelkező egyedek darabszámát is feljegyeztem. Végül ezek az adatok sem kerültek felhasználásra.

A fent leírt fenofázisok megállapítása a **gyakorlatban** a következőképpen történt. A rügyfakadás megtörténének megállapítása egyszerű volt, hiszen, szemmel jól látható, amikor a rügyek eléri a leírt állapotot. Elméletben, ha egyetlen rügy elérte volna a fázist, az adott egyednél feljegyeztem a rügyfakadás kezdetét, azonban a valóságban az összes rügynél közel egyszerre következett be, így a rügyfakadás kezdetének feljegyzésekor minimum a rügyek fele elérte a leírt állapotot. A bimbózás és a virágzás fenofázisainak (bimbózás kezdete, virágzás kezdetet és virágzás vége) mérése a gyakorlatban azt jelentette, hogy minden héten minden egyedden megszámláltam a jelen lévő bimbókat és virágokat/virágzatokat. A termések esetében is a termések számlálása történt, nem jegyeztem fel az érési fázisokat, mivel azt túl bizonytalanak

ítéltem meg. A lombszíneződés és lombhullás mértékét a nemzetközi protokolloknál részletesebben jegyeztem fel. A protokollok csak a lombszíneződés kezdetét, 50%-os mértékét, a lombhullás kezdetét, 50%-os mértékét és a teljes lombhullást rögzítik (Meier et al. 1997, Meier 2001, Koch et al. 2007, Meier et al. 2009). Számos kutatás még ennél is egyszerűbb módszerrel dolgozik, Bruns és mtsai (2003) módszerét követve, csak a lombszíneződés és a lombhullás 50%-os bekövetkeztét veszik figyelembe. Ezzel szemben kísérletemben minden héten megbecsültem mindkét jelenség százalékos értékét. Megszámoltam, hogy hány tenyérnyi kiterjedésű a lombzat, majd ebből hány tenyérnyi a már színes lomb. A lombhullás kezdete után a lombszíneződés százalékos becslést értéke, a még a növényen maradt levelekre értendő. Így több esetben is előfordult, hogy egy egyed 50%-os lombszíneződését követően a következő héten már csak 30%-ot mutatott, hiszen a színes levelek egy része lehullott, a további színeződés pedig nem következett be a következő mérési időpontig. A lombhullás százalékos arányát ugyanilyen módszerrel becsültem. Bár a módszer messze nem tökéletes, nagy tévedési lehetőséget rejt magában, azonban az eredményekhez is felhasznált fenofázisok – a lombszíneződés kezdete, és a lombhullás vége, tehát a teljes lombhullás állapota – szemmel nagyon könnyen megállapíthatóak, tévedési lehetőség gyakorlatilag nincs.

### **Magasság:**

- A fanerofiták esetében a kísérletbe kerülésük után, 2020 márciusában, valamint ezt követően a vegetációs időszakok végén, 2020. október 9-én, 2021. szeptember 25-én, és 2022. október 7-én magasságmérés történt. Az egyedek magasságát úgy mértem le, hogy mérőszalagot feszítettem ki a (legmagasabb) törzs töve és a belőle fejlődő növény leghosszabb gallyának csúcsa közé. Így egy a talajra merőleges, függőleges tengelyen mértem meg az adott növény magasságát.
- A geofitonok esetében a *Galanthus nivalis*, a *Polygonatum multiflorum* és a *Convallaria majalis* egyedeinek magasságát minden héten lemértem. Az első mérés azt követően történt, hogy a leveleik hegye legalább egy mm-re a föld felszíne fölé emelkedett. Mérőszalaggal a tövétől a legfelső levelek hegyéig mértem.
- A hemikriptofitonok esetében az *Inula ensifolia*, az *Euphyorbia epithymoides* és a *Briza media* egyedeinek magasságát heti rendszerességgel lemértem. A módszer a geofitonoknál alkalmazottal megegyező volt.
- A hemiterofitonok esetében a *Malva sylvestris*-t kivéve minden faj magasságát heti rendszerességgel lemértem. A módszer a geofitonoknál alkalmazottal megegyező volt.

### **Törzsátmérő:**

- A fanerofiták esetében a kísérletbe kerülésük után, 2020 márciusában, valamint ezt követően a vegetációs időszakok végén, 2020. december 17-én, 2021. október 7-én, és 2022. október 14-én magasságmérés történt. Mivel a kísérleti fásszárúakat méretüknél fogva nem volt lehetséges a hazai erdészeti gyakorlatban alkalmazott módon, 1,3 méter magasságban lemérni, más irányadó módszer nem lévén (Sütöriné dr. Diószegi Magdolna *ex verb*), a törzsátmérő méréseket 10 cm magasságban, tolómérővel végeztem. Erre a több törzsszel is rendelkező egyedeknél a legvastagabbat választottam ki. Mivel a cserjék törzsátmérő mérése nem bevett gyakorlat (Sütöriné dr. Diószegi Magdolna *ex verb*), ezen méréseim adatai kiegészítő, tájékoztató jellegűek.

### **Levélfajlás:**

- A fanerofitonok esetében 2021. és 2022. évben minden egyes egyeden egy szigetelőszalaggal megjelölt ágon, meghatározott sorszámú nóduszokon található, összesen egyedenként öt-öt levél fejlődését heti rendszerességgel rögzítettük a rügyfakadástól a levélfajlás befejeződéséig. Megmértük a kijelölt levelek hosszát (a levélnyéllel együtt), valamint a legnagyobb szélességét. Amelyik héten az előzőhöz

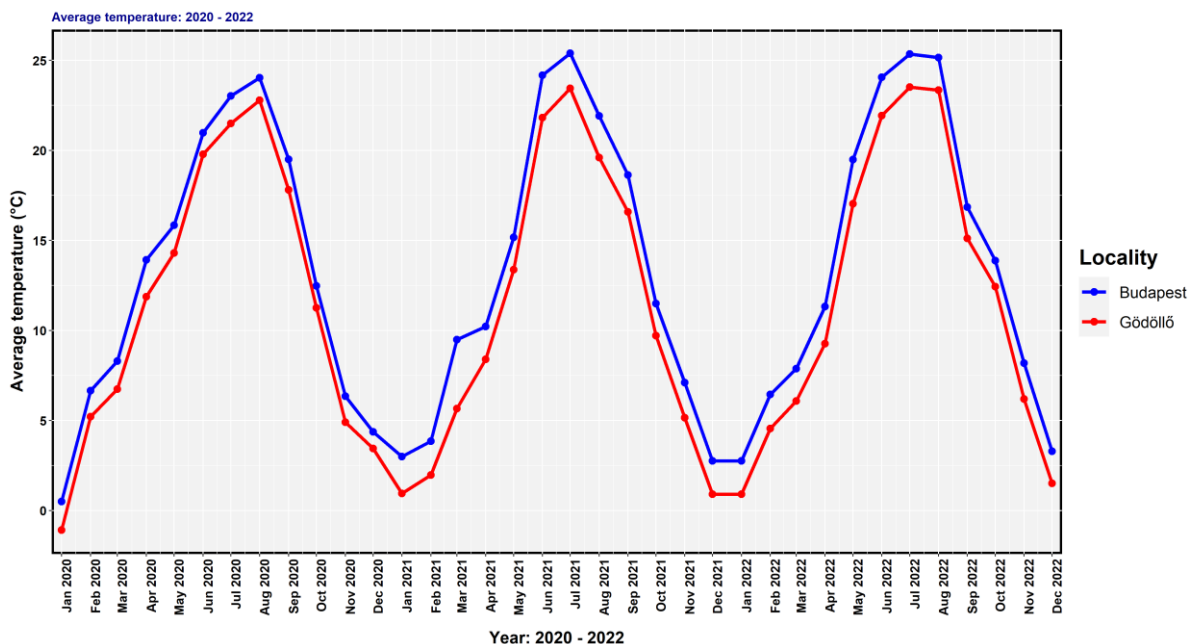
képest nem, vagy csak elhanyagolható növekedés volt tapasztalható, befejeztük a levélfejlődés mérését.

### 3.5 Meteorológiai adatok

2020 novemberében mindkét kísérleti helyszínre meteorológiai állomást telepítettünk. Az állomásokat az AgroSense Kft. telepítette, beszerzésük az NKFIH-1159-6/2019 azonosítószámú és a „Felsőoktatási Intézményi Kiválósági Program” elnevezésű projekt keretén belül történt meg. A két helyszínen elhelyezett állomások teljesen egyformák, és az alábbi műszerekkel vannak felszerelve: Sensirion SHT21, relatív páratartalom, hőmérséklet mérő szenzor, mely relatív páratartalom és hőmérséklet mérésére szolgál, TE connectivity company, MS5607-02BA03, légnyomásmérő szenzor, Apogee SP-110 pyranométer, mely a napsugárzás mérésére szolgál, Anemometer 6410 szélmérő eszköz és, Davis 6466M csapadékmérő műszer. Az állomások felsorolt műszerei a méréseket 10 percenkénti gyakorisággal végzik, az adatokat vezeték nélküli rendszerrel felhőbe küldik. Az adatok letöltése az AgroSense Kft. honlapjáról a felhasználói fiókomból lehetséges. Az adatok 2020 novembere és 2022 decembere közötti időszakból származnak.

Az ezt megelőző (2020 márciusa és 2020 novembere közötti) időszakból az Országos Meteorológiai Szolgálat 44505-ös számú lágymányosi meteorológiai állomásáról (a fűvészkeri helyszínre vonatkozóan), valamint a 44214-es számú aszódi meteorológiai állomásáról (a gödöllői helyszínre vonatkozóan) származtak. A gödöllői állomás csapadékmérő műszerének meghibásodása miatt a 2022 januárja és 2022 szeptembere közötti időszakból a csapadékadatokat az Országos Meteorológiai Szolgálat 44222-es számú szadai meteorológiai állomása szolgáltatta. Ugyanezen okból kifolyólag a 2022. decemberi csapadék adatokat az Országos Meteorológiai Szolgálat 44505-ös számú lágymányosi meteorológiai állomásáról (a fűvészkeri helyszínre vonatkozóan), valamint a 44214-es számú aszódi meteorológiai állomásáról (a gödöllői helyszínre vonatkozóan) szereztük be.

#### 3.5.2 A meteorológiai állomások adatai



4. ábra: A három vizsgált év havi átlaghőmérséklete a két kísérleti helyszínen

Az évi átlaghőmérsékleteket tekintve, a budapesti helyszínen mért hőmérséklet mindhárom vizsgált évben magasabb volt (2. táblázat). A három év összesített átlaghőmérsékletének helyszínenkénti különbsége 1,81 °C (4. ábra). Ezt az értéket használtuk fel a kísérleti növények (fajok és életformák) fenológiai érzékenységének megállapításakor.

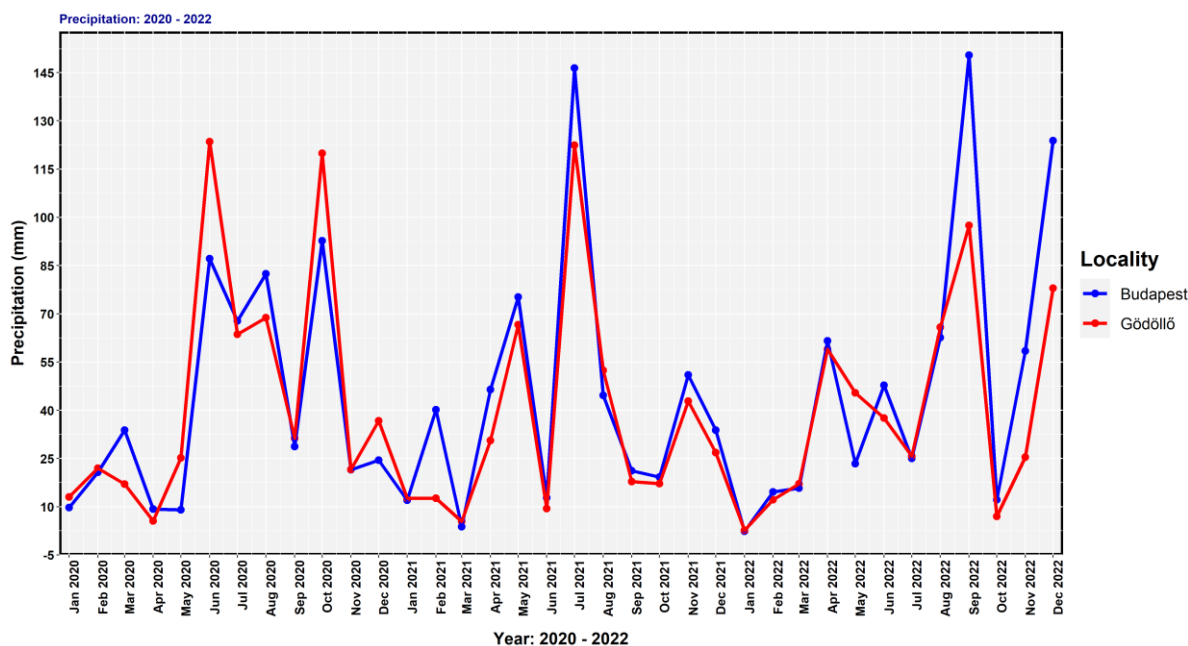
2. táblázat: A két helyszín évi átlaghőmérséklete a három vizsgált évben

<b>A kísérleti helyszínek éves átlaghőmérséklete és az átlaghőmérsékletek helyszínek közti különbsége</b>			
<b>Vizsgálati év</b>	<b>Gödöllő</b>	<b>Budapest</b>	<b>Különbség</b>
2020	11,54 °C	13,00 °C	1,45 °C
2021	10,7 °C	12,77 °C	2,07 °C
2022	11,82 °C	13,72 °C	1,9 °C
<b>Összesített átlag</b>	<b>11,35 °C</b>	<b>13,16 °C</b>	<b>1,81 °C</b>

A meteorológiai állomások által mért egyéb adatokat a 3., 4. és 5. számú mellékletek tartalmazzák. Tekintve, hogy az első vizsgálati év végén a helyszínekre saját meteorológiai állomásokat telepítettem, a második és a harmadik vizsgálati évben az elsónél részletesebb adatok (4. és 5. számú melléklet) állnak rendelkezésre. E két évben mindkét helyszínen rögzítettem a havi átlaghőmérsékleteken és csapadékösszegeken kívül a havi minimum- és maximum-hőmérsékletet, a fagyos napok számát és az első és utolsó fagyos nap időpontját, a trópusi éjszakák számát, az első és az utolsó trópusi éjszaka időpontját, valamint a havi átlagos páratartalmat. Az adatok alapján általánosságban elmondható, hogy a magasabb átlaghőmérsékletű budapesti helyszínen több trópusi éjszakát figyeltem meg, az első előbb, míg az utolsó regisztrált eset későbbre esett mint a gödöllői helyszínen. A fagyos napok számával kapcsolatban elmondható, hogy az alacsonyabb átlaghőmérsékletű gödöllői helyszínen több fordult elő, az első előbb következett be, az utolsót pedig később regisztráltam, mint a magasabb átlaghőmérsékletű budapesti kísérleti helyszínen. Tehát Budapesten hosszabb volt mind a fagymentes, mind a trópusi éjszakákat tartalmazó időszak. Az évi átlagos páratartalom mindkét évben magasabb volt a gödöllői helyszínen, annak ellenére, hogy mind 2021-ben mind 2022-ben kevesebb csapadék hullott ott mint a budapesti helyszínen (4. és 5. számú melléklet, 3. táblázat).

3. táblázat: A két helyszín évi csapadékösszege a három vizsgált évben

<b>A kísérleti helyszínek éves csapadékösszegének és a csapadékösszegek helyszínek közti különbsége</b>			
<b>Vizsgálati év</b>	<b>Gödöllő</b>	<b>Budapest</b>	<b>Különbség</b>
2020	535,2 mm	477,5 mm	-57,7 mm
2021	416,6 mm	506,6 mm	90 mm
2022	473,4 mm	598 mm	124,6 mm
<b>Összesített átlag</b>	<b>475,1 mm</b>	<b>527,4 mm</b>	<b>52,3 mm</b>



5. ábra: A három vizsgált év havi átlaghőmérséklete a két kísérleti

4. táblázat: A két helyszín évi átlagos páratartalma a három vizsgált évben

A kísérleti helyszínek éves átlagos relatív páratartalma és az páratartalom értékek helyszínek közti különbsége			
Viszgalati év	Gödöllő	Budapest	Különbség
2020	nincs adat	nincs adat	nincs adat
2021	73,93%	65,03%	8,90%
2022	70,85%	63,41%	7,44%
<b>Összesített átlag</b>	<b>72,39%</b>	<b>64,22%</b>	<b>8,17%</b>

Páratartalomra vonatkozó adataim a meteorológiai állomások telepítését követő időszakból (2020 decemberétől) állnak rendelkezésre (4. táblázat). Az adatokból látszik, hogy bár mindkét évben magasabb csapadékösszeget mértünk a budapesti helyszínen, az átlagos páratartalom mindkét évben alacsonyabb volt a gödöllői helyszínhez képest. A budapesti helyszínen tapasztalható alacsonyabb pártartalom a városi környezet hatásának tulajdonítható (Fortuniak, Klysik & Wibig 2006).

A következő származtatott meteorológiai adatokat használtam:

- Havi átlaghőmérséklet: A 2020 novemberre előtti időszakra nézve a havi átlaghőmérséklet adatokat az OMSZ lágymányosi és aszódi állomásai biztosították. 2020 novemberre után a két kísérleti helyszínre telepített meteorológiai bázisállomás tízpercenkénti adatszolgáltatásából átlagszámítással számítottam ki.
- Évi átlaghőmérséklet: A havi átlaghőmérséklet adatokból átlagszámítással számítottam ki.
- Trópusi éjszakák száma: Azon naptári napok száma, amelyek során a hőmérséklet adatok egyetlen 20 °C alatti értéket sem tartalmaztak, tehát a minimumhőmérséklet legalább 20 °C volt.



- Első fagyos nap: Az adott év őszén az első olyan naptári nap, amely során a minimumhőmérséklet 0 °C volt vagy az alatti értéket mutatott.
- Utolsó fagyos nap: Az adott év tavaszán (vagy telének végén) az utolsó olyan naptári nap, amely során a minimumhőmérséklet maximum 0 °C volt vagy az alatti értéket mutatott.

### 3.6 Statisztikai elemzés

Az adatok rögzítése, tárolása és alapvető rendezése, előkészítése a Microsoft Excel 365 online verziójával készült, a statisztikai elemzések pedig az R statisztikai környezet 4.2.2 verziójának (R Core Team, 2022) segítségével az Rstudio szkriptszerkesztő programmal (RStudio Team 2015) készültek. Az adatfeldolgozás a következő R csomagok felhasználásával történt: “tidyverse” (Wickham et al. 2019), “dplyr” (Wickham et al. 2023) és “scales” (Wickham et al. 2022). Az ábrák a “ggplot2” nevű csomaggal készültek (Wickham 2016). A DOY (day of the year, év napjainak sorszáma) és a fenológiai esemény bekövetkeztenek helyszínenkénti kapcsolatát egyutas varianciaanalízissel (ANOVA, egyfaktoros varianciaanalízis, “one-way analysis of variance (ANOVA) type I”) állapítottuk meg, I-es típusú (szekvenciális) négyzetösszegek (“type I (sequential) sum of squares”) használatával, 0,05% – os szignifikanciaszint mellett (Zar 1984). A hatás mértékének kiszámítása részleges éta-négyzet ( $\eta^2$ , “partial eta-squared”) segítségével, az “lsr” csomag használatával történt (Navarro 2015). Amennyiben az ANOVA szignifikáns különbséget mutatott ki a vizsgált faktor esetében, az egyes átlagok közti különbséget Tukey-Kramer-féle próbával (“Tukey’s honestly significant difference – HSD test”) hasonlítottuk össze az “agricolae” csomag segítségével (De Mendiburu 2021). A faktorszintű átlagok kiszámítása (95%-os konfidenciaintervallum mellett) különböző kontrasztok elsősorban az ún. “treatment contrasts” csomag segítségével történt (Faraway 2005). Bizonyos esetekben az egyutas ANOVA-t (egyfaktoros varianciaanalízis, *One-way analysis of variance – ANOVA*) az összes fajra és/vagy fenofázisra külön alkalmaztuk, amely során a helyszínt mint faktort vettük figyelembe. Ezeket az eredményeket oszlopdiagramokon ábráztuk, a 0,05-ös szignifikancia szint szerinti szignifikáns különbségeket különböző (a és b) betűkkel jelölve, ahol a legmagasabb átlag mindig az „a” betűt kapja. Egyszerű lineáris regressziót (“simple linear regression analysis”) alkalmaztunk a DOY és a meteorológiai paraméterek közti kapcsolat megállapítására, ahol a csoportosító faktorok a helyszínek voltak (Faraway 2005). Az ismeretlen paraméterek becslése és a görbe illesztése a reziduálisok négyzetösszegének minimalizálásával az ún. legkisebb négyzetek módszer (OLS, “squared residuals (method of ordinary least squares)”) alapján történt. A determinációs együtthatót ( $R^2$ , “coefficient of determination”) alkalmaztunk annak megállapítására, hogy az adott fenológiai eseményt milyen mértékben jelzi előre a vizsgált meteorológiai paraméter. Végül lokális regressziós modellt (“local regression models”) alkalmaztunk, mely a legalkalmasabbnak bizonyult a fent részletezett kapcsolatok ábrázolására. Ebben az esetben lokálisan becsült szórásdiagramos simítást (LOESS, “locally estimated scatterplot smoothing”) végeztünk a regressziós görbe 95%-os konfidencia intervallumú (CI) regressziós egyenes körüli illesztésére. A simítási módszert (“smoothing method”) a legnagyobb csoport mérete alapján választottuk, és a simítási paraméter ( $\alpha$ ) 0,8 volt, ami azt jelenti, hogy a LOESS-görbe az összes adatpont 80%-át tartalmazza (Jacoby 2000). Valamennyi statisztikai elemzés után a kiválasztott modellek jóságát is ellenőriztük 0,05-ös szignifikancia szinten, különböző tesztek (pl. Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Szmirnov, Bartlett-próba stb.) és diagnosztikai ábra (reziduum/szórás-becsült érték ábra, QQ-ábra, Cook-féle D távolság stb.) segítségével (Faraway 2005, Pekár és Brabec 2016).

A különböző fajok és életformák fenológiai érzékenységének megállapításánál – ha külön máshogy nem jeleztük – a két helyszín között a három év során mért hőmérsékletek összesített átlagnak különbségét használtuk (1,81 °C). A két helyszín között a fenofázisok megjelenésének

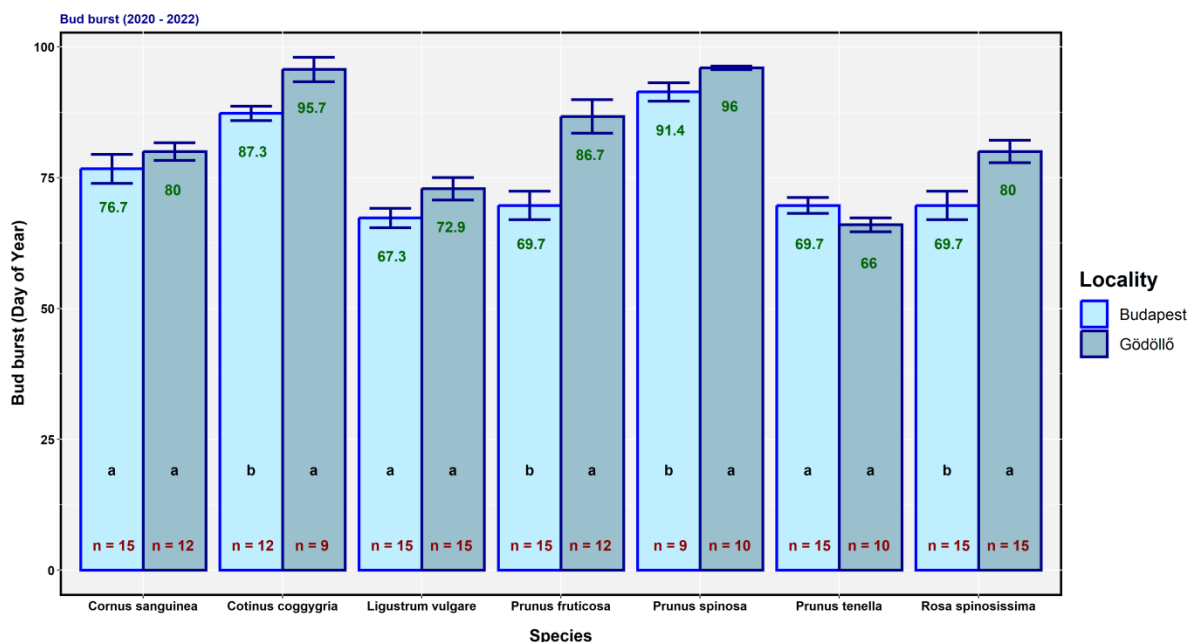
ideje között fajonként vagy életformánként mért különbséget ezzel a hőmérsékleti értékkel elosztva kaptuk meg a vizsgált taxonok 1°C hőmérséklet-változásra adott, napokban kifejezett fenológiai válaszát. A negatív érték esetén ez korábbra tolódást, a pozitív értékek esetén ez későbbre tolódást jelentett.

# 4. EREDMÉNYEK ÉS MEGVITATÁSUK

## 4.1 A vizsgált életformák fenológiai paraméterei

### 4.1.1 Fanerofitonok

A **rügyfakadás** a hét vizsgált fajból hat faj esetében mindhárom vizsgált évben a magasabb átlaghőmérsékletű budapesti helyszínen következett be hamarabb (6. ábra). A különbség négy faj (*Cotinus coggygria*, *Cerasus fruticosa*, *Prunus spinosa*, *Rosa spinosissima*) esetében volt szignifikáns. Az *Amygdalus nana* ellenkező hatást mutatott; rügyfakadása a gödöllői helyszínen az első évben néhány példány esetében előbb következett be, a második évben ez megfordult, majd a harmadik, záró évben azonos időben következett be a két helyszínen. Az összesített különbség nem szignifikáns. A rügyfakadás bekövetkeztének álagos időpontja Budapesten az év napjaiban kifejezve 74,6 volt, míg Gödöllőn 81,6 volt. A különbség pontosan hét nap, mely alapján a három év alatt mért 1,81 °C-os hőmérsékletre vetítve a cserjefajok rügyfakadásának összes álagos fenológiai érzékenysége **-3,87 nap/°C**. Ez hasonló érték az eddig publikált kutatási eredményekkel. Menzel és Fabian (1999) a fásszárúak rügyfakadására és kilombosodására vonatkozóan 6 nap/°C fenológiai érzékenységet állapított meg, Menzel és mtsai (2006) 2,5 nap/°C fenológiai érzékenységet találtak, Rötzer és Chmielewski (2001) 6,7 nap/°C fenológiai érzékenységet tapasztaltak, Zhang és mtsai (2015) a február–március–áprilisi időszak átlaghőmérsékletére vonatkozóan 4 nap/°C fenológiai érzékenységet állapítottak meg, Renner és Zohner (2018) pedig fásszárúak és lágyszárúakra együttesen  $4.3 \pm 0.2$  nap/1°C fenológiai érzékenységet állapítottak meg.



6. ábra: A rügyfakadás bekövetkeztének ideje az év napjaiban kifejezve (2020-2022). A *a* és *b* betű jelzi, hogy az álagos értékek különbsége fajonként helyszínenként 5%-os szignifikancia szint mellett szignifikáns-e. Az *n* betű jelzi a mintavételek számát.

Érdekes jelenség, hogy a rügyfakadás időpontja mindkét helyszínen későbbre tolódott az évek során (7. táblázat). Tehát mindkét helyszínen később következett be 2021-ben a 2020-as adathoz

képest, és 2022-ben 2021-es adathoz képest. Ennek egyik oka lehet a a fajok téli nyugalmi időszakában szükséges alacsony hőmérséklet elmaradása (Polgar & Primack 2011). Polgar és Primack (2011) megállapították, hogy bár a felmelegedés hatására a fajok tavaszi fenofázisai egyelőre egyre előbbre tolódnak, azonban a dormancia megtöréséhez („*breaking dormancy*”) szükséges alacsony téli hőmérsékletet („*chilling requirement*”) kritikus szint fölé emelkedése későbbre tolhatja a kilombosodást. Bár a tavaszi kilombosodást („*leaf-out*”) a téli hőmérséklet, a tavaszi hőmérséklet és a fotoperiódus változásai együttesen befolyásolják, mégis vannak területek, ahol érzékelhető a kilombosodás későbbre tolódása (Yu et al. 2010). Esetünkben ennek hatása nem igazolható (5. táblázat).

5. táblázat: A 2021-es és 2022-es évek tavaszát megelőző telek (2020. december-2021. február és 2021. december-2022. február) átlaghőmérséklete a két vizsgált helyszínen

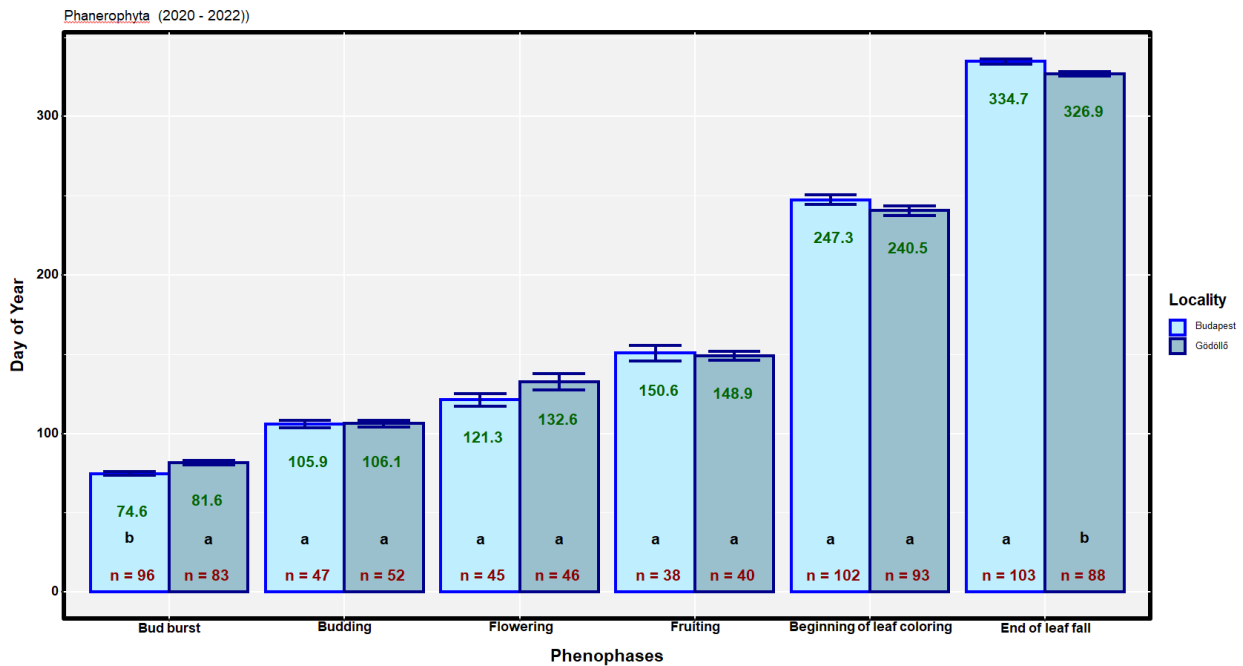
2021 tavaszát megelőző tél hőmérséklete	Gödöllő	Budapest	2022 tavaszát megelőző tél hőmérséklete	Gödöllő	Budapest
2020. december	3.45 °C	4.37 °C	2021. december	0.91 °C	2.75 °C
2021. január	0.95 °C	2.99 °C	2022. január	0.91 °C	2.76 °C
2021. február	1.97 °C	3.85 °C	2022. február	4.55 °C	6.44 °C
<b>Átlag</b>	<b>2.12 °C</b>	<b>3.74 °C</b>	<b>Átlag</b>	<b>2.12 °C</b>	<b>3.98 °C</b>

A két helyszín téli hőmérséklete a rendelkezésre álló adatok (2020., 2021. és 2022. évek havi átlaghőmérsékletei) alapján a vizsgált évek alatt nem, vagy alig változott (5. táblázat), tehát a téli átlaghőmérséklet esetleges változása nem okozhatta a rügyfakadás későbbre tolódását.

A vizsgált cserjefajok **virágzása** a következőképpen alakult. A telepítést követő vegetációs időszakban (2020-ban) a *Cornus sanguinea* egyetlen gödöllői példánya a másodvirágzás időszakában, szeptemberben hozott egyetlen virágot. A többi példány egyik helyszínen sem virágzott ebben az évben. A *Cotinus coggygria* mindkét helyszínen hozott bimbókat, a bimbók azonban besültek, a virágzás állapotáig nem jutott el egyetlen példány sem. A *Ligustrum vulgare* szintén mindkét helyszínen hozott bimbókat, azonban virágok nem voltak megfigyelhetőek egyik példányon sem. A *Cerasus fruticosa* és a *Prunus spinosa* az első évben nem virágzott. Az *Amygdalus nana* már az első évben is mindkét helyszínen virágzott, bár lényegesen alacsonyabb virágszámmal, mint a későbbi években. A *Rosa spinosissima* az első évben, néhány virágot hozott a gödöllői helyszínen.

A 2021-es évben a *Cornus sanguinea* és a *Cotinus coggygria* már mindkét helyszínen virágzott, bár lényegesen alacsonyabb virágszámmal mint a harmadik évben. A *Cerasus fruticosa* a második évben sem virágzott. A *Prunus spinosa* budapesti példányai alacsony virágszámmal, de virágoztak. A *Ligustrum vulgare* szintén mindkét helyszínen, alacsony virágzatszámmal ugyan, de virágzott. Az *Amygdalus nana* mindkét helyszínen nagy virágszámmal virágzott. A *Rosa spinosissima* 2021-ben mindkét helyszínen virágzott.

A harmadik, 2022-es évben a *Cornus sanguinea* mindkét helyszínen virágzott, a gödöllői helyszínen másodvirágzás is megfigyelhető volt augusztus második felétől szeptember első feléig. Ugyanez volt megfigyelhető a *Cotinus coggygria* esetében is, azonban ott a gödöllői példányok másodvirágzása október első hetéig tartott. A *Cerasus fruticosa* a harmadik évben sem virágzott. A *Prunus spinosa* példányai mindkét helyszínen nagy virágszámmal virágoztak. A *Ligustrum vulgare* mindkét helyszínen virágzott. Az *Amygdalus nana* mindkét helyszínen nagy virágszámmal virágzott. A *Rosa spinosissima* szintén mindkét helyszínen virágzott.



7. ábra: A fásszárúak fenofázisai összesítve (2020-2022). A *a* és *b* betű jelzi, hogy az átlagos értékek különbsége fajonként helyszínenként 5%-os szignifikancia szint mellett szignifikáns-e. Az *n* betű jelzi a mintavételek számát.

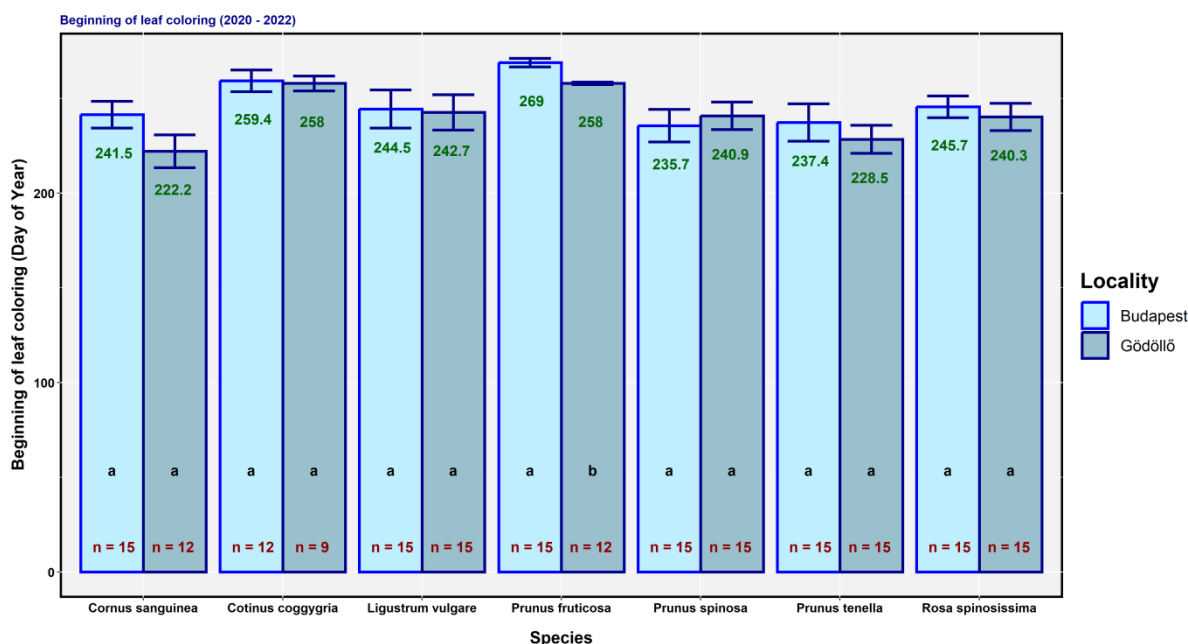
A **bimbók megjelenése** közti különbség szinte elhanyagolható volt a két helyszínen (7. ábra), azonban a **virágzás kezdete** (7. ábra) 11,3 nappal korábban következett be a magasabb átlaghőmérsékletű budapesti helyszínen. Ez alapján a három év alatt mért 1,81 °C-os hőmérsékletre vetítve a cserjefajok virágzás kezdeti időpontjának átlagos fenológiai érzékenysége **-6,24 nap/°C**. Eredményeim összhangban vannak a korábbi kutatások eredményeivel. A vonatkozó szakirodalmak általában együtt kezelik a fásszárúak tavaszi fenofázisait, melyekben benne foglaltatik a bimbók megjelenése és a virágzás kezdete is (pl. Chmielewski & Rötzer 2001, Schieber et al. 2009, Morin et al. 2010, Chitu et al. 2020, Vander et al. 2022a, 2022b). Menzel és mtsai (2006) megállapításai szerint a tavaszi fenofázisok fenológiai érzékenység 4,6 nap/°C. Miller-Rushing és Primack (2008b) a kísérletben is szereplő *Ligustrum vulgre* L. kapcsolatban megállapították, hogy 1 °C hőmérséklet-emelkedés 6 nappal tolta korábbra a faj virágzását. A rendelkezésre álló kb. 150 éves hazai adatsor alapján Walkovszky (1998) szerint a *Robinia pseudoacacia* L. virágzásának fenológiai érzékenysége 11,3 nap/1°C.

A termések megjelenésének időpontja közti helyszínenkénti eltérés (7. ábra) mindössze 1,7 nap, mely alapján a fenológiai érzékenysége **0,94 nap/°C**.

Statisztikailag szignifikáns különbség a két helyszín között a rügyfakadás időpontja, a lombszínűződés kezdete és a lombhullás végének időpontjai esetén volt kimutatható (7. ábra).

A **lombszíneződés kezdete** (8. ábra) a hét vizsgált cserjefajból hat esetében később következett be a magasabb átlaghőmérsékletű budapesti helyszínen. A különbség azonban csak a *Cerasus fruticosa* esetén volt szignifikáns. Ellentétben a többi hat fajjal, a *Prunus spinosa* esetében a lombszíneződés a budapesti helyszínen kezdődött előbb. Az évek között nagy eltérés mutatkozott. Míg 2020-ban az összes vizsgált faj lombszíneződése az alacsonyabb átlaghőmérsékletű gödöllői helyszínen kezdődött előbb, addig ez a trend 2021-re nagyobb részben megfordult, öt faj (*Cotinus coggygria*, *Ligustrum vulgare*, *Prunus spinosa*, *Amygdalus nana* és *Rosa spinosissima*) esetében a budapesti helyszínen következett be előbb. 2022-ben a

*Prunus spinosa* lombszíneződése szintén a budapesti helyszínen kezdődött korábban, azonban a *Cornus sanguinea*, az *Amygdalus nana* és a *Rosa spinosissima* esetében a várakozásoknak megfelelően az alacsonyabb átlaghőmérsékletű gödöllői helyszínen következett be hamarabb, míg a *Cerasus fruticosa*, *Ligustrum vulgare* és a *Cotinus coggygria* esetében a lombszíneződés kezdete a két helyszínen azonos időben következett be. Fontos megjegyezni, hogy a heti rendszerességű adatfelvétel nem tette lehetővé a hét napnál kisebb különbségek megállapítását, tehát ha a felsorolt fajok lombszíneződésének kezdete a két mintavétel között eltérő napokon is történt, a fenológiai esemény bekövetkezte az adatsorban azonosként van feltüntetve.



8. ábra: A lombszíneződés kezdetének ideje fajonként az év napjaiban kifejezve (2020-2022). A *a* és *b* betű jelzi, hogy az átlagos értékek különbsége fajonként helyszínenként 5%-os szignifikancia szint mellett szignifikáns-e. Az *n* betű jelzi a mintavételek számát.

Helyszínenként külön tekintve a következőképpen alakult a lombszíneződés kezdetének időpontja (7. táblázat és 7. ábra). A 2020-as évben a várakozásnak megfelelően a gödöllői helyszínen következett be előbb, majd a 2021-es évre ez megfordult, azonban a 2022-es évre újra visszafordult, és a gödöllői helyszínen előbb következett be. A legkisebb helyszínenkénti különbség a középső, várakozásokkal ellentétes eredményt hozó évben volt megfigyelhető. A helyszínek közti átlagos különbség 6,73 nap volt, mely alapján a lombszíneződés kezdetének fenológiai érzékenysége **3,73 nap/°C**.

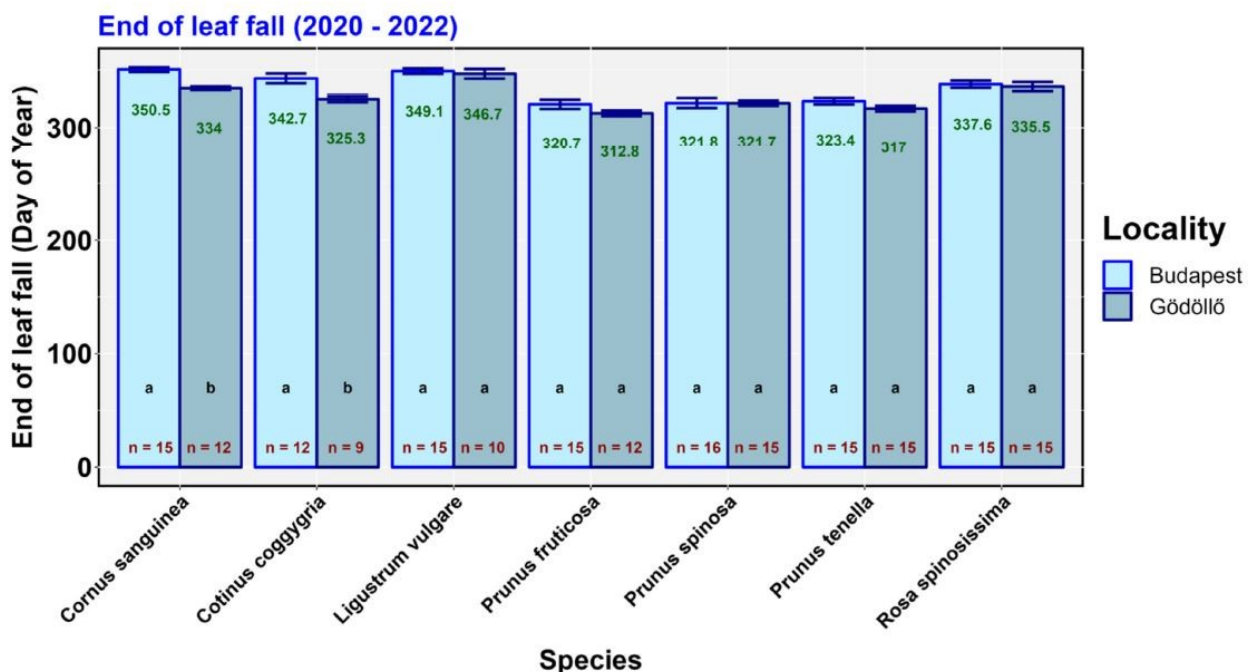
6. táblázat: A lombszíneződés kezdetének helyszínenkénti változása a három vizsgált évben. Az értékek az év napjaiban vannak kifejezve. „Az eltérés különbsége helyszínenként” mező a két helyszínen az előző évhez képesti eltérés különbsége, az eredményt a budapesti adatból a gödöllői adatot kivonva kaptuk.

A lombszíneződés kezdetének helyszínenkénti változása a három vizsgált évben.											
Gödöllő				Budapest				Helyszínek közti különbségek			
2020	2021	2022	Átlag	2020	2021	2022	Átlag	2020	2021	2022	Átlag
259	250.4	212.2	<b>240.54</b>	276.4	241.5	223.8	<b>247.26</b>	17.44 nap	-8.89 nap	11.63 nap	<b>6.72 nap</b>

A lombszíneződés kezdetének a két helyszínrre számolt összesített átlagos időpontjai jelentős eltérést mutatnak az évek között. A két helyszínt együtt tekintve, a lombszíneződés kezdetének időpontja az év napjaiban kifejezve 2020-ban 267.43, 2021-ben 245.49, míg 2022-ben 220.76. Ez az első és második év között 21,94 nap eltolódást, míg a második és harmadik év között 24,73 nap eltolódást jelent. Azonban az extrém száraz 2022-es év nem ugrik ki a sorból.

Érdekesen alakultak a két helyszín eredményei. Gödöllőn az első évhez képest a második évben 8,58 nappal korábban, míg a budapesti helyszínen 34,91 nappal korábban kezdődött a lombszíneződés, ez a különböző mértékű eltolódás okozta a trend helyszínek közti megfordulását. Az extrém száraz 2022-es évben az előző évhez képest mindkét helyszínen a lombszíneződés kezdetének korábbra tolódása volt megfigyelhető. A különbség 2021-hez képest Gödöllőn 38,23 nap, míg Budapesten 17,71 nap volt. A korábbra tolódás mértékének helyszínek közti különbsége mindkét évben meghaladta a 20 napot, az előző évben a budapesti helyszín mutatta a nagyobb előretolódást, a második évben pedig a gödöllői helyszín (6. táblázat).

Ennek egyik oka lehet, hogy míg a tavaszi fenofázisok korábbra tolódása egyértelműen korrelál a hőmérséklet emelkedésével, addig az őszi fenofázisokat több tényező is befolyásolja (Estrella & Menzel 2006, Menzel 2003). Az őszi fenofázisok mozgatórugóinak megértése és előrejelzése összességében sokkal bonyolultabb feladat, és ez idáig sokkal kevésbé is tisztázott, mint a tavaszi fenofázisoké (Sparks & Menzel 2002, Menzel et al. 2006, Vitasse et al. 2011, Chen et al. 2020, Zani et al. 2020).



9. ábra: A lombhullás végének ideje az év napjaiban kifejezve (2020-2022). A *a* és *b* betű jelzi, hogy az átlagos értékek különbsége fajonként helyszínenként 5%-os szignifikancia szint mellett szignifikáns-e. Az *n* betű jelzi a mintavételek számát.

A **lombhullás** mind a hét faj esetén mindhárom évben előbb fejeződött be az alacsonyabb átlaghőmérsékletű gödöllői helyszínen (9. ábra, 7. táblázat). A különbség azonban csak két faj (*Cornus sanguinea*, *Cotinus coggygria*) esetén volt szignifikáns. A rügyfakadás kezdeténél négy faj mutatott szignifikáns eltérést, ebből az egyetlen átfedés a *Cornus sanguinea*. A lombhullás végének időpontja az év napjaiban kifejezve a gödöllői helyszínen átlagosan 326,45 volt, míg a budapesti helyszínen 333,61 volt. A két helyszín közti különbség 7,16 nap, mely alapján a lombhullás végének fenológiai érzékenysége **3,96 nap/°C**.

Az eredményekből láthatjuk, hogy mindkét vizsgált őszi fenofázis későbbre tolódott a magasabb átlaghőmérsékletű helyszínen. Ez illeszkedik a korábbi kutatások eredményéhez, hiszen a legtöbb kutatás kimutatta, hogy a magasabb hőmérséklet hatására az őszi fenofázisok későbbre tolódnak (pl. Menzel & Fabian 1999, Menzel et al. 2006, Schieber et al. 2009, Ibanez et al. 2010, Gill et al. 2015, Zhang et al. 2015, Vander et al. 2022a, 2022b, Xing et al. 2022).

Az őszi fenofázisok fenológiai érzékenysége – lombszíneződés kezdete: 3,73 nap/°C, lombhullás vége: 3,96 nap/°C - összességében a tavaszi fenofázisokéhoz képest – rügyfakadás: -3,87 nap/°C, virágzás kezdetete: -6,24 nap/°C - kisebb mértékűnek bizonyult. Ez szintén összhangban van a korábbi kutatások eredményeivel (Menzel et al. 2006, Piao et al. 2019). Zhang és mtsai (2015) az augusztus–szeptember–októberi időszak átlaghőmérsékletének 1°C-os emelkedésénél az őszi fenofázisok 2,1 nappal való későbbre tolódását figyelték meg.

7. táblázat: A rügyfakadás és a lombhullás végének időpontja évenként helyszínenként. Származtatott adatként szerepel a vegetációs időszak hossza (lombhullás végének idejéből kivonva a rügyfakadás idejét), valamint a vegetációs időszak hosszának különbsége a két helyszín között (a budapesti értékből kivonva a gödöllői értéket)

<b>A fásszárúak fenológiai eseményeinek bekövetkezése a kísérleti helyszíneken</b>						
Helyszín	Gödöllő			Budapest		
Vizsgálati év	2020	2021	2022	2020	2021	2022
Rügyfakadás	73,94	84,52	89,45	68,94	74,26	84,68
Lombszíneződés kezdete	259,00	250,42	212,19	276,44	241,53	223,82
Lombhullás vége	335,23	322,65	321,46	345,71	322,44	332,68
Vegetációs időszak hossza	261,29	238,13	232,01	276,76	248,18	248,00
Különbség a vegetációs időszak hosszában (nap)	2020	2021	2022			
	15,47	10,05	15,99			

A lombhullás végének időpontja Gödöllőn az évek során korábbra tolódott (7. táblázat). A 2021-es adat a 2020-asnál korábbi időpontot mutatott, és ugyanez volt tapasztalható a 2022-es és 2021-es adatok viszonyában. A budapesti helyszínen a lombhullás vége 2021-ben korábban következett be mint 2020-ban, azonban a 2022-es évben újra későbbre tolódott, bár a 2020-as értéket így sem érte el.

Láthattuk, hogy az őszi fenofázisok, bár később következtek be a magasabb átlaghőmérsékletű budapesti helyszínen, az évek alatt összességében mégis mindkét helyszínen jelentős korábbra tolódást mutattak. Számos kutatás tapasztalt az őszi fenofázisok általánosan elfogadott későbbre tolódásával ellentétes hatásokat, folyamatokat. Tanino és mtsai (2010) szerint a rövid fotoperiódus és a magasabb hőmérséklet együttes hatása előbbre tolhatja az őszi fenofázisokat. Szintén lehetséges, hogy míg a magasabb éjszakai hőmérséklet későbbre tolja a lombszíneződés kezdetét, addig a magasabb nappali hőmérséklet a nagyobb arányú párologtatásból kifolyólag korábbra tolja azt (Wu et al. 2018, Chen et al. 2020). Ezt támasztják alá Chen és mtsai (2020) eredményei is, melyek szerint a nyári és őszi szárazság korábbra tolja az őszi fenofázisokat. Leuzinger és mtsai (2005) azt találták, hogy a szárazság korábbra tolhatja a lombszíneződést és lombhullást, míg a nagyobb talajnedvesség későbbre tolhatja. Néhány korábbi (Estiarte & Peñuelas 2015, Liu et al., 2016) és a PhenObs Hálózat adatait feldolgozó kutatás (Sportbert et al.



2022) azt találta, hogy szárazabb körülmények között az őszi szeneszcencia korábbra tolódik. Több kutatásban is azt tapasztalták, hogy a megváltozott tavaszi és nyári hőmérséklet hatása ellensúlyozza az őszi hőmérséklet szeneszcenciára gyakorolt hatását, tehát az őszi fenofázisok a magasabb őszi hőmérséklet ellenére korábbra tolódnak (Liu et al. 2019, Chen et al. 2020). Zani és mtsai (2020) előrejelzése szerint a megnövekedett fotoszintetikus aktivitás hatására a 21. század végéig **az őszi szeneszcencia a várt 2-3 hetes későbbre tolódás helyett 3-6 nappal korábbra fog tolni, mely összhangban van eredményeimmel.**

8. táblázat: az első fagyos nap és a lombhullás ideje az év napjaiban kifejezve

<b>Az első fagyos nap és a lombhullás végének bekövetkezése a kísérleti helyszíneken</b>				
Vizsgálati év	2021		2022	
Kísérleti helyszín	Gödöllő	Budapest	Gödöllő	Budapest
Első fagyos nap	<b>298.00</b>	328.00	292.00	294.00
Lombhullás vége	<b>322.65</b>	321.46	322.44	332.68

A lombhullás vége és az első fagyos nap időpontja között nem mutatkozott összefüggés (8. táblázat) 2021-ben a budapesti helyszínen például a lombhullás teljes befejeződése után következett csak be az első fagyos nap, míg Gödöllőn mindkét évben, és a budapesti helyszínen 2022-ben több mint 20 nap telt el az első fagyos nap és a lombhullás befejeződése között.

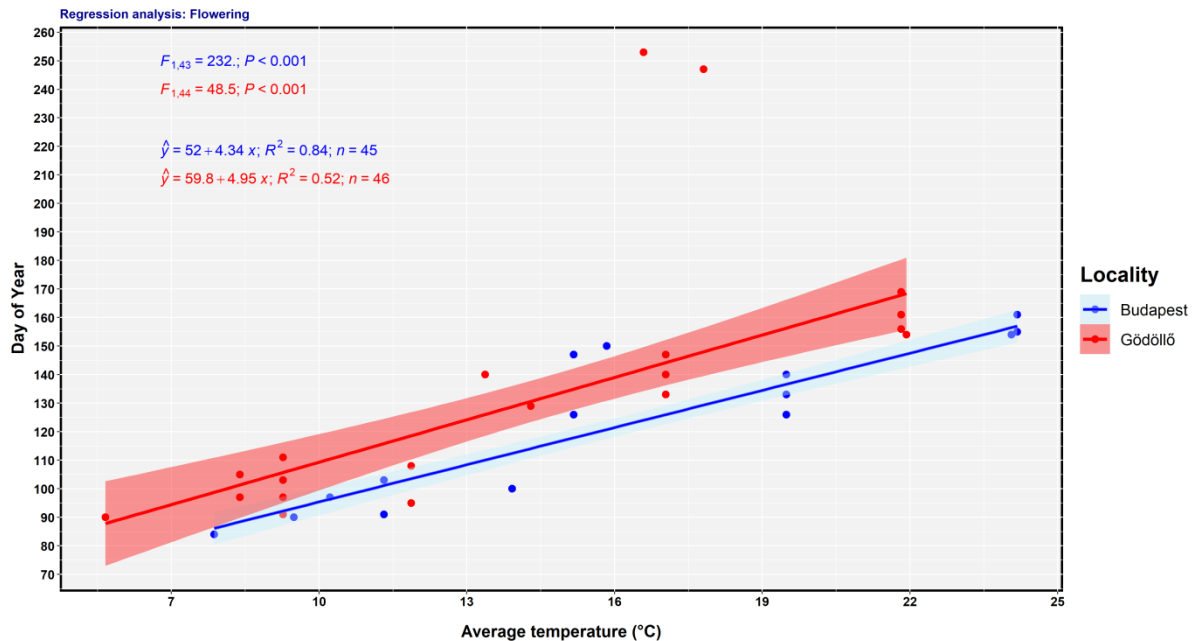
A lombhullás végének időpontjából a rügyfakadás időpontját kivonva kiszámítottuk a **vegetációs időszak hosszát**. A vegetációs időszak átlagos hossza ez alapján Gödöllőn 243,81 nap, míg Budapesten 257,65 nap volt. Tehát a várakozásoknak megfelelően a magasabb átlaghőmérsékletű budapesti helyszínen hosszabb volt. A különbség átlagosan 13,84 napot tett ki, mely alapján a vegetációs időszak hosszának fenológiai érzékenysége **7,65 nap/°C**. Chmielewski és Rötzer (2001) fásszárúak esetében az 1969–1998 közötti időszakra 5 nap/1°C fenológiai érzékenységet mutatott ki. A vegetációs időszak azonban a vizsgált évek alatt mindkét helyszínen rövidült, a lombhullás mindkét helyszínen tapasztalható korábbra tolódása, és a rügyfakadás bekövetkeztének szintén mindkét helyszínen tapasztalható későbbre tolódása miatt. Ezirányú eredményeim ellentétben állnak a korábbi kutatások eredményeivel, melyek szerint a vegetációs időszak az évek, évtizedek során egyre hosszabbodik (Menzel & Fabian 1999, Menzel 2000, Chmielewski & Rötzer 2001, Menzel et al. 2006, Liu et al. 2018, Piao et al. 2019).

Bár a rügyfakadás és a lombhullás végének időpontjában a helyszínek között tapasztalható átlagos különbsége közel egyforma volt – a rügyfakadás átlagosan 7 nappal következett be korábban a budapesti helyszínen, a lombhullás vége pedig átlagosan 7,16 nappal később következett be a magasabb átlaghőmérsékletű budapesti helyszínen – az évek közötti megoszlás ennél változatosabb képet mutatott. A vegetációs időszak hosszában tapasztalható helyszínek közti különbség az első évben nagyobb részben a lombhullás végének időpontjai közti különbségből származik, a második évben a lombhullás vége a két helyszínen szinte egyszerre következett be, így a vegetációs időszak hosszának eltérése a rügyfakadás időpontjának különbségéből adódik, míg a harmadik évben újra a lombhullás végének időpontjaiban volt tapasztalható a nagyobb eltérés.

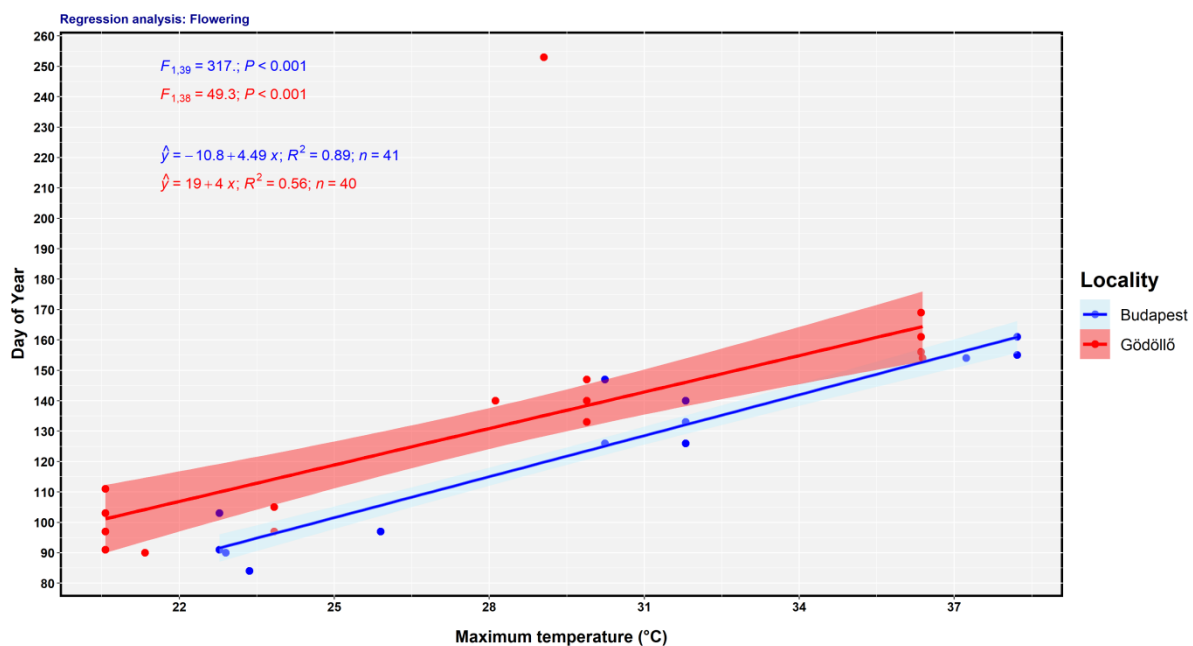
Több kutatás igazolta, hogy az őszi fenofázisok bekövetkeztének ideje pozitív korrelációt mutat a tavaszi fenofázisok idejével, tehát, ha egy adott faj esetében a tavaszi fenofázisok korábban következnek, az őszi is korábbra tolódnak (Fu et al. 2014, Keenan & Richardson 2015).

Esetemben ennek az ellenkezője volt tapasztalható, hiszen a rügyfakadás időpontjai az évek során mindkét helyszínen későbbre, míg az őszi fenofázisok korábbra tolódtak.

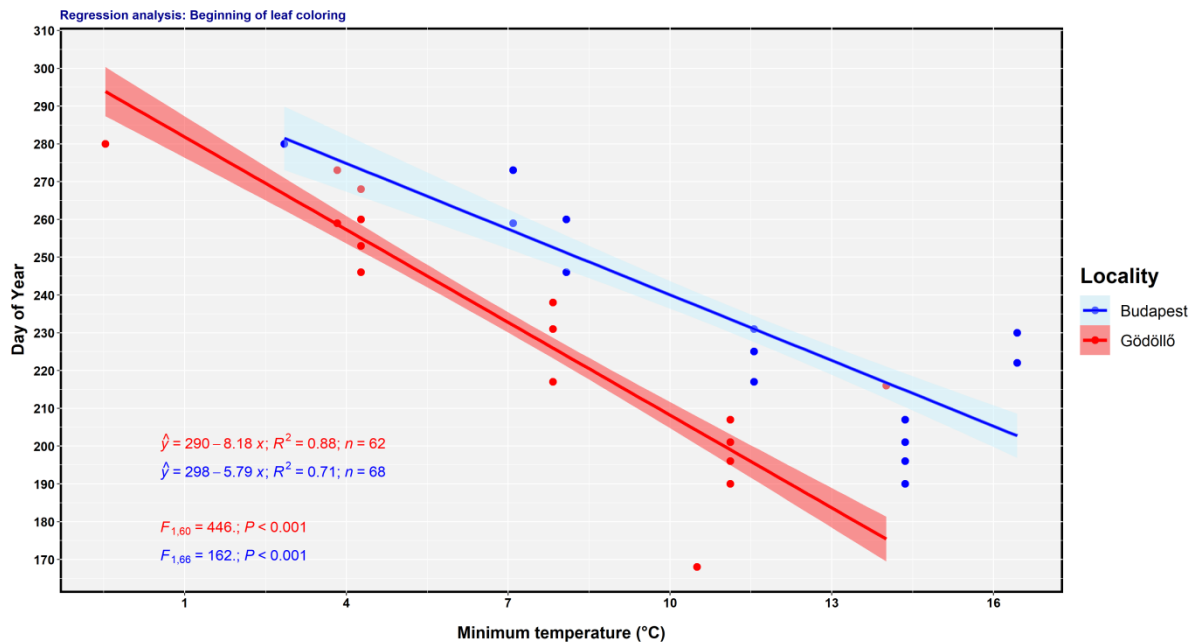
A vizsgált fenofázisok közül (7. ábra) a rügyfakadás, az első bimbó megjelenése, a virágzás kezdete, az első termés megjelenése előbb történt meg a budapesti helyszínen, míg a lombszíneződés kezdete, és a lombhullás vége előbb következett be a gödöllői helyszínen. A hat fenológiai esemény közül az első és az utolsó, tehát a rügyfakadás és a lombhullás végének két helyszín közti eltérése volt szignifikáns (7. ábra).



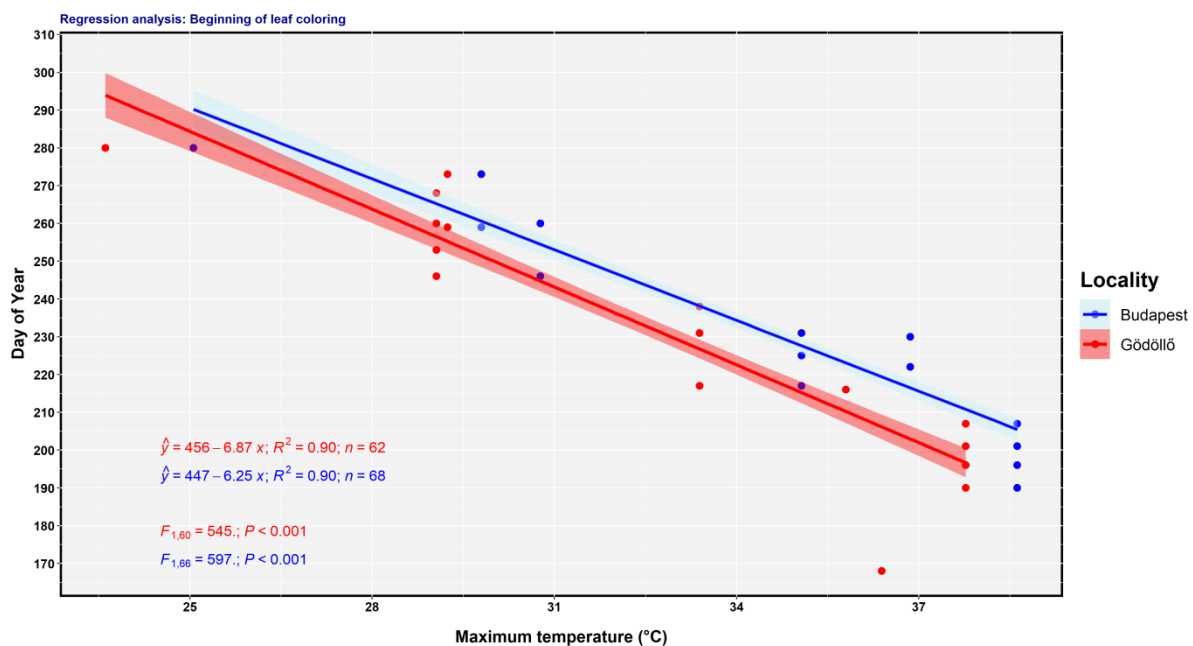
10. ábra: A regresszióanalízis eredményei (2020-2022) A március–júniusi időszak átlaghőmérsékletének (2020-2022) hatása a virágzás kezdetére. Az  $r^2$  a determinációs együttható, az  $n$  a megfigyelések számát jelzi.



11. ábra: A regresszióanalízis eredményei (2020-2022) A március–júniusi időszak maximum-hőmérsékletének (2020-2022) hatása a virágzás kezdetére. Az  $r^2$  a determinációs együttható, az  $n$  a megfigyelések számát jelzi.



12. ábra: A regresszióanalízis eredményei (2020-2022) A július–októberi időszak minimum-hőmérsékletének (2020-2022) hatása a lombszínéződés kezdetére. Az  $r^2$  a determinációs együttható, az  $n$  a megfigyelések számát jelzi.



13. ábra: A regresszióanalízis eredményei (2020-2022) A július–októberi időszak maximum-hőmérsékletének (2020-2022) hatása a lombszínéződés kezdetére. Az  $r^2$  a determinációs együttható, az  $n$  a megfigyelések számát jelzi.

A március-júniusi időszak átlaghőmérséklet (10. ábra), a minimum és a maximum hőmérséklet (11. ábra és 6. melléklet) mindkét helyszínen erős szignifikáns hatást gyakorolt ( $p < 0,001$ ) a virágzás kezdetére. Erős korrelációt találtunk ( $r^2 > 50\%$ ) e fenofázis és a március-júniusi átlaghőmérséklet között (6. melléklet). A lombszínéződés kezdetének időpontját illetően erős kapcsolatot ( $p < 0,001$ ,  $r^2 > 50\%$ ) találtunk a július-októberi átlaghőmérséklet, a trópusi éjszakák száma, valamint a július-októberi minimum és maximum-hőmérséklet és a fenológiai esemény között (12., 13. ábra és 6. melléklet). A termésérés szignifikáns kapcsolatot mutatott a hőmérsékleti változókkal ( $p < 0,001$  vagy  $p < 0,01$ ), azonban az  $r^2$  értékek alacsonyok voltak (6.

melléklet). A lombszíneződés kezdetét illetően erős kapcsolatot találtunk ( $p < 0,001$ ,  $r^2 > 50\%$ ) az átlaghőmérséklet (július-október), a trópusi éjszakák száma (július-október), a minimum és maximum hőmérséklet (július) között. –október) (12., 13. ábra és 6. melléklet) és a fenológiai esemény között. A hatás mindhárom változó esetében mindkét helyszínen erősen szignifikáns ( $p < 0,001$ ) volt. Mind a négy változó késleltette a lombszíneződés kezdetét (6. melléklet). A november-decemberi csapadék kivételével minden mért paraméter (a november-decemberi átlaghőmérséklet, a november-decemberi minimum- és maximum hőmérséklet, valamint az ebben az időszakban mért fagyos napok száma) erős szignifikáns ( $p < 0,001$ ) hatással volt a lombhullás végének időpontjára (6. melléklet). A magasabb hőmérséklet késleltette, míg a fagyos napok száma korábban hozta a lombhullás végét (6. melléklet). A gödöllői helyszínen a november-decemberi minimum-hőmérséklettel ( $r^2 > 50\%$ ), míg a budapesti helyszínen a november-decemberi átlaghőmérséklettel, a minimum- és maximum-hőmérséklettel, valamint a hőmérséklet-emelkedéssel találtuk a legerősebb kapcsolatot ( $r^2 > 50\%$ ) (6. melléklet).

Zhang és mtsai (2015) azt találták, hogy az őszi fenofázisok az augusztus–szeptember–októberi időszak átlaghőmérsékletére a legérzékenyebbek. Az időszak átlaghőmérsékletének  $1^\circ\text{C}$ -os emelkedésénél az őszi fenofázisok 2,1 nappal való későbbre tolódását figyelték meg. Gill és mtsai (2015) kutatása szerint az októberi hőmérséklet van a legnagyobb befolyásoló erővel az őszi fenofázisok bekövetkeztének idejére. Ezt követi a lehülés akkumulált mértéke („Cooling Degree Days, CDD”), a szélességi fok, és csak legvégül a csapadékösszeg.

A fásszárú fajok magasságát (7. melléklet) négy különböző időpontban mértük meg: a helyszínekre való telepítésük után 2020 márciusában, ezután 2020, 2021 és 2022 őszen a vegetációs időszak végén. Ez alapján elmondható, hogy a *Cornus sanguinea*-t leszámítva az összes cserjefaj magassága a gödöllői helyszínen meghaladta a budapesti helyszínen mért értéket. Ugyanez mondható el a törzsátmérő értékekről (8. melléklet) is, azzal a különbséggel, hogy ott a veresgyűrű *Cornus sanguinea* törzsátmérő értékei a záró méréskor azonos értéket mutattak a két helyszínen.

A megemelkedett hőmérséklet hatására a fásszárúak éves növekedése világszerte felgyorsult (Kahle 2008, Pretzsch et al. 2014a, 2014b). A hőmérséklet-emelkedés azonban együtt járt a tavaszi időszakban tapasztalható csapadékhiánnyal, a trópusi éjszakák számának növekedésével, és a csökkent vízellátottságot mutató napok számának növekedésével, mely tényezők szintén befolyásolják a fásszárúak növekedését (Boisvenue & Running 2006). Salomón és mtsai (2022) azt találták, hogy a hóhullámok nem csökkentették a fásszárúak növekedését, az extrém magas hőmérséklet azonban általánosságban gátolja a fák növekedését (Kozłowski & Pallardy 1997). A fák növekedési üteme az elmúlt ötven évben Közép-és Észak-Európában növekedett, míg Dél-Európában csökkent (Vacek et al. 2023). Láthatjuk, hogy a fák növekedését összességében bonyolult folyamatok határozzák meg, így nem tudom egyértelműen eldönteni, hogy esetükben mi okozta a gödöllői egyedek nagyobb növekedési ütemét.

A levélfejlődés adatokat (9. táblázat) tekintve, az utolsó adatfelvételek átlagának helyszínenkénti különbsége (budapesti adat értékéből kivontam a gödöllői adatot) 2021-ben minimális volt, ebben az évben a budapesti helyszínen mért levélméretek kis mértékben, de nagyobbak voltak a gödöllőiekénél. 2022-ben ez megfordult, a különbség azonban ez esetben sem igazán jelentős. A két év különbségeinek átlaga alapján a helyszínhatás a levélméretekben nem igazán érhető tetten.

9. táblázat: A fásszárú fajok záró (növekedés végén felvett) levéladatai centiméterben megadva és ezek helyszínek közötti különbsége (a budapesti helyszín adatából kivonva a gödöllői helyszín adatát)

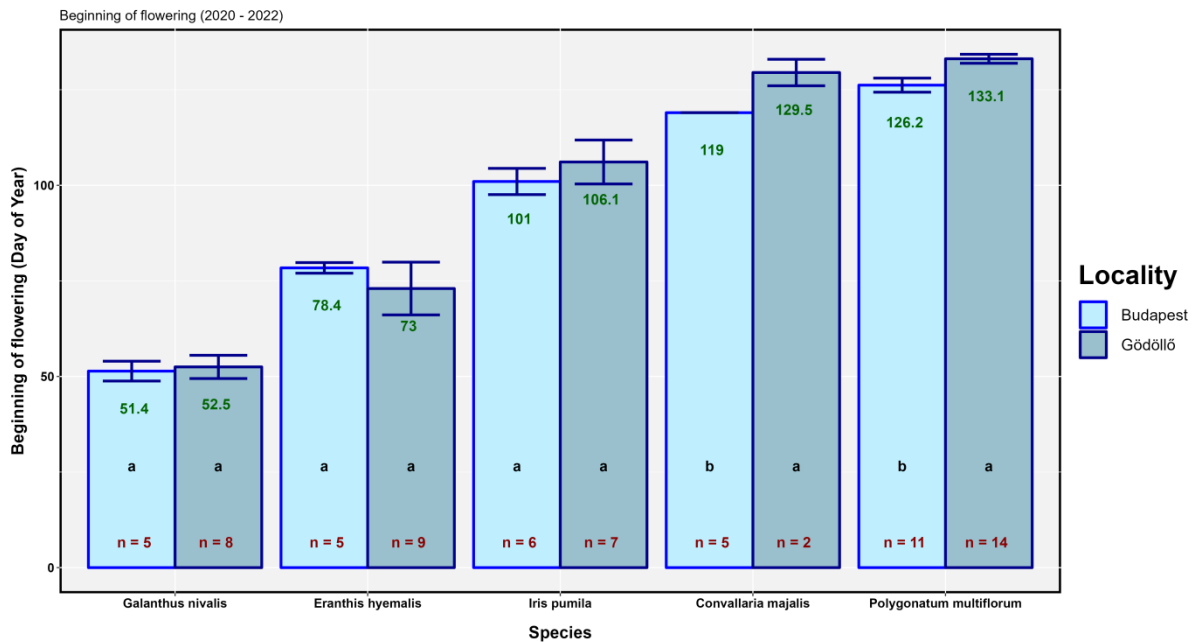
<b>A fásszárúak kifejlett leveleinek vizsgált paraméterei a két helyszínen</b>						
	Levélhossz Gödöllő (cm)	Levélhossz Budapest (cm)	<b>Különbség</b> (cm)	Levélszélesség Gödöllő (cm)	Levélszélesség Budapest (cm)	<b>Különbség</b> (cm)
2021	5,40	5,52	0,12	2,47	2,70	0,23
2022	5,57	4,96	-0,60	2,56	2,37	-0,19
<b>Átlag (cm)</b>	<b>5,49</b>	<b>5,24</b>	<b>-0,24</b>	<b>2,51</b>	<b>2,53</b>	<b>0,02</b>

Eredményeimhez hasonlóan Öztürk és mtsai (2015) a levélfelület (*leaf area*, LA) és a hőmérséklet között nem találtak erős kapcsolatot. Arra jutottak, hogy a léghőmérséklet – sem az aktuális, sem az azt megelőző évben mért léghőmérséklet – nincs hatással az adott évben mérhető levélnövekedésre, a páratartalom azonban pozitívan befolyásolja azt. A páratartalom értékei mindkét évben az alacsonyabb átlaghőmérsékletű gödöllői helyszínen voltak magasabbak (4. táblázat). Eredményeimmel ellentétben Meier és Leuschner (2008) bükkerdők vizsgálatokor arra a megállapításra jutottak, hogy mind az aktuális, mind az azt megelőző évben mért átlaghőmérséklet és csapadékösszeg is hatással van a levélnövekedésre (10. és 3. táblázat).

#### 4.1.2 Geofitonok

A geofiton fajok reproduktív fenológiája a következőképpen alakult: Az *Iris pumila* 2020-ban mindkét helyszínen virágzott, a rövid virágzási periódus és heti rendszerességű adatfelvétel okán azonban virágzási adatot csak a budapesti helyszínen sikerült felvenni, Gödöllőn a bimbók, majd az elszáradt virágok jelenlétéből lehetett a virágzás megtörténtére következtetni. A faj 2021-ben és 2022-ben is mindkét helyszínen virágzott, azonban mindkét helyszínen csak igen csekély számú virág jelentlétét tudtuk rögzíteni a fent kifejtett okok miatt. A faj 2020-ban mindkét helyszínen, míg 2021-ben csak a budapesti helyszínen termést is hozott. 2022-ben termésérés nem volt megfigyelhető. A *Convallaria majalis* példányai csak 2022-ben virágoztak, ekkor mindkét helyszínen, termést azonban csak Budapesten hoztak. A *Polygonatum multiflorum* példányai mindkét helyszínen, mindhárom évben virágoztak és termést is hoztak. A *Galanthus nivalis* és *Eranthis hyemalis* példányait csak az első év végén telepítettük a kísérleti helyszínekre, így adatok a két fajról csak a második és harmadik évből állnak rendelkezésre. A *Galanthus nivalis* és az *Eranthus hyemalis* példányai 2021-ben mindkét helyszínen virágoztak és termést is hoztak. 2022-ben a *Galanthus nivalis* példányai a gödöllői helyszínen virágoztak és termést is hoztak, a budapesti helyszínen nem. Az *Eranthis hyemalis* példányai pedig a gödöllői helyszínen virágoztak és termést hoztak, azonban a budapesti helyszínen sajnos nem hajtottak ki, a példányok valószínűleg elpusztultak.

Mivel a vizsgált fajok virágzási időszaka viszonylag rövid, több faj több évben egyáltalán nem virágzott, egy faj példányai pedig az egyik helyszínen elpusztultak, az elemzéshez felhasználható mintaelemszám viszonylag alacsony volt.



11. ábra: A virágzás kezdetének (első virág megjelenésének) ideje az év napjaiban kifejezve (2020-2022). A *a* és *b* betű jelzi, hogy az átlagos értékek különbsége fajonként helyszínenként 5%-os szignifikancia szint mellett szignifikáns-e. Az *n* betű jelzi a mintavételek számát.

Az **első virág megjelenése** (11. és 16. ábra) az ötből négy faj esetében mindhárom évben (értelemszerűen azokban az években, ahol az adott faj esetében virágzás volt megfigyelhető) a magasabb átlaghőmérsékletű budapesti helyszínen következett be korábban. A különbség a két legkésőbb virágzó faj, a *Convallaria majalis* és a *Polygonatum multiflorum* esetében volt szignifikáns.

Az egyetlen faj, az *Eranthis hyemalis*, amely ellenkező irányú hatást mutatott, csak a 2021-es évben virágzott mindkét helyszínen, ez a körülmény torzította az eredményeket. Amennyiben csak azt az évet (2021-et) vizsgáljuk, úgy a budapesti helyszínen a virágzás kezdetének az év napjaiban kifejezett időpontja 78,4 míg a gödöllői helyszínen 90. Tehát a gödöllői helyszínen 11,6 nappal később kezdődött a virágzás.

A **virágzás kezdetének** átlagos időpontja az év napjaiban kifejezve a budapesti helyszínen 95,2, míg a gödöllői helyszínen 98,84. A különbség 3,64 nap, mely alapján a geofiták virágzásának kezdetének összesített átlagos fenológiai érzékenysége **-2,01 nap/°C**.

A virágzás a magasabb átlaghőmérsékletű budapesti helyszínen korábban kezdődött, mint az alacsonyabb átlaghőmérsékletű gödöllői helyszínen, mely megegyezik az általánosan tapasztalható trendekkel (Menzel & Fabian 1999, Menzel 2000, Sparks et al. 2000, Fitter & Fitter 2002, Parmesan & Yohe 2003, Menzel et al. 2006, Elzinga et al. 2007, Bertin 2008, Szabó et al. 2016, Renner & Zohner 2018). Egy müncheni botanikus kertben végzett hosszú távú fenológiai megfigyelés eredményei szerint az ott található lágyszárú fajok tavaszi hőmérsékletre adott fenológiai érzékenysége 2,6-4,6 nap/1°C (Renner et al. 2021).

Amennyiben külön vizsgáljuk a télvégi, kora tavaszi fajokat (*Galanthus nivalis*, *Eranthis hyemalis*), összehasonlítást csak a 2021-es évben tudunk végezni. Ebben az évben a *Galanthus nivalis* virágzásának kezdetének, Budapesten mért átlagos időpontja az év napjaiban kifejezve 51,4, míg Gödöllőn 58,5. Az *Eranthis hyemalis* esetében a budapesti helyszínen a virágzás kezdetének az év napjaiban kifejezett időpontja 78,4 míg a gödöllői helyszínen 90. A két faj virágzásának kezdetének átlagos időpontja Budapesten 64,9, míg Gödöllőn 74,25. A két

virágzáskezdeti időpont közötti különbség 9,35 nap. A fajok virágzását megelőző hónap (január-február) és a virágzásuk hónapjának (február-március) helyszínenkénti átlaghőmérséklete a következőképpen alakult.

10. táblázat: A 2021. év első három hónapjának átlaghőmérsékletének alakulása a két kísérleti helyszínen

<b>A 2021. év első három hónapjának átlaghőmérsékletének alakulása a két kísérleti helyszínen</b>				
Vizsgált időszak	2021. január	2021. február	2021. március	<b>A 3 hónap együttes átlaghőmérséklete</b>
Gödöllő	0,95 °C	1,97 °C	5,66 °C	<b>2,86 °C</b>
Budapest	2,99 °C	3,85 °C	9,49 °C	<b>5,44 °C</b>
<b>Különbség</b>	<b>2,04 °C</b>	<b>1,88 °C</b>	<b>3,83 °C</b>	<b>2,58 °C</b>

A vizsgált három hónap átlaghőmérséklete között mért különbség (2,58 °C) alapján (10. táblázat) a korai fajok virágzásának fenológiai érzékenysége **-3,62 nap/°C**.

Amennyiben a kora tavaszi fajok kora tavaszi hőmérsékletre adott fenológiai érzékenységet (-3,62 nap/°C) összevetjük az összes faj éves átlaghőmérsékletre adott fenológiai érzékenységgel (-2,01 nap/°C), láthatjuk, hogy a kora tavaszi fajok fenológiai érzékenysége nagyobb, mely összhangban van a korábbi kutatások eredményeivel (Mosquin 1971, Price & Waser 1998, Arft et al. 1999, Dunne et al. 2003, Fitter & Fitter 2002, Sparks & Menzel 2002, Hepper 2003; Traidl-Hoffmann et al. 2003, Menzel et al. 2006, Miller-Rushing & Primack 2008, Cook et al. 2012a, 2012b, Wolkovich et al. 2012, 2014).

Snopková és Hýrošová (2017) a *Galanthus nivalis*-szal kapcsolatban azt találták, hogy a felvidéki Besztercebánya környékén a márciusi átlaghőmérséklet 1 °C-os emelkedése a faj virágzását 5 nappal korábbra tolja. Mivel jelen kísérletben a hóvirág virágzásának kezdete átlagosan mindkét helyszínen február második felére esett, ez az összehasonlítás esetünkben nem értelmezhető. Amennyiben a január-februári átlaghőmérséklettel (a két helyszín közti átlagos különbség 1,96 °C) vetjük össze, a faj virágzásának fenológiai érzékenysége mindössze 0,56 nap/°C.

A három tavasszal virágzó faj (*Iris pumila*, *Convallaria majalis* és *Polygonatum multiflorum*) virágzásának kezdetének átlagos időpontja az év napjaiban kifejezve a gödöllői helyszínen 122,9, míg a budapesti helyszínen 115,4 volt. A különbség 7,5 nap.

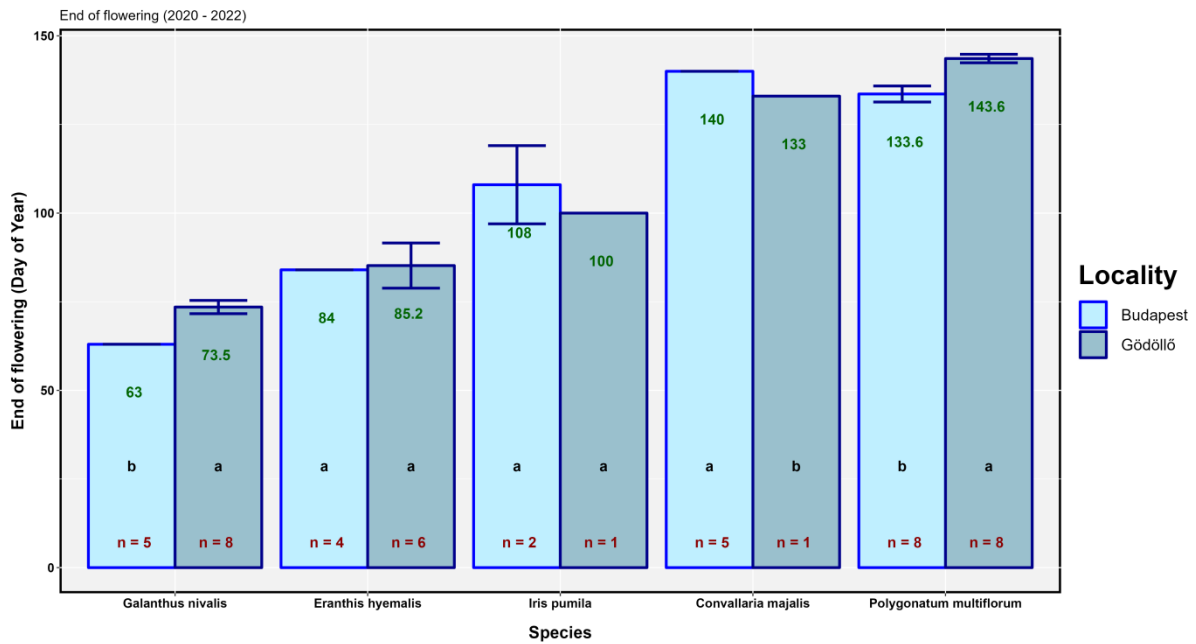
11. táblázat: A három tavaszi hónap átlaghőmérséklete helyszínenkénti alakulása

A három tavaszi hónap átlaghőmérséklete helyszínenkénti alakulása			
Tavaszi hőmérsékletek	Gödöllő	Budapest	Különbség
2020. március	6.74 °C	8.30 °C	1.57 °C
2020. április	11.87 °C	13.92 °C	2.05 °C
2020. május	14.30 °C	15.84 °C	1.54 °C
<b>Átlag 2020. tavasz</b>	<b>10.97 °C</b>	<b>12.69 °C</b>	<b>1.72 °C</b>
2021. március	5.66 °C	9.49 °C	3.83 °C
2021. április	8.39 °C	10.22 °C	1.83 °C
2021. május	13.37 °C	15.17 °C	1.80 °C
<b>Átlag 2021. tavasz</b>	<b>9.14 °C</b>	<b>11.6 °C</b>	<b>2.49 °C</b>
2022. március	6.08 °C	7.87 °C	1.79 °C
2022. április	9.27 °C	11.32 °C	2.05 °C
2022. május	17.04 °C	19.49 °C	2.45 °C
<b>Átlag 2022. tavasz</b>	<b>10.80 °C</b>	<b>12.89 °C</b>	<b>2.10 °C</b>
<b>Összesített átlaghőmérséklet</b>	<b>10.30 °C</b>	<b>12.40 °C</b>	<b>2.10 °C</b>

A fajok virágzását megelőző (március) hónap és a három faj virágzási idejének (április-május) átlaghőmérséklete (11. táblázat) alapján a virágzásuk kezdetét meghatározó időszak átlaghőmérsékletének helyszínenkénti különbsége 2.1 °C. Ez 0,29 °C-al több mint az éves átlaghőmérsékletek közti különbség. Az időszak átlaghőmérsékletének helyszínenkénti különbsége alapján a fajok virágzásának (a virágzás kezdetének) fenológiai érzékenysége **-3,57 nap/°C**, mely szinte megegyezik a kora tavaszi fajok érzékenységével.

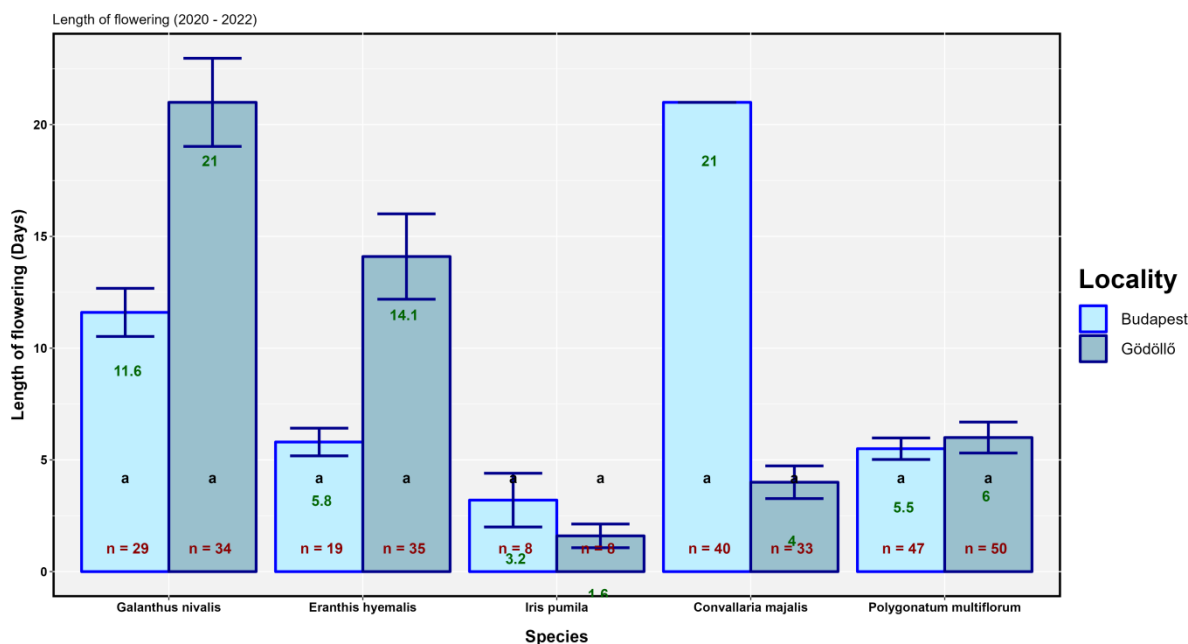
Amennyiben a kora tavaszi fajok kora tavaszi hőmérsékletre adott fenológiai érzékenységét (-3,62 nap/°C) összevetjük a tavasz folyamán később virágzó fajok tavaszi hőmérsékletre adott fenológiai érzékenységével (-3,57 nap/°C), a különbség alig szembetűnő, mely ellentmond a korábbi kutatások eredményeivel (Fitter & Fitter 2002, Sparks & Menzel 2002, Hepper 2003; Traidl-Hoffmann et al. 2003, Menzel et al. 2006, Miller-Rushing and Primack 2008, Cook et al. 2012a, 2012b, Wolkovich et al. 2012, 2014).





12. ábra: A virágzás végének ideje az év napjaiban kifejezve (2020-2022). A *a* és *b* betű jelzi, hogy az átlagos értékek különbsége fajonként helyszínenként 5%-os szignifikancia szint mellett szignifikáns-e. Az *n* betű jelzi a mintavételek számát.

A **virágzás vége** (utolsó időpont, amikor virágok voltak észlelhetőek az adott fajnál) (12. és 16. ábra) esetében nem volt megfigyelhető egyértelmű trend. A *Galanthus nivalis*, *Eranthis hyemalis* és *Polygonatum multiflorum* esetében később történt meg az alacsonyabb átlaghőmérsékletű gödöllői helyszínen, míg az *Iris pumila* és a *Convallaria majalis* esetében a budapesti helyszínen történt meg később. A különbség a legkorábban virágzó *Galanthus nivalis* és a két legkésőbb virágzó faj, a *Convallaria majalis* és a *Polygonatum multiflorum* esetében volt szignifikáns. A virágzás végének időpontja a gödöllői helyszínen az év napjaiban kifejezve átlagosan 107,06, míg a budapesti helyszínen 105,72. A két helyszín közti különbség mindössze 1,88 nap, lényegesen kisebb mint a többi fenofázis esetén, azonban még itt is megfigyelhető, hogy összességében átlagosan korábban következett be a magasabb átlaghőmérsékletű budapesti helyszínen, mint Gödöllőn. A virágzás végének fenológiai érzékenysége (az átlaghőmérsékletből számolva) **-1,04 nap/°C**.



13. ábra: A virágzás hossza a napokban kifejezve (2020-2022). A *a* és *b* betű jelzi, hogy az átlagos értékek különbsége fajonként helyszínenként 5%-os szignifikancia szint mellett szignifikáns-e. Az *n* betű jelzi a mintavételek számát.

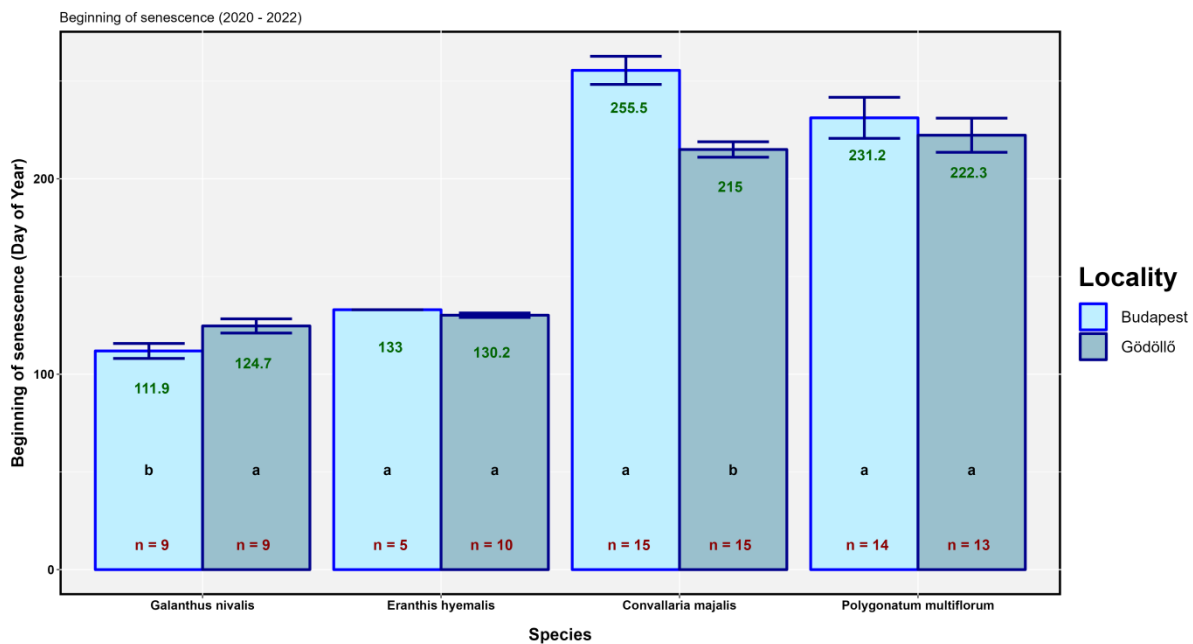
12. táblázat: A virágzás átlagos hossza a két kísérleti helyszínen (2020-2022) (\*az *Eranthis hyemalis* esetében csak a 2021-es évet vettem figyelembe \*\* Az *Iris pumila* esetében a legtöbb példánynál a virágzás kezdete utáni adatfelvételi időpontban már nem volt megfigyelhető virág, tehát a táblázatban a virágzás kezdete egyben a végét is jelöli, azonban ez a heti rendszerességű adatfelvételnek betudható, a valóságban a virágzás hossza ez esetben példányonként 1 és 7 nap közé eshetett, melyet az adatsor nem tud visszaadni \*\*\* a faj kizárólag 2022-ben virágzott) + a gödöllői értékből kivontam a budapesti értéket

A geofitonok virágzás-fenológiai eseményeinek bekövetkezése a kísérleti helyszíneken					
Vizsgált fajok	<i>Galanthus nivalis</i>	<i>Eranthis hyemalis</i> *	<i>Iris pumila</i> **	<i>Convallaria majalis</i> ***	<i>Polygonatum multiflorum</i>
Kezdet					
Budapest	51,4	78,4	101,89	119	126,2
Vég Budapest	63	90	104	140	133,6
Kezdet					
Gödöllő	52,5	84	110,83	126	133,1
Vég Gödöllő	73,5	105	111,25	129,5	143,6
Hossz					
Budapest	<b>11,60</b>	<b>11,60</b>	<b>2,11</b>	<b>21</b>	<b>7,40</b>
Hossz					
Gödöllő	<b>21</b>	<b>21</b>	<b>0,42</b>	<b>3,5</b>	<b>10,5</b>
Különbség <sup>+</sup>	<b>9,40</b>	<b>9,40</b>	<b>-1,69</b>	<b>-17,5</b>	<b>3,10</b>

A virágzás végének fenológiai érzékenysége (-1,04 nap/°C) kisebb mint a virágzás kezdetéé (-2,01 nap/°C), mely azt eredményezi, hogy a magasabb átlaghőmérsékletű budapesti helyszínen a virágzás időtartama összességében hosszabb volt mint a gödöllői helyszínen. Ez ellentétben áll a korábbi kutatások eredményeivel (Miller-Rushing et al. 2009, Sherry et al. 2011, Bock et al.

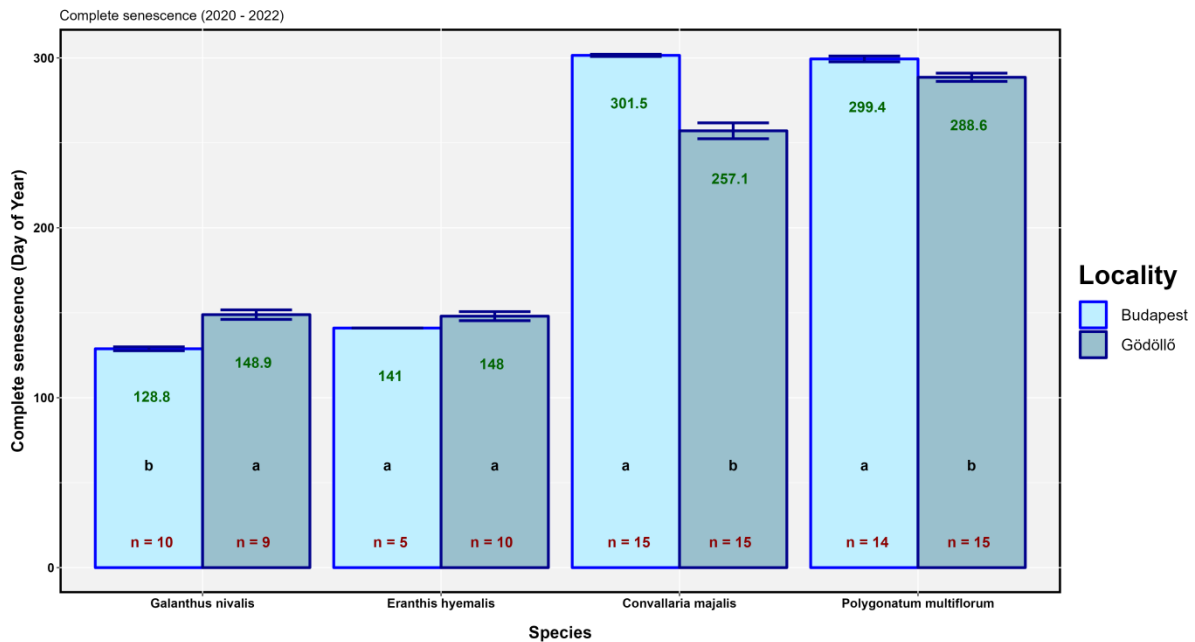
2014, Nagahama et al. 2018), melyek szerint a magasabb hőmérséklet hatására a virágzási időszakok rövidülnek.

A **virágzás hosszában** nagy eltérések mutatkoztak a fajok között (13. ábra és 13 táblázat). A *Galanthus nivalis*, az *Eranthis hyemalis* és a *Polygonatum multiflorum* virágzásának időtartama hosszabb volt a gödöllői kísérleti helyszínen, míg az *Iris pumila* és a *Convallaria majalis* példányai a budapesti helyszínen virágoztak több ideig. A fajok átlagosan **0,54** nappal virágoztak hosszabban a gödöllői helyszínen. Így a virágzás hosszában tapasztalható átlagos eltérés igen kicsi. Az adatok értelmezésében azonban problémát jelenthet, hogy az ötből három faj csupán egyetlen évben virágzott mindkét helyszínen, és a fennmaradó két fajból egy adatai a rövid virágzási periódusból adódóan nehezen értelmezhetőek. Az egyetlen faj a *Polygonatum multiflorum*, melynek példányai mindhárom évben mindkét helyszínen virágoztak.



14. ábra: A szenescencia kezdete az év napjaiban kifejezve (2020-2022). A *a* és *b* betű jelzi, hogy az átlagos értékek különbsége fajonként helyszínenként 5%-os szignifikancia szint mellett szignifikáns-e. Az *n* betű jelzi a mintavételek számát.

A fajok **szenescenciáját** az *Iris pumila* esetében nem rögzítettük, mivel a levelek itt nagy részben zölden átteleltek. A négy vizsgált fajból három (*Eranthis hyemalis*, *Convallaria majalis*, *Polygonatum multiflorum*) esetében az alacsonyabb átlaghőmérsékletű gödöllői helyszínen előbb kezdődött meg a levelek szenescenciája (14. és 16. ábra). A *Galanthus nivalis* esetében fordított trendet figyelhettünk meg, a különbség pedig szignifikáns volt. Hidegkedvelő, kora tavaszi erdei fajról lévén szó, a budapesti helyszínen megfigyelt korábbi szenescencia esetleg a magasabb átlaghőmérsékletnek, alacsonyabb páratartalomnak tudható be. Az *Eranthis hyemalis* budapesti adatai a 2021-es évből származnak, hiszen a faj példányai ott a 2022-es évre elpusztultak. Szintén esetleg a fent részletezett okokból kifolyólag. A *Convallaria majalis* és a *Polygonatum multiflorum* példányainak szenescenciája a gödöllői helyszínen kezdődött korábban, a különbség a *Convallaria majalis* esetében szignifikáns volt.



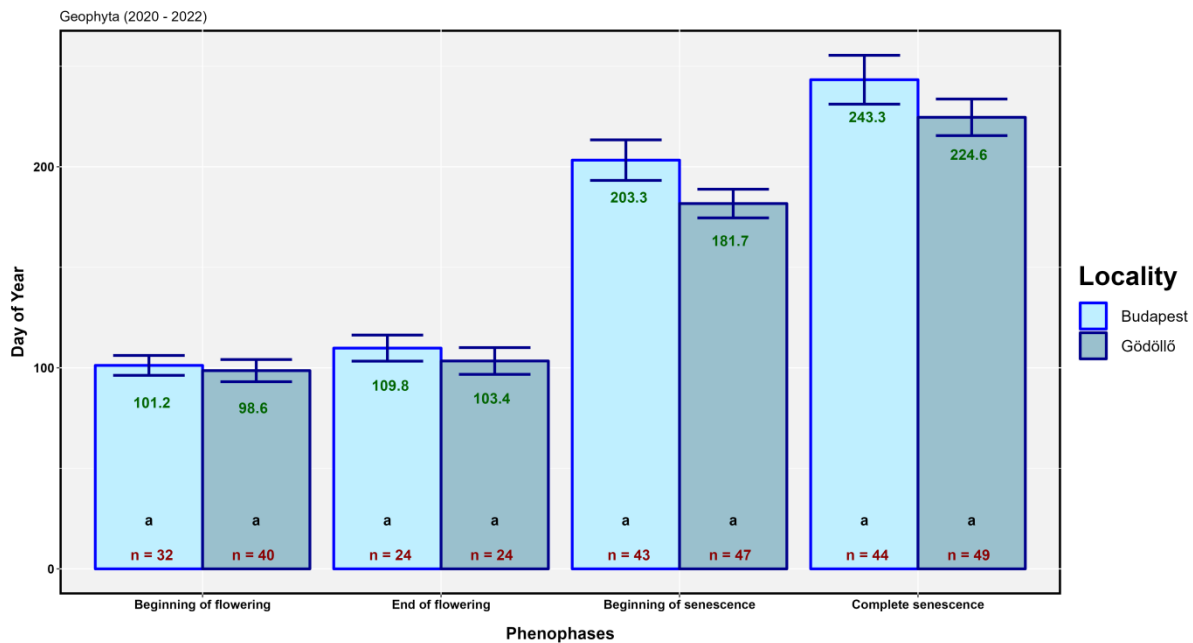
15. ábra: A teljes szenescencia (visszahúzódás) bekövetkeztének ideje az év napjaiban kifejezve (2020-2022). A *a* és *b* betű jelzi, hogy az átlagos értékek különbsége fajonként helyszínenként 5%-os szignifikancia szint mellett szignifikáns-e. Az *n* betű jelzi a mintavételek számát.

A teljes visszahúzódás a két korai, hidegkedvelő faj (*Galanthus nivalis*, *Eranthis hyemalis*) esetében a magasabb átlaghőmérsékletű budapesti helyszínen korábban következett be (15. és 16. ábra). A *Galanthus nivalis* esetében a különbség szignifikáns volt. A későbbi, tavaszi fajok (*Convallaria majalis*, *Polygonatum multiflorum*) esetében a teljes visszahúzódás az alacsonyabb átlaghőmérsékletű gödöllői helyszínen következett be hamarabb. A különbség mindkét faj esetében szignifikáns volt.

Korábbi kutatások azt találták, hogy a lágyszárúak szenescenciája egyes fajok esetén már május közepén megkezdődik, a legtöbb faj a szenescencia maximumát augusztus közepén éri el. Ezzel szemben vannak örökzöld lágyszárú fajok is (pl. a kísérletben is szereplő *Vinca minor*), mely még október közepén sem mutatja a szenescencia jeleit (Horbach et al. 2023). A kísérletben szereplő geofitonok szenescenciájának kezdete a következőképpen alakult. Április végén a budapesti helyszínen lévő *Galanthus nivalis* levélszíneződésével kezdődött, utolsóként a budapesti helyszínen lévő *Convallaria majalis* kezdte meg a levélszíneződést szeptember közepén. A teljes szenescencia állapotát elsőként szintén a hóvirág budapesti helyszínre ültetett egyedei érték el május elején, utolsóként pedig a gyöngyvirág budapesti egyedei október végén. Horbach és mtsai (2023) kimutatták, hogy a lágyszárú fajok fenológiájában (minden fenofázis esetén külön-külön is) tapasztalható szórás jóval nagyobb, mint a fásszárúakénál tapasztalható szórás. A kísérletben található fásszárúak közül a lombszíneződést legkorábban és legkésőbb megkezdő fajok közötti időbeli különbség 46,2 nap volt, míg a geofitonok szenescenciájára vonatkozóan ez az érték 143,6 nap volt. A teljes szenescencia állapotát illetően a fanerofitonoknál mért különbség 37,7 nap, a geofitonoknál 172,7 nap volt.

Ofir és Kigel (1999) kutatása szerint az emelkedő hőmérséklet felgyorsítja a nyári dormancia beálltát, mely részben összhangban áll eredményeinkkel; a legkorábban, legalacsonyabb hőmérsékleti viszonyok közt virágzó *Galanthus nivalis* szenescenciája korábban kezdődött és korábban is érte el a teljes szenescencia állapotát a magasabb átlaghőmérsékletű budapesti helyszínen. Bár a geofiták egy része a legszárazabb nyári időszakban már nyugalmi állapotban (“summer dormancy”) van, túlélésüket és így későbbi elterjedésüket nagyban meghatározza a

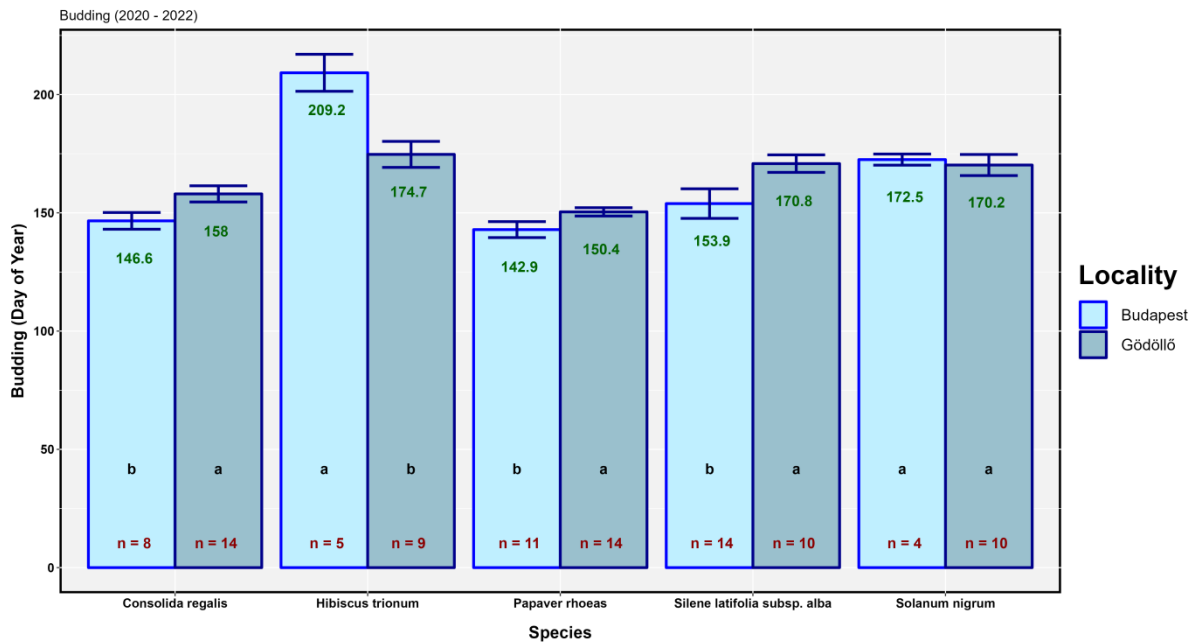
legszárazabb negyedévben mért csapadékösszeg (Shirreffs 1985; Zubtsova et al. 2002, Howard et al. 2019, Puchalka et al. 2023). A 21. század során a klímaváltozás összességében valószínűleg csökkenteni fogja a geofitonok, többek közt a *Convallaria majalis* európai elterjedését, csökkentve ezzel az európai erdei életközösségek biodiverzitását (Puchalka et al. 2023). Ez esetleg megmagyarázhatja az *Eranthis hyemalis* magasabb átlaghőmérsékletű, alacsonyabb páratartalmú budapesti helyszínen bekövetkezett pusztulását, valamint a *Galanthus nivalis* egyedeinek romló kondícióját és a virágzás elmaradását ugyanezen a helyszínen.



16. ábra: A geofitonok fenofázisai összesítve (2020-2022). A *a* és *b* betű jelzi, hogy az átlagos értékek különbsége fajonként helyszínenként 5%-os szignifikancia szint mellett szignifikáns-e. Az *n* betű jelzi a mintavételek számát.

### 4.1.3 Terofitonok

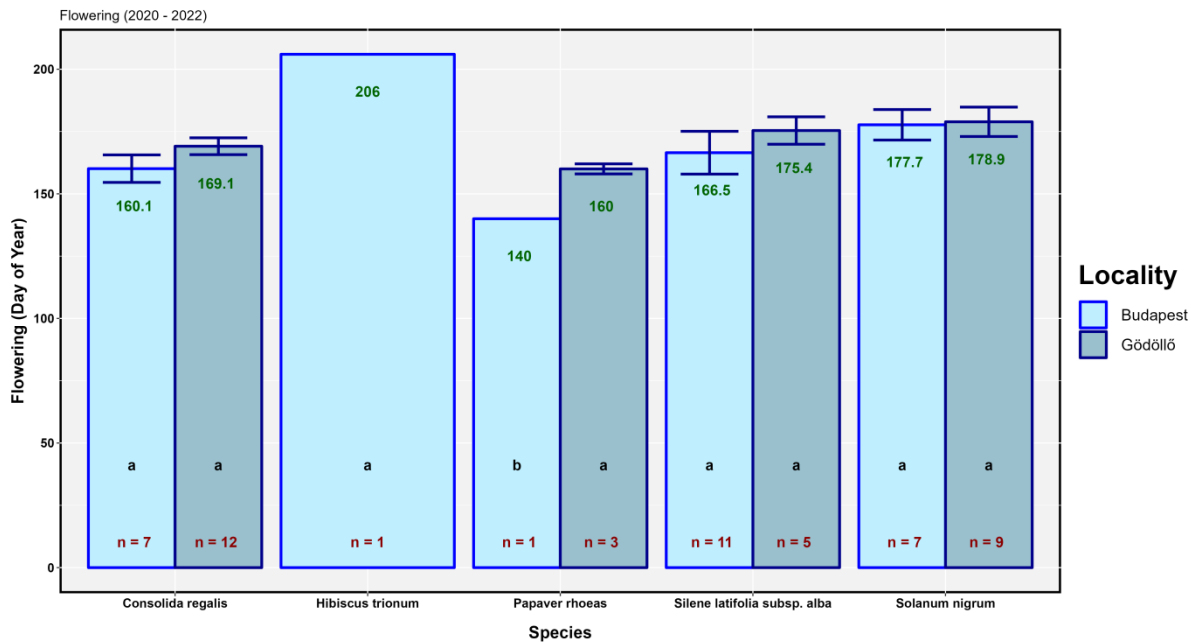
A 6 vizsgált terofiton fajtából csak a *Portulaca oleracea* virágzását nem sikerült rögzítenem, de a termések – mindkét helyszínen, mindhárom évben tapasztalt, sok esetben nagyszámú – jelenlétéből egyértelműen következtethetünk a megtörténtére. A *Solanum nigrum* és *Silene alba* mindhárom évben mindkét helyszínen virágozott és termést is hozott. A *Hibiscus trionum* példányai 2021-ben Gödöllőn elpusztultak mielőtt virágozhattak volna, míg 2022-ben ez a budapesti helyszínen történt meg. 2020-ban mindkét helyszínen virágoztak és termést hoztak, 2021-ben ez csak a budapesti helyszínen volt észlelhető, míg 2022-ben egyedül Gödöllőn. A *Consolida regalis* példányai 2020-ban Budapesten a virágzás előtt elpusztultak, azonban 2021-ben és 2022-ben mindkét helyszínen virágoztak és termést is hoztak. A *Papaver rhoeas* példányai mindhárom évben mindkét helyszínen virágoztak és termést hoztak, azonban a virágzás megtörténtére 2020-ban Budapesten csak a termések jelenlétéből tudtam következtetni.



17. ábra: A bimbózás kezdete az év napjaiban kifejezve (2020-2022). A *a* és *b* betű jelzi, hogy az átlagos értékek különbsége fajonként helyszínenként 5%-os szignifikancia szint mellett szignifikáns-e. Az *n* betű jelzi a mintavételek számát.

A **bimbók megjelenése** három faj (*Consolida regalis*, *Papaver rhoeas*, *Silene alba*) esetén a magasabb átlaghőmérsékletű budapesti helyszínen történt korábban (17. és 22. ábra). A különbség mindhárom esetben szignifikáns volt. A *Hibiscus trionum* és a *Solanum nigrum* esetében a bimbók megjelenése az alacsonyabb átlaghőmérsékletű gödöllői helyszínen történt előbb. A különbség a *Hibiscus trionum* esetében szignifikáns volt.

A bimbók megjelenésének ideje az év napjaiban kifejezve a budapesti helyszínen 165,02 volt, míg a gödöllői helyszínen 164,82. A különbség nem jelentős, mindössze 0,2 nap, a bimbók megjelenése tehát átlagosan ennyivel korábban következett be a gödöllői helyszínen. Ez alapján a bimbók megjelenésének fenológiai érzékenysége **0,11 nap/°C**.



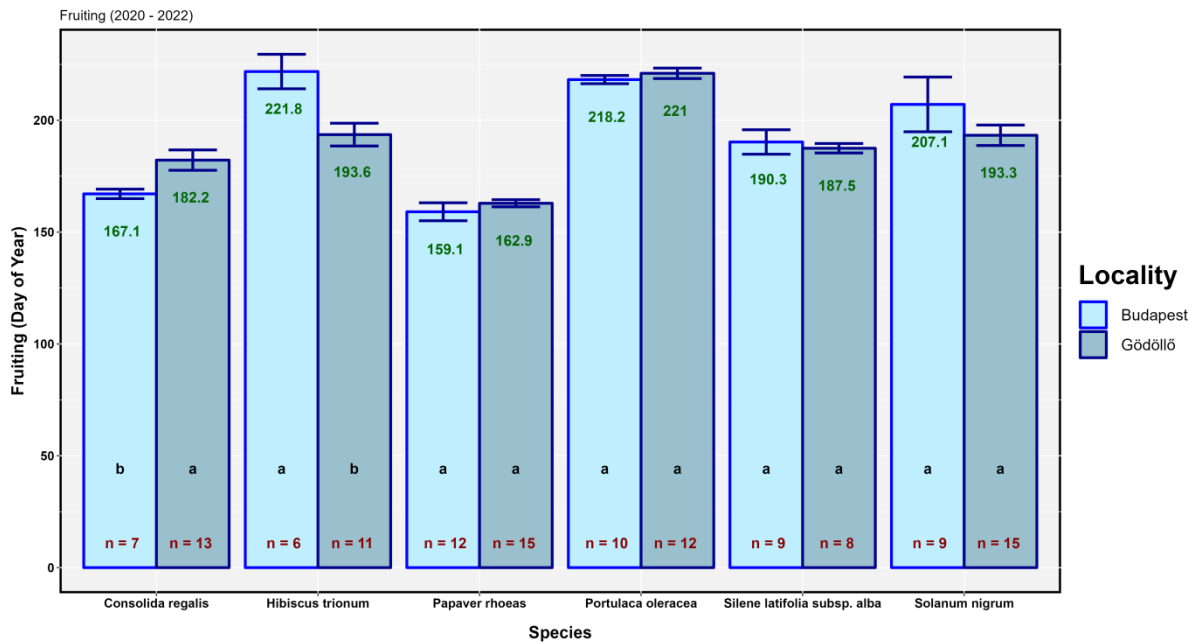
18. ábra: A virágzás kezdete az év napjaiban kifejezve (2020-2022). A *a* és *b* betű jelzi, hogy az átlagos értékek különbsége fajonként helyszínenként 5%-os szignifikancia szint mellett szignifikáns-e. Az *n* betű jelzi a mintavételek számát.

A **virágzás kezdete** minden olyan fajnál, ahol megfelelő mennyiségű adat állt rendelkezésre az összehasonlításához, a budapesti helyszínen következett be korábban. A különbség csak a *Papaver rhoeas* esetén szignifikáns (18. és 22. ábra).

Molau és mtsai (2005) a virágzás megjelenésének időpontja szempontjából vizsgálták a Raunkiaer-féle életformákat, és a fenológiai válaszok szempontjából szignifikáns különbséget mutattak ki köztük. Életformákon belül a legnagyobb szórást (SD) a terofitonok mutatták, legkisebbet, szinte elhanyagolható, a hemicriptophyták. Esetünkben a virágzás megjelenésének legkorábbi és legkésőbbi időpontja közti különbség a terofitonoknál 66 nap, míg a hemikriptofitonoknál 91 nap. Amennyiben a fajokon belüli szórást hasonlítom össze a két életforma esetén, a terofitonoknál valóban lényegesebb nagyobb szórást tapasztalhatunk mint a hemicriptophytáknál (18. és 30. ábra).

A virágzás kezdetének átlagos ideje (a *Hibiscus trionum* adatait nem tekintve) az év napjaiban kifejezve a budapesti helyszínen 161,08 volt, míg a gödöllői helyszínen 170,81. A különbség 9,73 nap, mely alapján a virágzás kezdetének fenológiai érzékenysége **-5,38 nap/°C**.

A virágzás a magasabb átlaghőmérsékletű budapesti helyszínen tehát korábban kezdődött, mint az alacsonyabb átlaghőmérsékletű gödöllői helyszínen, mely megegyezik az általánosan tapasztalható trendekkel (Menzel & Fabian 1999, Menzel 2000, Sparks et al. 2000, Fitter & Fitter 2002, Parmesan & Yohe 2003, Menzel et al. 2006, Elzinga et al. 2007, Bertin 2008, Szabó et al. 2016, Renner & Zohner 2018). Egy müncheni botanikus kertben végzett hosszú távú fenológiai megfigyelés eredményei szerint az ott található lágyszárú fajok tavaszi hőmérsékletre adott fenológiai érzékenysége 2,6-4,6 nap/°C (Renner et al. 2021). Ennél az értéknél a kísérletben mért, a virágzás kezdetére vonatkozó fenológiai érzékenység lényegesen nagyobb (-5,38 nap/°C).

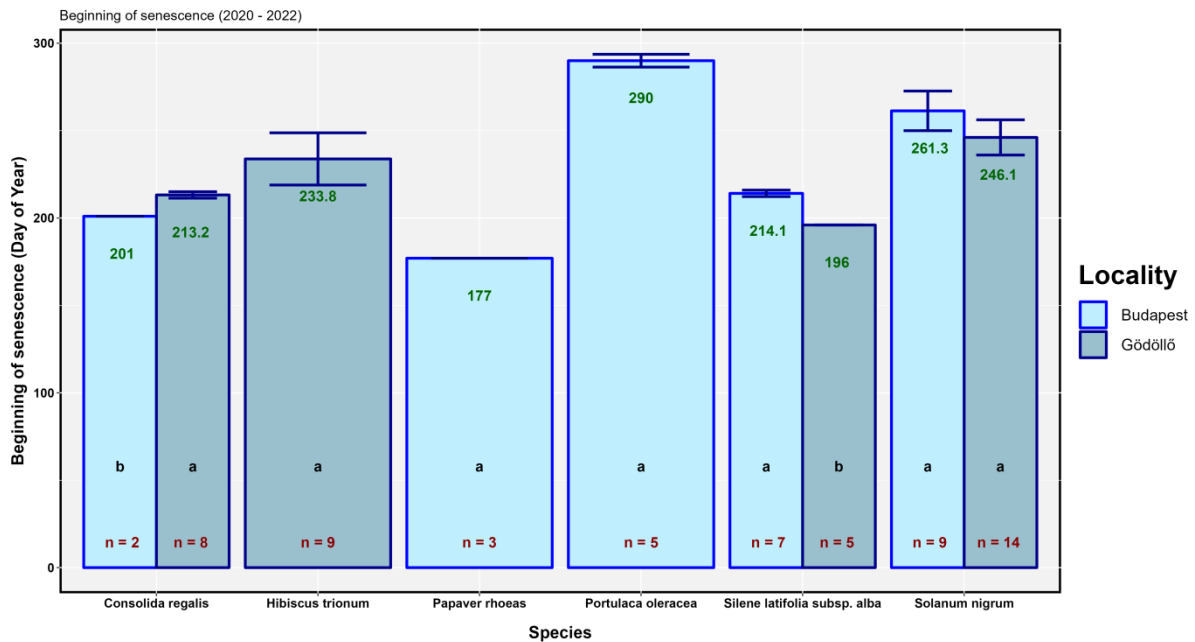


19. ábra: A termések megjelenésének ideje az év napjaiban kifejezve (2020-2022). A *a* és *b* betű jelzi, hogy az átlagos értékek különbsége fajonként helyszínenként 5%-os szignifikancia szint mellett szignifikáns-e. Az *n* betű jelzi a mintavételek számát.

A vizsgált hat faj közül három (*Consolida regalis*, *Papaver rhoeas*, *Portulaca oleracea*) esetén jelentek meg korábban a **termések** a budapesti helyszínen, míg a másik három faj (*Hibiscus trionum*, *Silene alba*, *Solanum nigrum*) esetén a a gödöllői helyszínen következett be ez a fenológiai esemény (19. és 22. ábra). A különbség csak a *Consolida regalis* és a *Hibiscus trionum* esetében volt szignifikáns.

A termések megjelenésének átlagos ideje az év napjaiban kifejezve a budapesti helyszínen 193,93 volt, míg a gödöllői helyszínen 190,08. A különbség 3,85 nap, a termések megjelenése tehát átlagosan ennyivel korábban következett be a gödöllői helyszínen. Ez alapján a termések megjelenésének fenológiai érzékenysége **2,13 nap/°C**.



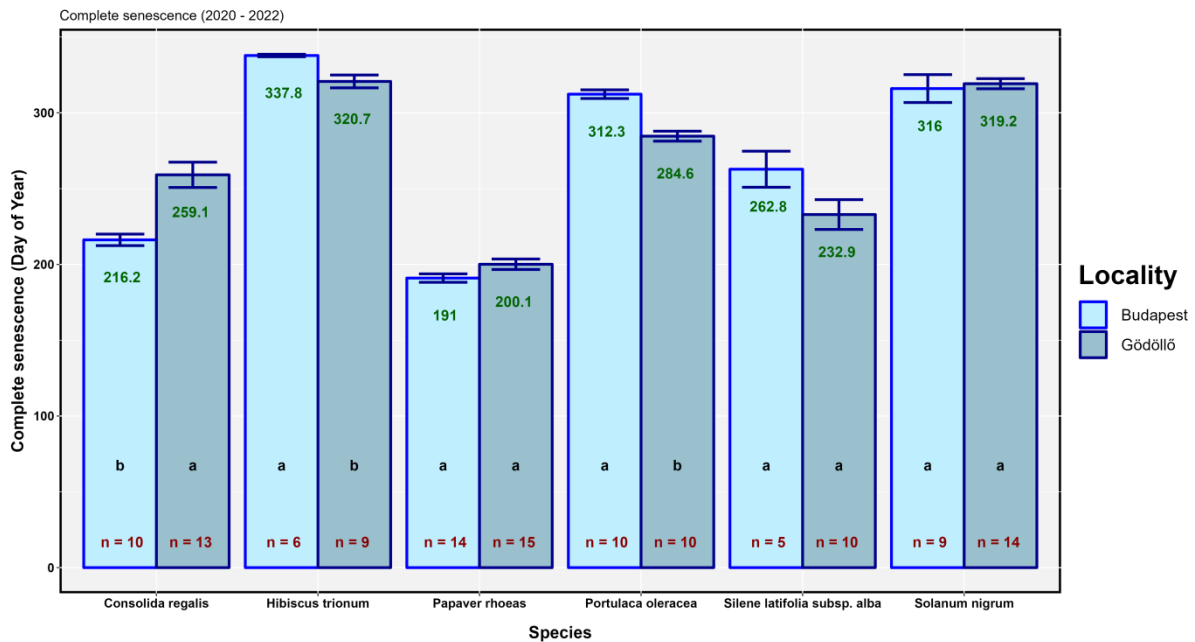


20. ábra: A szenescencia kezdete az év napjaiban kifejezve (2020-2022). A *a* és *b* betű jelzi, hogy az átlagos értékek különbsége fajonként helyszínenként 5%-os szignifikancia szint mellett szignifikáns-e. Az *n* betű jelzi a mintavételek számát.

A **szenescencia kezdete** azon fajok esetében, ahol egyik hétről a másikra az egyedek teljes pusztulása volt tapasztalható, nem értelmezhető. A két helyszín összehasonlítása tehát csak három faj, a *Consolida regalis*, a *Silene alba* és a *Solanum nigrum* esetében lehetséges. Ezen fajok közül két faj (*Silene alba* és a *Solanum nigrum*) esetében a gödöllői helyszínen kezdődött korábban a szenescencia, míg egy faj, a *Consolida regalis* esetében a budapesti helyszínen történt korábban (20. és 22. ábra).

A szenescencia kezdetének átlagos ideje az év napjaiban kifejezve a budapesti helyszínen 225,47 volt, míg a gödöllői helyszínen 218,43. A különbség 7,04 nap, a szenescencia kezdete tehát átlagosan ennyivel korábban következett be a gödöllői helyszínen. Ez alapján a szenescencia kezdetének fenológiai érzékenysége **3,89 nap/°C**.

Horbach és mtsai (2023) kimutatták, hogy a lágyszárúak szenescenciája egyes fajok esetén már május közepén megkezdődik, a legtöbb faj a szenescencia maximumát augusztus közepén éri el. Ezzel szemben vannak örökzöld lágyszárú fajok is (pl. a kísérletben is szereplő *Vinca minor*), melyek még október közepén sem mutatják a szenescencia jeleit (Horbach et al. 2023).



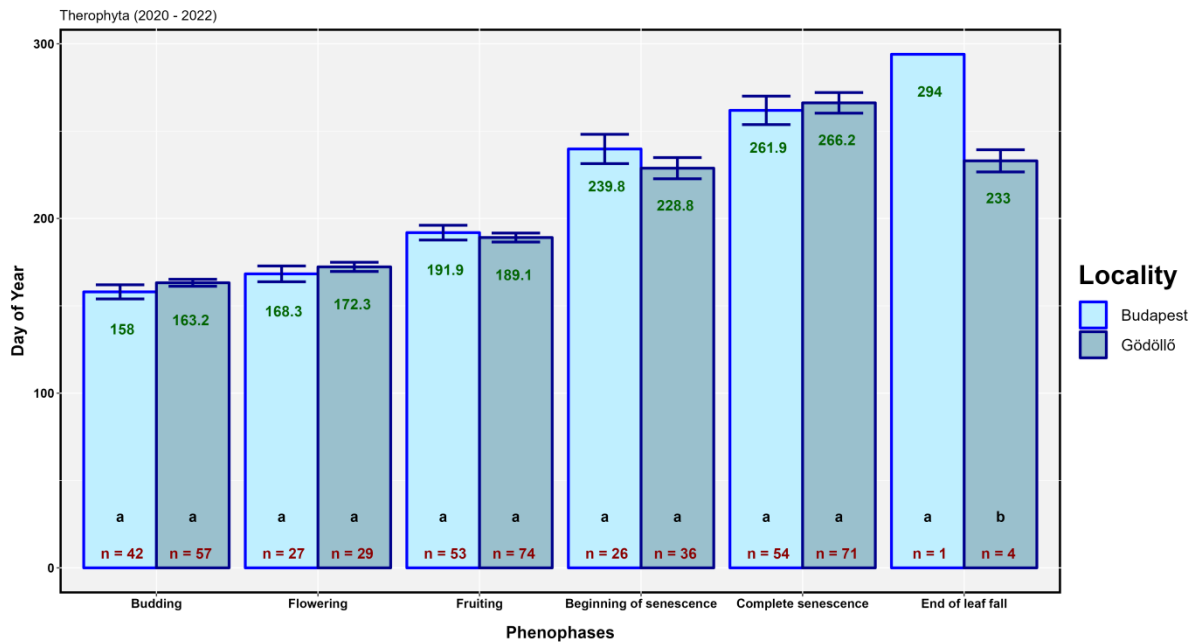
21. ábra: A teljes szenescencia bekövetkezte az év napjaiban kifejezve (2020-2022). A *a* és *b* betű jelzi, hogy az átlagos értékek különbsége fajonként helyszínenként 5%-os szignifikancia szint mellett szignifikáns-e. Az *n* betű jelzi a mintavételek számát.

A **teljes szenescencia** állapota a vizsgált hat faj közül három (*Hibiscus trionum*, *Portulaca oleracea* és *Silene alba*) esetén az alacsonyabb átlaghőmérsékletű gödöllői helyszínen következett be a korábban, míg a másik három (*Consolida regalis*, *Papaver rhoeas*, *Solanum nigrum*) esetén fordított trend volt megfigyelhető (21. és 22. ábra).

A **teljes szenescencia** bekövetkeztének átlagos ideje az év napjaiban kifejezve a budapesti helyszínen 272,69 volt, míg a gödöllői helyszínen 269,43. A különbség 3,26 nap, a szenescencia kezdete tehát átlagosan ennyivel korábban következett be a gödöllői helyszínen. Ez alapján a termések megjelenésének fenológiai érzékenysége **1,8 nap/°C**.

Láthatjuk, hogy bár a szenescencia kezdeténél és a teljes szenescencia állapotának elérésénél a fajok eltérő módon (eltérő irányban és mértékben) reagáltak, összességében mindkét fenofázis esetén megállapítható, hogy a fenofázisok az alacsonyabb átlaghőmérsékletű gödöllői helyszínen következtek be korábban. Ez összhangban áll a korábbi kutatások eredményeivel, melyek megállapították, hogy a korunkban tapasztalható klímaváltozás későbbre tolja az őszi fenofázisokat, a levélszíneződést és lombhullást (pl. Parmesan & Yohe 2003, Kunken et al. 2004, Menzel et al. 2006, Piao et al. 2006, Bertin 2008, Jeong et al. 2011, Gill et al. 2015).

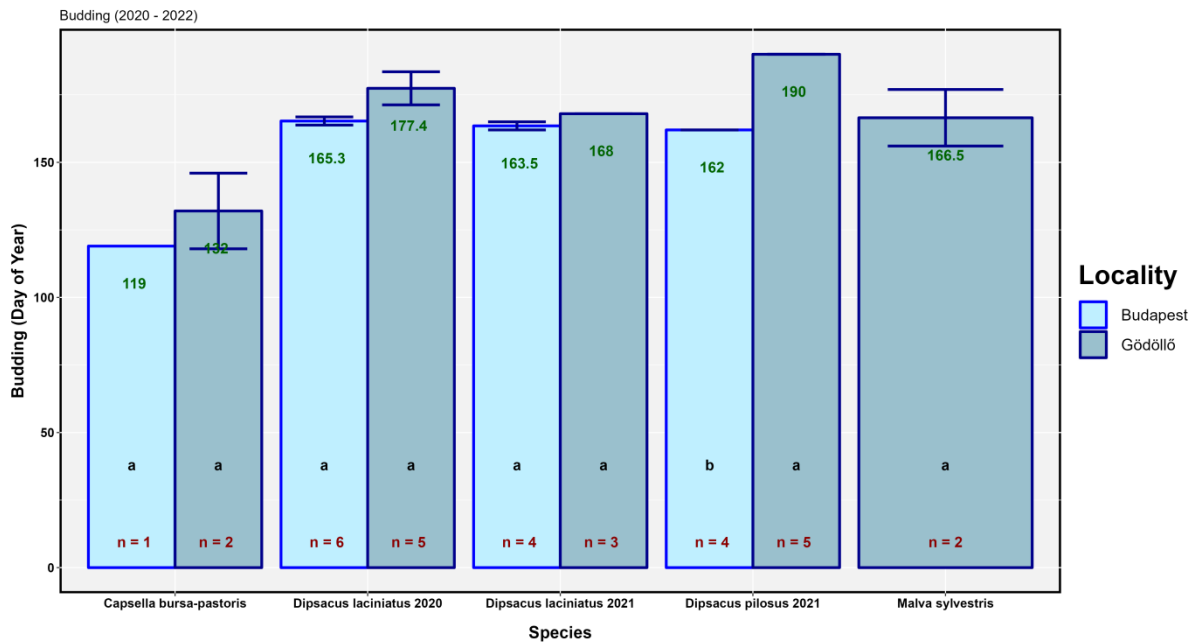
Horbach és mtsai (2023) kimutatták, hogy a lágyszárú fajok fenológiájában (minden fenofázis esetén külön-külön is) tapasztalható szórás jóval nagyobb mint a fásszárúakénál tapasztalható szórás. Ez esetben is megfigyelhető. Amennyiben a teljes szenescencia bekövetkeztét vizsgáljuk, a kísérletben található fásszárúak közül a teljes szenescencia állapotát legkorábban és legkésőbb elérő fajok közötti időbeli különbség 37,7 nap volt, míg a Terofitonok szenescenciájára vonatkozóan ez az érték 146,8 nap volt. Amennyiben a fajokon belüli szórás hasonlítom össze a két életforma esetén, a Terofitonoknál valóban lényegesebb nagyobb szórás tapasztalhatunk, mint a phanerophytáknál (7. és 22. ábra). Ezen felül megállapítható, hogy míg a fásszárúak esetében egyöntetűen minden faj lombhullása az alacsonyabb átlaghőmérsékletű gödöllői helyszínen következett be korábban, addig a Terofitonok esetében ez a vizsgált hat faj felénél történt csak meg, míg a másik három faj ellenkező irányú választ adott (9. és 21. ábra).



22. ábra: A Terofitonok fenofázisainak bekövetkezte az év napjaiban kifejezve (2020-2022). A *a* és *b* betű jelzi, hogy az átlagos értékek különbsége fajonként helyszínenként 5%-os szignifikancia szint mellett szignifikáns-e. Az *n* betű jelzi a mintavételek számát.

#### 4.1.4 Hemiterofitonok

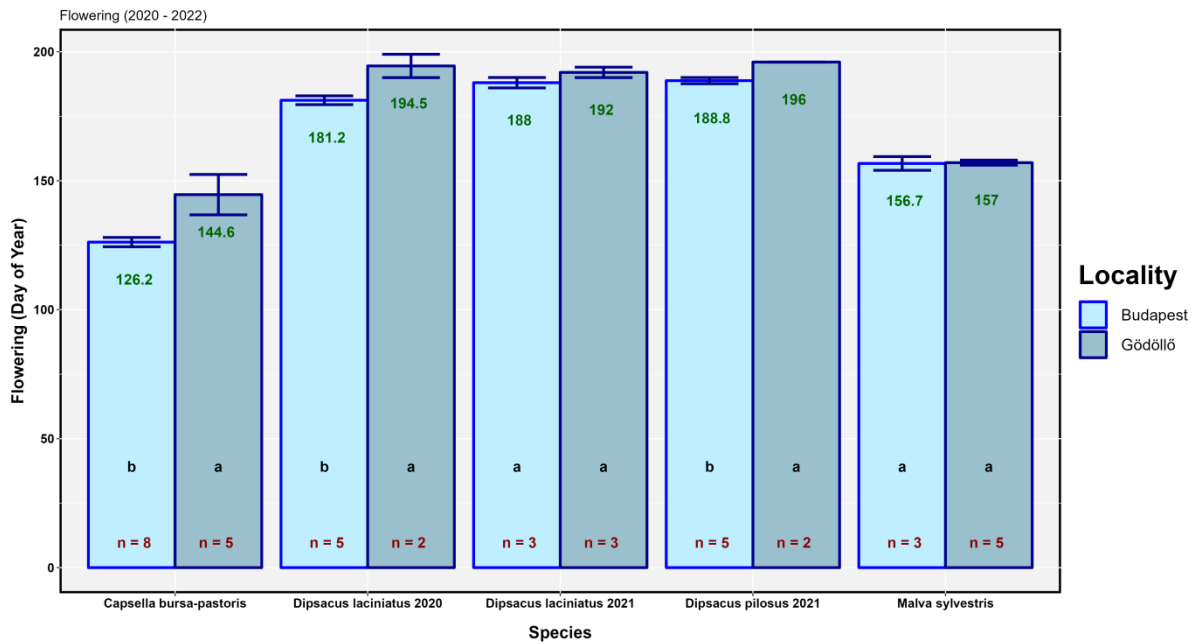
A *Daucus carota* példányai az első évben már tavasszal elpusztultak, és hiába vettem el következő évben is, újra mindkét helyszínen elpusztultak, így a harmadik évben már nem vettem el. A *Capsella bursa-pastoris* példányai mindhárom évben mindkét helyszínen virágoztak és termést is hoztak, azonban a termésérés után mindhárom évben minden példány elpusztult, így minden évben újra vettem el. A *Malva sylvestris* példányai 2020-ban életmódjukból adódóan egyik helyszínen sem virágoztak. 2021-ben a gödöllői helyszínen virágoztak és termést hoztak, a budapesti helyszínen azonban sajnos elpusztultak. Az első vegetációs időszak utáni (2020. november 19.) vetésből származó példányok mindkét helyszínen elpusztultak, a faj 2021-es gödöllői adatait az első vetésből származó példányok szolgáltatták. A harmadik (2021 őszen történt) vetésből származó példányok a budapesti helyszínen virágoztak és termést hoztak, a gödöllői helyszínen a vetés nem sikerült. A faj esetében tehát egyik évben sem volt virágzás egyszerre mindkét helyszínen, így érdemi összehasonlítás nem volt lehetséges. A *Dipsacus pilosus* első vetése egyik helyszínen sem sikerült. A második (2020. december 24.) vetésből származó példányok 2021-ben kikeltek és fejlődésnek indultak, majd a 2022-es évre elérték a reprodukív fázist, ekkor mindkét helyszínen virágoztak és termést hoztak. Az adatbázisban „*Dipsacus pilosus* 2021” néven szerepelnek, mivel a második vetésből származnak. A *Dipsacus laciniatus* első vetésből (2020. év eleje) származó példányai 2020-ban vegetatívan fejlődtek, majd 2021-ben mindkét helyszínen virágoztak és termést hoztak. A példányok ezután nem pusztultak el, átteleltek és 2022-ben is mindkét helyszínen virágoztak és termést hoztak, majd elpusztultak. Az adatbázisban „*Dipsacus laciniatus* 2020” néven szerepelnek. A következő vetésből (Budapest: 2020. november 19. Gödöllő: 2020. november 24.) származó példányok 2021-ben vegetatívan fejlődtek, majd 2022-ben mindkét helyszínen virágoztak és termést is hoztak. Ősszel leveleiken szenescencia volt tapasztalható, a példányok azonban egyik helyszínen sem pusztultak el. Az adatbázisban „*Dipsacus laciniatus* 2021” néven szerepelnek.



23. ábra: A bimbózás kezdete az év napjaiban kifejezve (2020-2022). A *a* és *b* betű jelzi, hogy az átlagos értékek különbsége fajonként helyszínenként 5%-os szignifikancia szint mellett szignifikáns-e. Az *n* betű jelzi a mintavételek számát.

A *Malva sylvestris* esetében nem áll rendelkezésre bimbók számára vonatkozó adat a budapesti helyszínen. A többi faj mindegyikénél a magasabb átlaghőmérsékletű budapesti helyszínen jelentek meg a bimbók korábban (23. és 28. ábra). Érdekes, hogy azonos fajon belül a különböző években történt vetésből származó egyedek is eltérően reagáltak a helyszínhatásra, azonban, ha a 2022-es évet tekintjük, melyben mindkét vetésből származó egyedek virágoztak, a különbség kisebb. Tehát az ábrán látható különbség az évjáráthatásból is eredhet, mely azonban nem bizonyítható, hiszen a 2021-es vetésből származó egyedek nem virágoztak 2021-ben.

A **bimbók megjelenésének** átlagos ideje az év napjaiban kifejezve a budapesti helyszínen 152,45 volt, míg a gödöllői helyszínen 166,85. A különbség 14,4 nap, a szeszencia kezdete tehát átlagosan ennyivel korábban következett be a gödöllői helyszínen. Ez alapján a termések megjelenésének fenológiai érzékenysége **-7,96 nap/°C**.

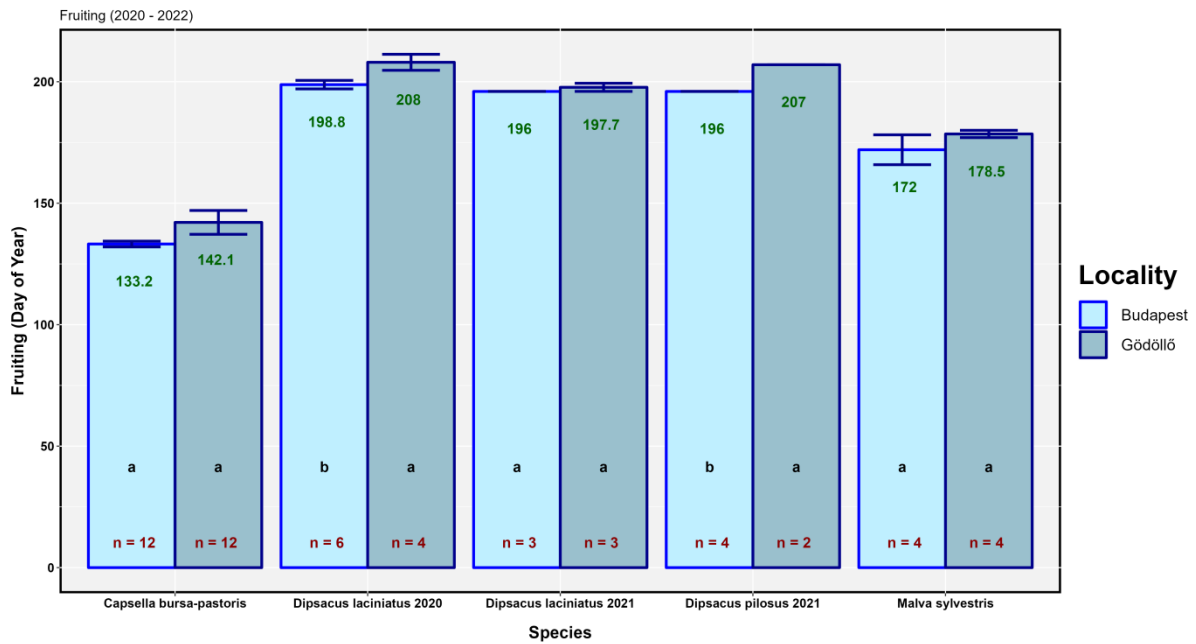


24. ábra: A virágzás kezdete az év napjaiban kifejezve (2020-2022). A *a* és *b* betű jelzi, hogy az átlagos értékek különbsége fajonként helyszínenként 5%-os szignifikancia szint mellett szignifikáns-e. Az *n* betű jelzi a mintavételek számát.

Az összes vizsgált faj **virágzása** korábban következett be a magasabb átlaghőmérsékletű budapesti helyszínen (24. és 28. ábra). A különbség három faj (*Capsella bursa-pastoris*, *Dipsacus laciniatus* 2020-as vetés, *Dipsacus pilosus*) esetében volt szignifikáns.

A virágzás kezdetének átlagos ideje az év napjaiban kifejezve a budapesti helyszínen 168,18 volt, míg a gödöllői helyszínen 176,82. A különbség 8,64 nap, a virágzás kezdete tehát átlagosan ennyivel korábban következett be a budapesti helyszínen. Ez alapján a virágzás kezdetének fenológiai érzékenysége **-4,77 nap/°C**.

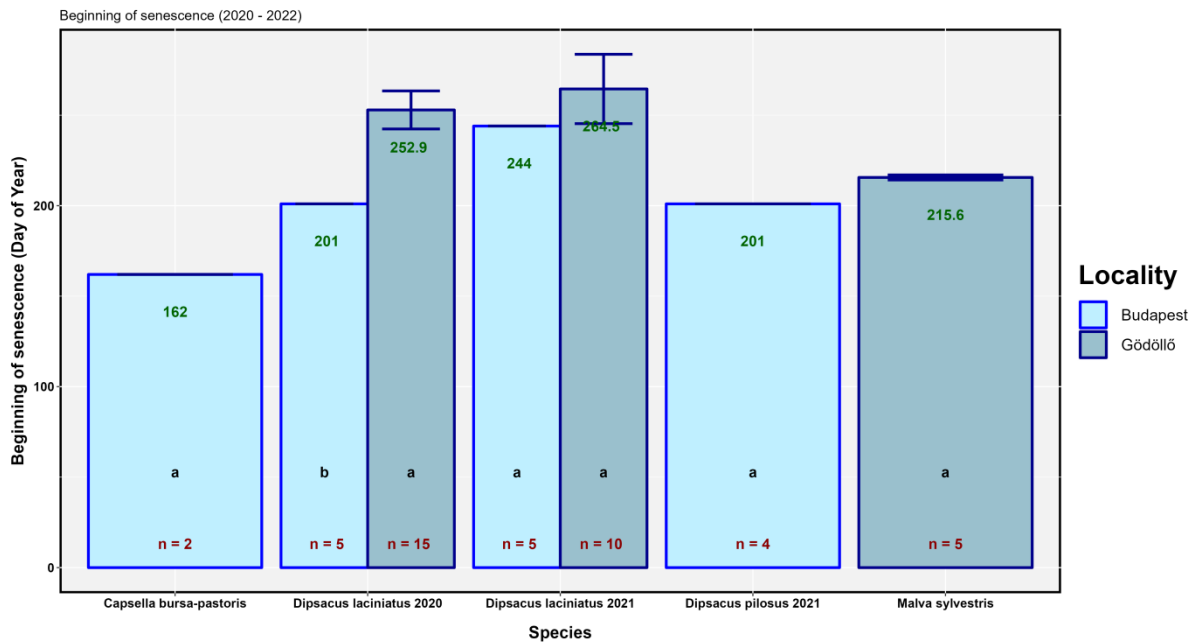
A virágzás a magasabb átlaghőmérsékletű budapesti helyszínen korábban kezdődött, mint az alacsonyabb átlaghőmérsékletű gödöllői helyszínen, mely megegyezik az általánosan tapasztalható trendekkel (Menzel & Fabian 1999, Menzel 2000, Sparks et al. 2000, Fitter & Fitter 2002, Parmesan & Yohe 2003, Menzel et al. 2006, Elzinga et al. 2007, Bertin 2008, Szabó et al. 2016, Renner & Zohner 2018). Egy müncheni botanikus kertben végzett hosszú távú fenológiai megfigyelés eredményei szerint az ott található lágyszárú fajok tavaszi hőmérsékletre adott fenológiai érzékenysége 2,6-4,6 nap/1°C (Renner et al. 2021). Eredményeim (-4,77 nap/°C) összhangban állnak az említett kutatás eredményeivel.



25. ábra: A termések megjelenésének ideje az év napjaiban kifejezve (2020-2022). A *a* és *b* betű jelzi, hogy az átlagos értékek különbsége fajonként helyszínenként 5%-os szignifikancia szint mellett szignifikáns-e. Az *n* betű jelzi a mintavételek számát.

Az összes vizsgált faj esetében megállapítható, hogy **termések megjelenése** korábban következett be a magasabb átlaghőmérsékletű budapesti helyszínen (25. és 28. ábra). A különbség csak a *Dipsacus laciniatus* 2020-as vetése és a *Dipsacus pilosus* esetében volt szignifikáns.

A termések megjelenésének átlagos ideje az év napjaiban kifejezve a budapesti helyszínen 179,2 volt, míg a gödöllői helyszínen 186,66. A különbség 7,46 nap, a termések megjelenése tehát átlagosan ennyivel korábban következett be a budapesti helyszínen. Ez alapján a virágzás kezdetének fenológiai érzékenysége **-4,12 nap/°C**.

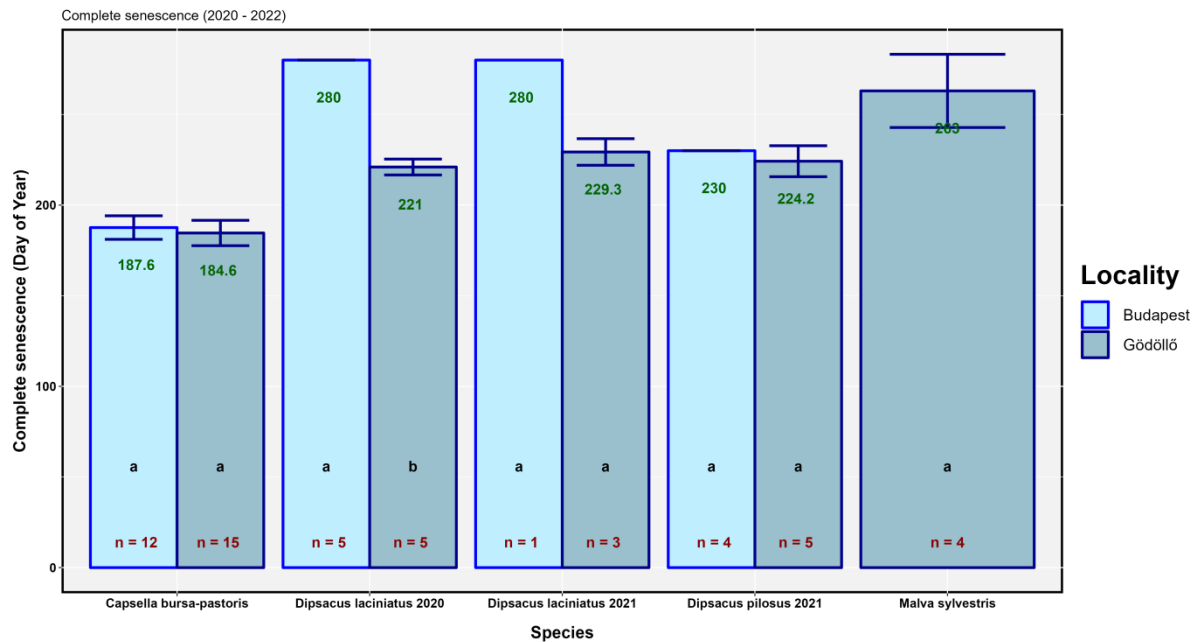


26. ábra: A szenescencia kezdete az év napjaiban kifejezve (2020-2022). A *a* és *b* betű jelzi, hogy az átlagos értékek különbsége fajonként helyszínenként 5%-os szignifikancia szint mellett szignifikáns-e. Az *n* betű jelzi a mintavételek számát.

Az adatok nem megfelelő mennyisége miatt csak a *Dipsacus laciniatus* két vetéséből származó egyedek szenescenciája hasonlítható össze egymással. Megállapítható, hogy mindkét vetésből származó egyedei esetében a budapesti helyszínen kezdődött korábban az **őszi szenescencia**, a reakció mértéke azonban nem egyforma (26. és 28. ábra).

A szenescencia kezdetének átlagos ideje az év napjaiban kifejezve a budapesti helyszínen 225,5 volt, míg a gödöllői helyszínen 258,7. A különbség 33,2 nap, a szenescencia kezdete tehát átlagosan ennyivel korábban következett be a budapesti helyszínen. Ez alapján a *Dipsacus laciniatus* szenescenciájának kezdetének fenológiai érzékenysége **-33,2 nap/°C**.

A szenescencia kezdetére vonatkozó eredményeim ellentétben állnak azzal az általánosan elfogadott nézettel, miszerint a klímaváltozás későbbre tolja az őszi fenofázisokat (pl. Parmesan & Yohe 2003, Kunken et al. 2004, Menzel et al. 2006, Piao et al. 2006, Bertin 2008, Jeong et al. 2011, Gill et al. 2015). Figyelembe kell azonban venni, hogy eredményeim mindössze egy faj adataiból származnak, valamint, hogy az őszi fenofázisokat befolyásoló tényezők szerepe azonban sokkal kevésbé tisztázott, mint a tavasziaké (Menzel et al. 2006, Vitasse et al. 2011, Chen et al. 2020, Zani et al. 2020). Ellentétes hatások és folyamatok (korábbra és későbbre tolódás) egyszerre figyelhetők meg (Gill et al. 2015, Chen et al. 2020, Zani et al. 2020). Az őszi fenofázisok mozgatórugóinak megértése és előrejelzése összességében sokkal bonyolultabb feladat, mint a tavaszi fenofázisoké (Sparks & Menzel 2002). Szintén megemlítendő, hogy bár általánosan elfogadott nézet, hogy az őszi fenofázisok a klímaváltozás hatására későbbre tolódnak, az eddigi eredmények alapján úgy tűnik, hogy a klímaváltozás, főleg a hőmérséklet-emelkedés őszi fenofázisokra gyakorolt hatása gyengébb, mint a tavasziakra gyakorolt hatása, különösen Európában (Piao et al. 2019).



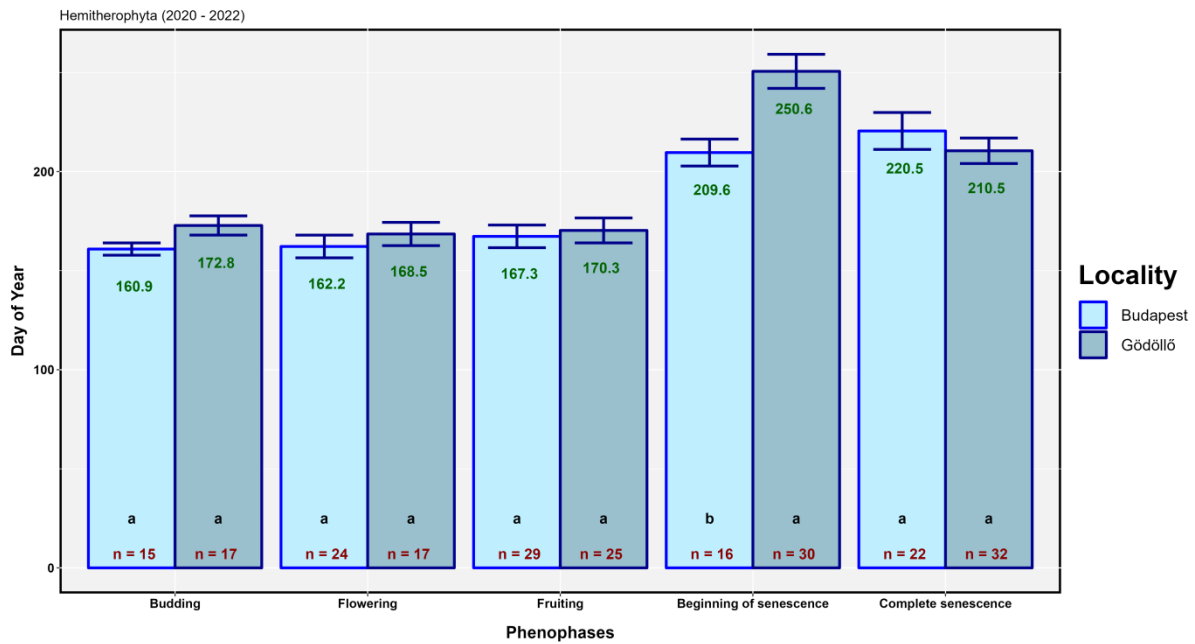
27. ábra: A teljes szeneszencia bekövetkezése ideje az év napjaiban kifejezve (2020-2022). A *a* és *b* betű jelzi, hogy az átlagos értékek különbsége fajonként helyszínenként 5%-os szignifikancia szint mellett szignifikáns-e. Az *n* betű jelzi a mintavételek számát.

A *Malva sylvestris* esetében nem áll rendelkezésre a **teljes szeneszencia** bekövetkezése vonatkozó adat a budapesti helyszínen. A többi faj mindegyikénél az alacsonyabb átlaghőmérsékletű gödöllői helyszínen következett be korábban a teljes szeneszencia (27. és 28. ábra). A *Dipsacus laciniatus* két vetése közti eltérés itt lényegesen kisebb mint a többi fenofázis esetében. Érdekes, hogy a *Dipsacus laciniatus* két vetésének egyedei esetében a szeneszencia egyértelműen korábban kezdődött a budapesti helyszínen, az összes faj - beleértve a *Dipsacus laciniatus* két vetésének egyedeit – az alacsonyabb átlaghőmérsékletű gödöllői helyszínen érte le korábban a teljes szeneszencia állapotát.

A teljes szeneszencia bekövetkezése átlagos ideje az év napjaiban kifejezve a budapesti helyszínen 244,4 volt, míg a gödöllői helyszínen 214,78. A különbség 29,63 nap, a szeneszencia kezdete tehát átlagosan ennyivel korábban következett be a gödöllői helyszínen. Ez alapján a teljes szeneszencia bekövetkezése fenológiai érzékenysége **16,37 nap/°C**.

Ez irányú eredményeim összhangban állnak a korábbi kutatások eredményeivel, melyek megállapították, hogy a korunkban tapasztalható klímaváltozás későbbre tolja az őszi fenofázisokat, a levélszíneződést és lombhullást (pl. Parmesan & Yohe 2003, Kunken et al. 2004, Menzel et al. 2006, Piao et al. 2006, Bertin 2008, Jeong et al. 2011, Gill et al. 2015).

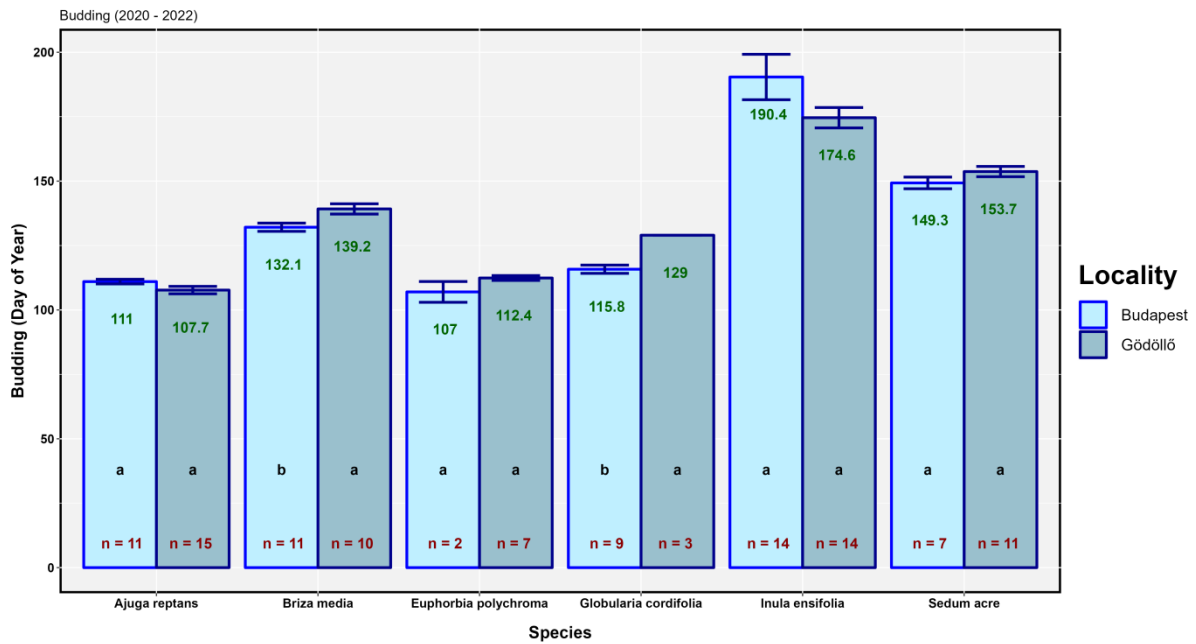




28. ábra: A Hemiterofitonok fenofázisainak bekövetkezte az év napjaiban kifejezve (2020-2022). A *a* és *b* betű jelzi, hogy az átlagos értékek különbsége fajonként helyszínenként 5%-os szignifikancia szint mellett szignifikáns-e. Az *n* betű jelzi a mintavételek számát.

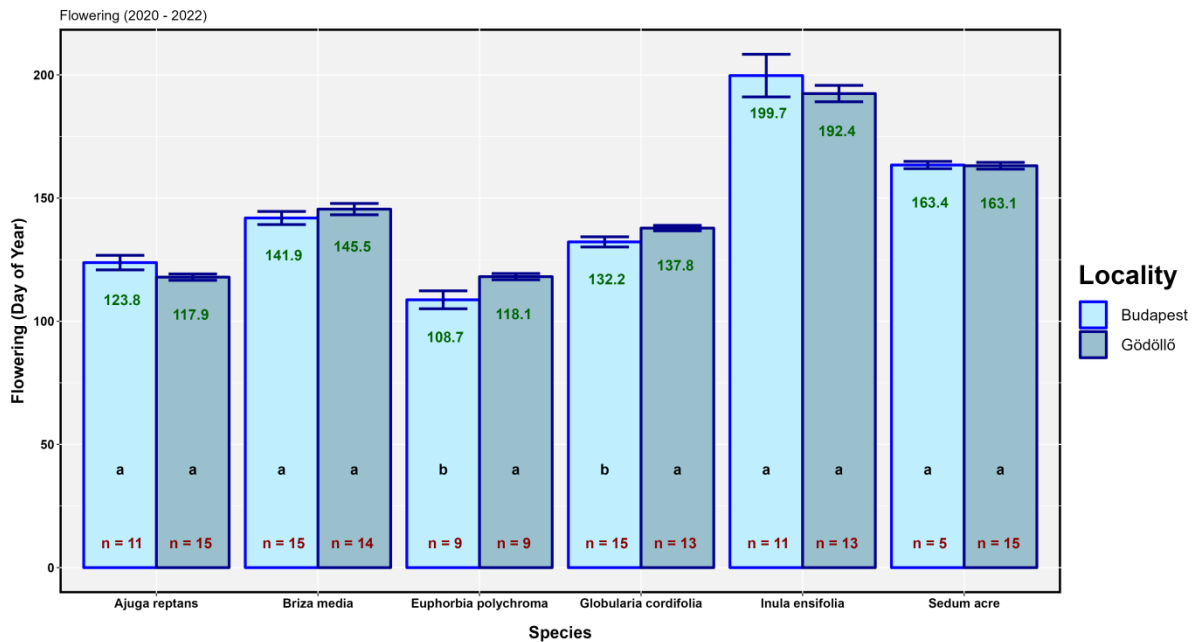
#### 4.1.5 Hemikriptofitonok

Az *Euphorbia epithymoides* egyedei az első évben egyik helyszínen sem virágoztak, azonban a második és harmadik évben mindkét helyszínen virágoztak és termést hoztak. Az *Ajuga reptans* egyedei mind a három évben, mindkét helyszínen virágoztak és termést hoztak. A budapesti helyszínen az egyik egyed az első évben december végéig folyamatosan virágzott. A harmadik, 2022-es évre a budapesti helyszínen csak egy egyed (nem azonos a hosszan virágzó egyeddel) maradt életben, viszont ez az egyed virágzott és termést hozott. A *Globularia cordifolia*, az *Inula ensifolia* és a *Briza media* egyedei mindhárom évben, mindkét helyszínen virágoztak és termést hoztak. A *Sedum acre* egyedei mindhárom évben mindkét helyszínen virágoztak, termést nem hoztak, és a budapesti helyszínen a virágzás után mindhárom évben elpusztultak, így ezeket a egyedeket az első és a második év végén, 2020 decemberében és 2021 októberében pótoltam.



29. ábra: A bimbózás kezdete az év napjaiban kifejezve (2020-2022). A *a* és *b* betű jelzi, hogy az átlagos értékek különbsége fajonként helyszínenként 5%-os szignifikancia szint mellett szignifikáns-e. Az *n* betű jelzi a mintavételek számát.

A **bimbók megjelenését** tekintve, a vizsgált hat fajból négy esetben korábban következett be a magasabb átlaghőmérsékletű budapesti helyszínen (29. és 33. ábra). Az *Ajuga reptans* és az *Inula ensifolia* esetében a gödöllői helyszínen történt korábban. A különbség csak két faj, a *Briza media* és a *Globularia cordifolia* esetében volt szignifikáns, mindkét fajnál a budapesti helyszínen történt korábban a bimbók megjelenése. A bimbók megjelenésének ideje az év napjaiban kifejezve a budapesti helyszínen 134,27 volt, míg a gödöllői helyszínen 136,1. A különbség 1,83 nap, mely alapján a bimbók megjelenésének fenológiai érzékenysége **-1,01 nap/°C**.



30. ábra: A virágzás kezdete az év napjaiban kifejezve (2020-2022). A *a* és *b* betű jelzi, hogy az átlagos értékek különbsége fajonként helyszínenként 5%-os szignifikancia szint mellett szignifikáns-e. Az *n* betű jelzi a mintavételek számát.

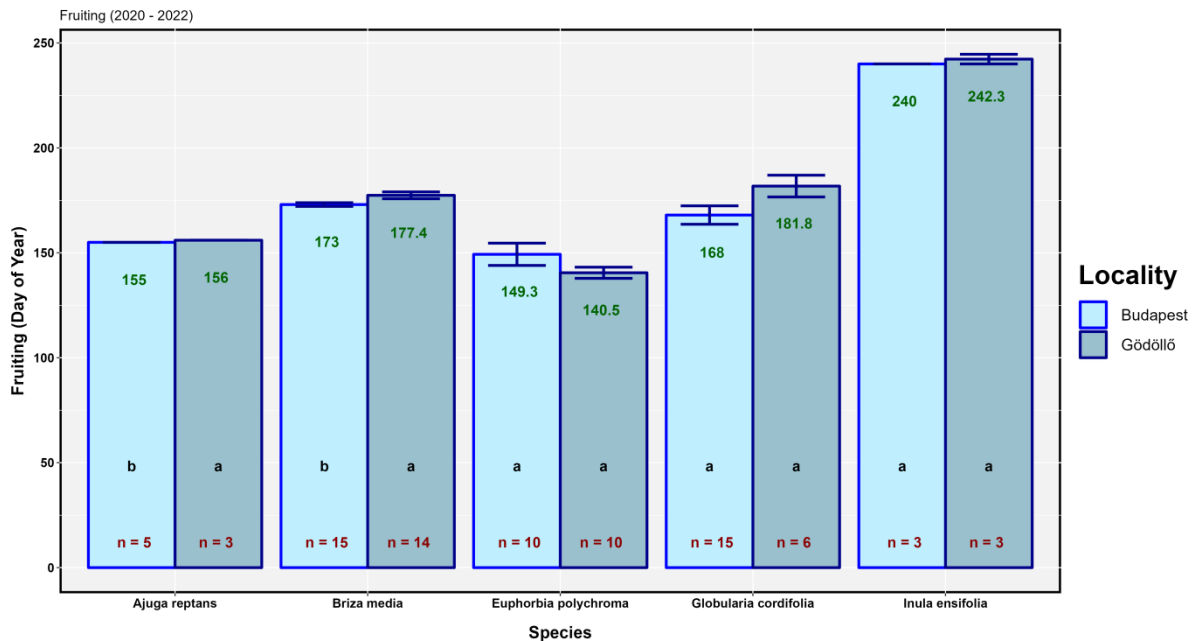
A **virágzás kezdete** a vizsgált hat fajtól csak három (*Briza media*, *Euphorbia epithymoides* és *Globularia cordifolia*) esetében következett be korábban Budapesten, ellenben az *Ajuga reptans*, az *Inula ensifolia* és a *Sedum acre* esetében a gödöllői helyszínen kezdődött korábban a virágzás (30. és 33. ábra). Az *Ajuga reptans* és az *Inula ensifolia* esetében a bimbók is a gödöllői helyszínen jelentek meg korábban. A különbség az *Euphorbia epithymoides* és a *Globularia cordifolia* esetében szignifikáns, mindkét faj esetében a budapesti helyszínen kezdődött korábban a virágzás.

A virágzás kezdetének ideje az év napjaiban kifejezve a budapesti helyszínen 144,95, míg a gödöllői helyszínen 145,8 volt. A különbség 0,85 nap, mely alapján a virágzás kezdetének fenológiai érzékenysége **-0,47 nap/°C**.

A bimbók és virágok megjelenése a magasabb átlaghőmérsékletű budapesti helyszínen korábban történt, mint az alacsonyabb átlaghőmérsékletű gödöllői helyszínen, mely megegyezik az általánosan tapasztalható trendekkel (Menzel & Fabian 1999, Menzel 2000, Sparks et al. 2000, Fitter & Fitter 2002, Parmesan & Yohe 2003, Menzel et al. 2006, Elzinga et al. 2007, Bertin 2008, Szabó et al. 2016, Renner & Zohner 2018). Egy müncheni botanikus kertben végzett hosszú távú fenológiai megfigyelés eredményei szerint az ott található lágyszárú fajok tavaszi hőmérsékletre adott fenológiai érzékenysége 2,6-4,6 nap/1°C (Renner et al. 2021), mely értékeknél a bimbók és virágok megjelenésével kapcsolatban lényegesen alacsonyabb értékeket kaptam (-1,01 nap/°C és -0,47 nap/°C).

Molau és mtsai (2005) a virágzás megjelenésének időpontja szempontjából vizsgálták a Raunkiaer-féle életformákat, és a fenológiai válaszok szempontjából szignifikáns különbséget mutattak ki köztük. Életformákon belül a legnagyobb szórást (SD) a Terofitonok mutatták, legkisebbet, szinte elhanyagolható, a hemicriptophyták. Esetemben nem így történt, mivel a virágzás megjelenésének legkorábbi és legkésőbbi időpontja közti különbség a Terofitonoknál 66 nap, míg a hemicriptophytáknál 91 nap volt. Amennyiben azonban a fajokon belüli szórást hasonlítom össze a két életforma esetén, a Terofitonoknál valóban lényegesebb nagyobb szórást tapasztalhatunk, mint a hemicriptophytáknál (18. és 24. ábra).

Horbach és mtsai (2023) kimutatták, hogy a lágyszárú fajok fenológiájában (minden fenofázis esetén külön-külön is) tapasztalható szórás jóval nagyobb, mint a fásszárúakénál tapasztalható szórás. A kísérletben található fásszárúak közül a virágzást legkorábban és legkésőbb megkezdő fajok közötti időbeli különbség 65,16 nap volt, míg a hemikryptophyták szenescenciájára vonatkozóan ez az érték 91 nap volt.

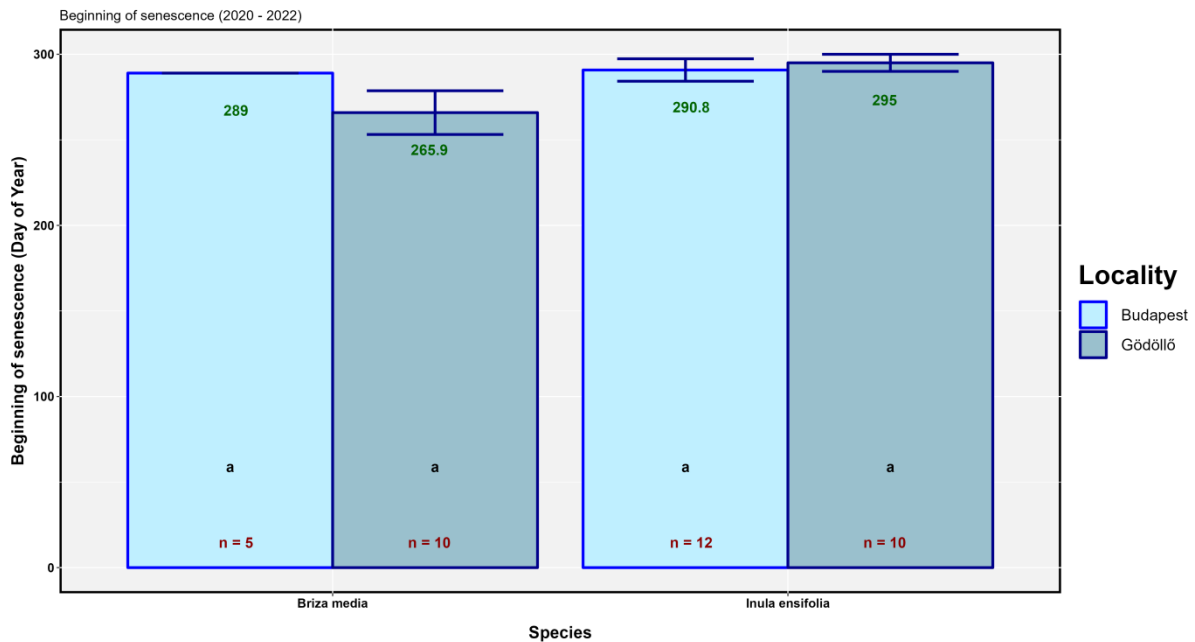


31. ábra: A termések megjelenése az év napjaiban kifejezve (2020-2022). A *a* és *b* betű jelzi, hogy az átlagos értékek különbsége fajonként helyszínenként 5%-os szignifikancia szint mellett szignifikáns-e. Az *n* betű jelzi a mintavételek számát.

A **termések megjelenése** öt faj esetében a budapesti helyszínen következett be időben korábban, ezzel szemben az *Euphorbia epithymoides* esetén a gödöllői helyszínen (31. és 33. ábra). Mivel ez utóbbi faj esetében a termések a virágzás elmúltával azonnal láthatóak a növényen, ebben az esetben – tekintve, hogy a faj virágzása a budapesti helyszínen korábban kezdődött -, ez azt jelenti, hogy a faj virágzása a magasabb átlaghőmérsékletű budapesti helyszínen hosszabb volt mint a gödöllői helyszínen. A hat fajt együtt vizsgálva a termések megjelenése az év napjaiban kifejezve a budapesti helyszínen 177,06 volt, míg a gödöllői helyszínen 179,6. A különbség 2,54 nap volt, ami alapján a termések megjelenésének fenológiai érzékenysége **-1,4 nap/°C**.

A **levélszíneződés kezdete** csak az *Euphorbia epithymoides* esetén volt értelmezhető, itt ez az esemény az év napjaiban kifejezve a budapesti helyszínen 230,3, míg a gödöllői helyszínen 228,3 volt. A fenológiai esemény bár a gödöllői helyszínen következett be korábban, a különbség nem volt szignifikáns. A **teljes levélhullás** állapotát a faj a budapesti helyszínen a 330,9. napon érte el, míg a gödöllői helyszínen a 327. napon. A trend megegyezik a lombszínéződés kezdeténél tapasztalhatóval. A fenológiai érzékenység a lombszínéződés kezdeténél **1,1 nap/°C**, míg a teljes lombhullás esetén **2,16 nap/°C**.

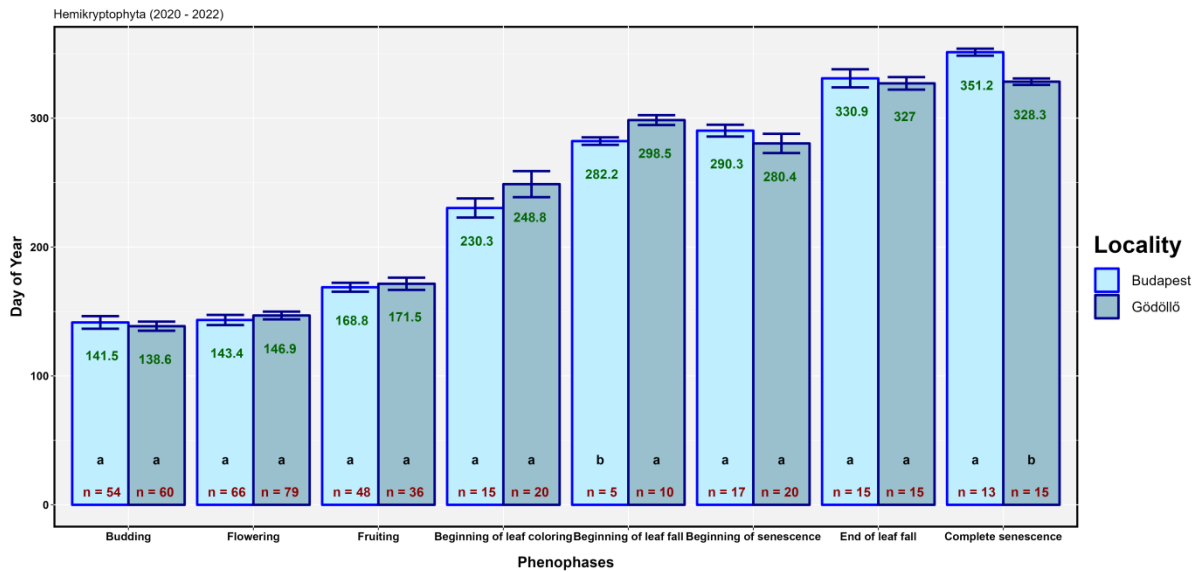
Az eredmények összhangban állnak a korábbi kutatások eredményeivel, melyek megállapították, hogy a korunkban tapasztalható klímaváltozás későbbre tolja az őszi fenofázisokat, a levélszíneződést és lombhullást (pl. Parmesan & Yohe 2003, Kunken et al. 2004, Menzel et al. 2006, Piao et al. 2006, Bertin 2008, Jeong et al. 2011, Gill et al. 2015).



32. ábra: Az őszi szeneszscencia kezdetének ideje az év napjaiban kifejezve (2020-2022). A *a* és *b* betű jelzi, hogy az átlagos értékek különbsége fajonként helyszínenként 5%-os szignifikancia szint mellett szignifikáns-e. Az *n* betű jelzi a mintavételek számát.

Az **őszi szeneszscencia kezdete** két faj, a *Briza media* és az *Inula ensifolia* esetén volt értelmezhető. A *Briza media* esetén ez a fenológiai esemény a gödöllői helyszínen következett be korábban, míg az *Inula ensifolia* esetén a budapesti helyszínen (32. és 33. ábra). A különbség egyik faj esetében sem szignifikáns. Érdekes, hogy az *Inula ensifolia* virágzása is a gödöllői helyszínen kezdődött korábban, 7,3 nappal előbb, mint a budapesti helyszínen. A *Briza media* esetén pedig a virágzás - a várakozásoknak megfelelően - a magasabb átlaghőmérsékletű budapesti helyszínen kezdődött korábban. A két faj szeneszscenciája a budapesti helyszínen átlagosan a 289.9. napon kezdődött, míg a gödöllői helyszínen a 280. napon. A különbség 9,45 nap, mely alapján a két faj esetén a szeneszscencia kezdetének fenológiai érzékenysége 5,22 nap/°C. Mivel a *Briza media* egyedei csak részben színeződtek el, a levelek nagy része zölden áttelelt, a **teljes szeneszscencia**, tehát a levelek teljes elszíneződése majd elszáradása (pusztulása) csak az *Inula ensifolia* esetében értelmezhető, ahol az esemény az alacsonyabb átlaghőmérsékletű gödöllői helyszínen következett be korábban. A gödöllői helyszínen az év napjaiban kifejezve a 328,3. napon, míg a budapesti helyszínen a 351,2. napon. A különbség (22,9 nap) szignifikáns.

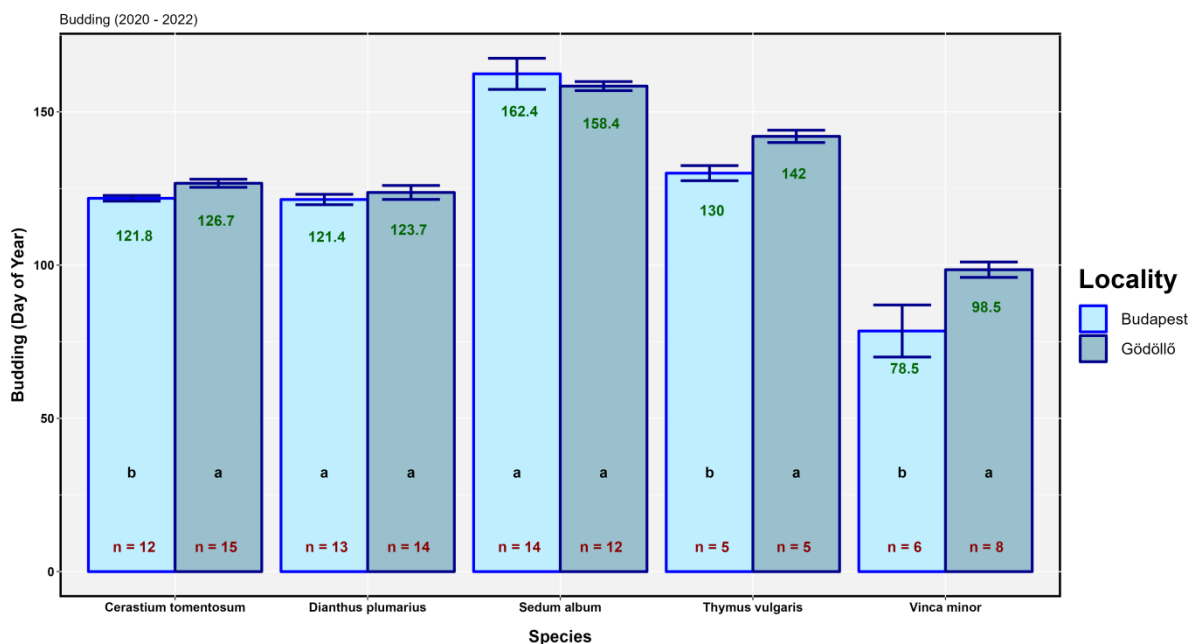
Horbach és mtsai (2023) kimutatták, hogy a lágyszárúak szeneszscenciája egyes fajok esetén már május közepén megkezdődik, a legtöbb faj a szeneszscencia maximumát augusztus közepén éri el. Ezzel szemben vannak örökzöld lágyszárú fajok is (pl. a kísérletben is szereplő *Vinca minor*), mely még október közepén sem mutatja a szeneszscencia jeleit (Horbach et al. 2023). A kísérletben az *Euphyorbia epithymoides* szeneszscenciaájának kezdete augusztusra esett, a *Briza media* és az *Inula ensifolia* esetében szeptember végére, októberre.



33. ábra: A Hemikriptofitonok fenofázisainak bekövetkezte az év napjaiban kifejezve (2020-2022). A *a* és *b* betű jelzi, hogy az átlagos értékek különbsége fajonként helyszínenként 5%-os szignifikancia szint mellett szignifikáns-e. Az *n* betű jelzi a mintavételek számát.

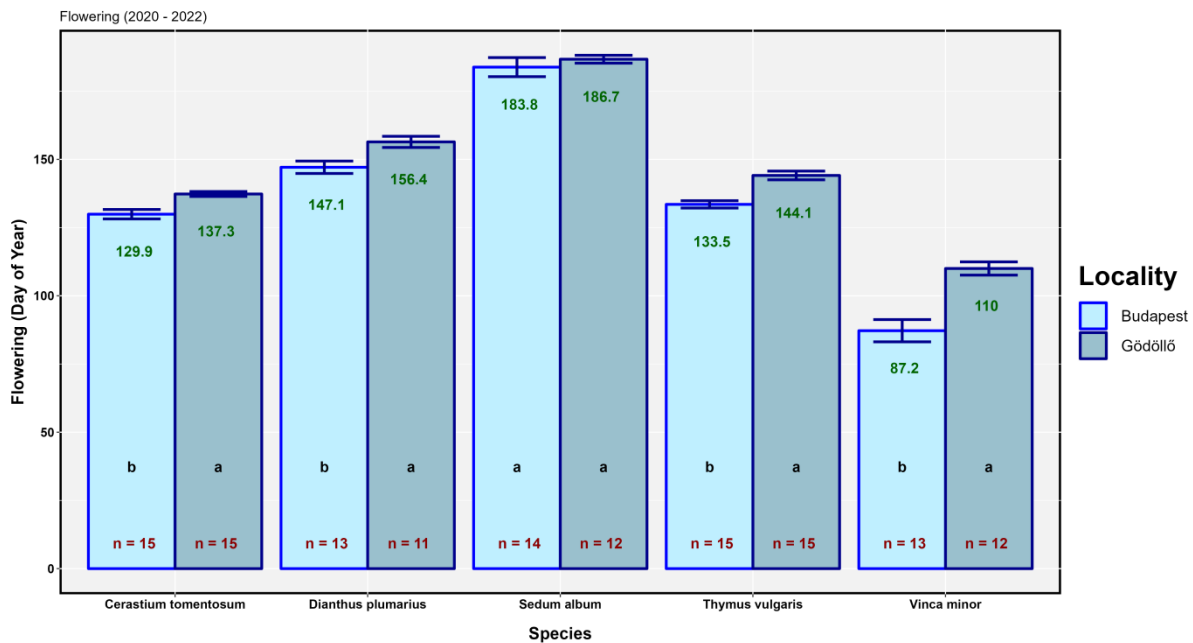
#### 4.1.6 Chamefitonok

A vizsgált öt faj mindhárom évben mindkét helyszínen virágzott. Mindkét helyszínen a kísérlet teljes időtartama alatt életben maradt négy faj (*Sedum album*, *Vinca minor*, *Thymus vulgaris*, *Cerastium tomentosum*) összes egyede. A *Dianthus plumarius* gödöllői egyedei közül a harmadik, befejező év vegetációs időszakának végére csak egy maradt életben.



34. ábra: A bimbózás kezdetének ideje az év napjaiban kifejezve (2020-2022). A *a* és *b* betű jelzi, hogy az átlagos értékek különbsége fajonként helyszínenként 5%-os szignifikancia szint mellett szignifikáns-e. Az *n* betű jelzi a mintavételek számát.

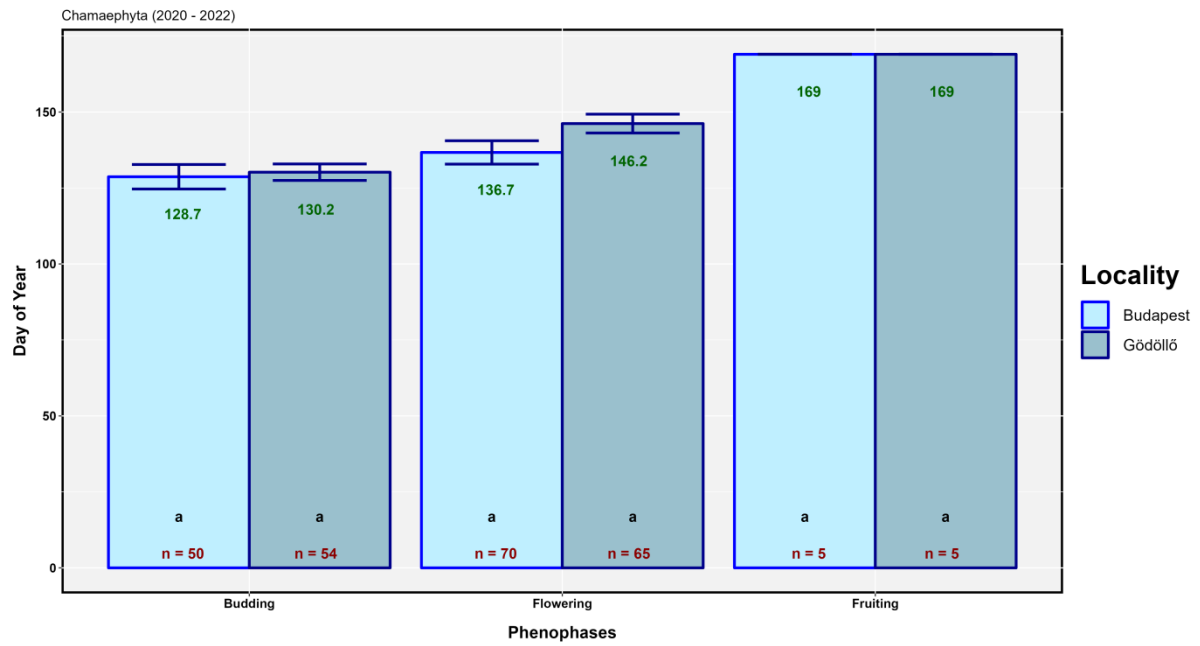
Az öt vizsgált faj közül négy esetén a **bimbózás** a budapesti helyszínen korábban következett be, míg a *Sedum album* esetén ez fordítva történt (34. és 36. ábra). A különbség három faj (*Serastium tomentosum*, *Thymus vulgaris*, *Vinca minor*) esetében volt szignifikáns, mind a három faj esetében a budapesti helyszínen történt korábban a bimbók megjelenése. A bimbók megjelenésének ideje az év napjaiban kifejezve a budapesti helyszínen 122,82 volt, míg a gödöllői helyszínen 129,86. A különbség 7,04 nap, mely alapján a bimbók megjelenésének fenológiai érzékenysége **-3,89 nap/°C**.



35. ábra: A virágzás kezdetének ideje az év napjaiban kifejezve (2020-2022). A *a* és *b* betű jelzi, hogy az átlagos értékek különbsége fajonként helyszínenként 5%-os szignifikancia szint mellett szignifikáns-e. Az *n* betű jelzi a mintavételek számát.

A **virágzás kezdete** mind az öt vizsgált esetén a bimbózás a budapesti helyszínen következett be korábban (35. és 36. ábra). A különbség négy faj (*Serastium tomentosum*, *Dianthus plumarius*, *Thymus vulgaris*, *Vinca minor*) esetében volt szignifikáns. Érdekes megjegyezni, hogy a virágzás kezdetében tapasztalható különbség a *Sedum album* esetében nem volt szignifikáns, ez a faj volt az életformán belül az egyetlen, amelynél a bimbók megjelenése az alacsonyabb átlaghőmérsékletű gödöllői helyszínen következett be előbb. A virágzás kezdetének ideje az év napjaiban kifejezve a budapesti helyszínen 136,3 volt, míg a gödöllői helyszínen 146,9. A különbség 10,6 nap, mely alapján a virágzás kezdetének fenológiai érzékenysége **-5,86 nap/°C**.

Egy müncheni botanikus kertben végzett hosszú távú fenológiai megfigyelés eredményei szerint az ott található lágyszárú fajok tavaszi hőmérsékletre adott fenológiai érzékenysége 2,6-4,6 nap/1°C (Renner et al. 2021). Bár a nevezett kutatás a tavaszi fenofázisokat nem vizsgálta külön, a virágzás esetén a szerzők által meghatározott fenológiai érzékenységnél jóval magasabb értéket állapítottam meg. A bimbók megjelenésére vonatkozó eredményem (-3,89 nap/°C) összhangban áll a Renner és mtsai (2021) által publikált eredményekkel.



36. ábra: A Chamefitonok fenofázisainak bekövetkezte az év napjaiban kifejezve (2020-2022). A *a* és *b* betű jelzi, hogy az átlagos értékek különbsége fajonként helyszínenként 5%-os szignifikancia szint mellett szignifikáns-e. Az *n* betű jelzi a mintavételek számát.



## 4.2 Életformák összehasonlítása

Az előző fejezetben (4.1) áttekintettem a hat életformához tartozó fajok fenológiájának életformánkénti változásait. A következőkben az egyes életformák fenológiájának egymáshoz képesti alakulásait vizsgálom meg.

13. táblázat: Az életformák különböző fenofázisainak fenológiai érzékenysége (nap/°C) A negatív érték korábbra tolódást, a pozitív érték későbbre tolódást jelez.

Fenológiai érzékenység	Ph	Ge	Th	HT	He	Ch	Átlag
Rügyfakadás	-3,87 nap/°C						
Bimbók megjelenése			0,11 nap/°C	-7,96 nap/°C	-1,01 nap/°C	-3,89 nap/°C	<b>-3,19 nap/°C</b>
Virágzás kezdete	-6,24 nap/°C	-2,01 nap/°C	-5,38 nap/°C	-4,77 nap/°C	-0,47 nap/°C	-5,86 nap/°C	<b>-4,12 nap/°C</b>
Virágzás vége		-1,04 nap/°C					
Virágzás hossza		0.3 nap/°C					
Termések megjelenése	0,94 nap/°C		2,13 nap/°C	-4,12 nap/°C	-1,4 nap/°C		<b>-0,61 nap/°C</b>
Lomb-/Levél-színeződés kezdete	3,73 nap/°C				1,1 nap/°C**		
Szeneszencia kezdete			3,89 nap/°C	-33,2 nap/°C*	5,22 nap/°C***		
Teljes lomb-/levélhullás	3,96 nap/°C				2,16 nap/°C**		
Teljes szeneszencia			1,8 nap/°C	16,37 nap/°C*			<b>10,93 nap/°C<sup>x</sup></b>
Vegetációs időszak hossza	7,65 nap/°C						

\*Kizárólag a *Dipsacus laciniatus* faj adatai

\*\* Kizárólag az *Euphorbia epithymoides* faj adatai

\*\*\*A *Briza media* és *Inula ensifolia* fajok adatai

× A teljes lombhullás, levélhullás és teljes szeneszencia (két sor értékeinek) összesített átlagos érzékenysége

Rövidítések: Ph: fanerofitonok, Ge: geofitonok, Th: terofitonok, HT: hemiterofitonok, He: hemikriptofitonok, Ch: chamefitonok

A fanerofitonok és geofitonok esetében vizsgáltam néhány olyan fenofázist – rügyfakadás, virágzás vége, virágzás hossza, valamint a vegetációs időszak hossza – melyeket csak az említett életformáknál vizsgáltam, így azok nem hasonlíthatóak össze más életformák hasonló fenofázisaival.

Az összehasonlítható fenológiai eseményekről általánosságban elmondható, hogy a várakozásoknak megfelelően alakultak, összhangban voltak a korábbi kutatások eredményeivel (Chmielewski & Rötzer 2001, Fitter & Fitter 2002, Menzel et al. 2006, Wolkovich et al. 2012, 2014, Zhang et al. 2015, Gill et al. 2015, Gallinat et al. 2015, Zohner & Renner 2018, Piao et al.

2019). A bimbók megjelenése, a virágzás kezdete (első virág megjelenése) és a termések megjelenése a hat életformára nézve átlagosan a magasabb átlaghőmérsékletű budapesti helyszínen következett be korábban, míg a vegetációs időszak végét jelző teljes szenescencia állapota (különböző fajok és vagy életformák esetében: teljes lombhullás, teljes levélhullás és teljes szenescencia) az alacsonyabb átlaghőmérsékletű gödöllői helyszínen történt korábban (13. táblázat). Ezen fenofázisok néhány kivételtől eltekintve az összes életforma esetén azonos irányú – bár eltérő mértékű – eltolódást mutattak. A **virágzás kezdetét** tekintve a fásszárúak mutatták a jelentősebb előretolódást, mely alapján a fásszárúak virágzásának fenológiai érzékenysége **-6,24 nap/°C**. Csak a **lágyszárúakat** (geofitonok, terofitonok, hemiterofitonok, hemikriptofitonok és chamefitonok) tekintve a virágzás kezdetének fenológiai érzékenysége **-3,69 nap/°C**, mely összhangban van a korábbi kutatások eredményeivel (Chmielewski & Rötzer 2001, Fitter & Fitter 2002, Sparks & Menzel 2002, Menzel et al. 2006, Bertin 2008, Zohner & Renner 2018, Renner et al. 2021). Az **őszi szenescencia** adatainak rögzítésekor a fajok jellemzői szerint különböző fogalmakat használtam: lomb- vagy levélszíneződés kezdete, lomb- vagy levélhullás vége, és szenescencia kezdete és teljes szenescencia állapota olyan fajoknál, melyek levelei nem lehullottak, hanem elsárgultak, elszáradtak vagy visszahúzódtak. A hemikriptofitonoknál mindkét fogalompár előfordult. A szenescencia kezdetére a Hemiterofitonoknál adathiány miatt csak a *Dipsacus laciniatus* két vetéséből származó egyedek adatait tudtuk felhasználni. Ez a faj a várakozásokkal ellentétben a budapesti helyszínen átlagosan 42 nappal korábban kezdte a szenescencia jeleit mutatni, azonban a teljes szenescencia állapotát a gödöllői helyszínen érte el korábban. A vegetációs időszak végét jelző fenofázisok (teljes lombhullás, teljes levélhullás és teljes szenescencia állapota) összesített átlagos fenológiai érzékenysége **10,93 nap/°C**, tehát 1 °C hőmérséklet-emelkedés átlagosan ennyivel tolja későbbre a vegetációs időszak végét.

A különböző fenofázisok fenológiai érzékenysége a következőképpen alakult. A **bimbók megjelenésének** fenológiai érzékenysége a Hemiterofitonok esetében volt a legnagyobb (-7,96 nap/°C), míg a terofitonok esetében legkisebb (0,11 nap/°C). Utóbbiaknál ráadásul ellenkező irányú reakció volt megfigyelhető. Az életformák összesített átlagos fenológiai érzékenysége (-3,19 nap/°C) összhangban van a korábbi kutatások eredményeivel (Chmielewski & Rötzer 2001, Fitter & Fitter 2002, Sparks & Menzel 2002, Menzel et al. 2006, Bertin 2008, Zohner & Renner 2018, Renner et al. 2021). A **virágzás kezdetének** fenológiai érzékenysége a fásszárúaknál volt a legnagyobb (-6,24 nap/°C), a lágyszárúak közül pedig a chamefitonoké (-5,86 nap/°C) és a terofitonoké (-5,38 nap/°C), míg a legalacsonyabb érzékenységet a hemikriptofitonok mutatták (-0,47 nap/°C). Bár a terofitonok virágzásának fenológiai érzékenysége a harmadik legnagyobb a vizsgált életformák közül, a lágyszárúak közül pedig a második helyen áll, Fitter és Fitter (2002) megállapítása, miszerint az egyéves fajok virágzásának előretolódása jelentősebb, mint az évelőké, csak a hemikriptofitonokkal és a geofitonokkal való összehasonlításban állja meg a helyét. A legnagyobb fenológiai érzékenységet az évelő chamefitonok mutatták. Szintén Fitter és Fitter (2002) megállapításai szerint a **rovarmegporzású** növényfajok nagyobb előretolódást mutatnak, mint a szélmegporzású fajok. A kísérletemben szereplő összes faj rovarmegporzású faj volt, tehát ennek ez az összehasonlítás jelen kísérletre nem értelmezhető. A **termések megjelenésének** fenológiai érzékenysége igen eltérő képet mutatott. A fanerofitonok (0,94 nap/°C) és a terofitonok (2,13 nap/°C) esetén a hőmérséklet-emelkedés pozitív összefüggést mutatott a termések megjelenésének időpontjával, míg a hemiterofitonok (-4,12 nap/°C) és a hemikriptofitonok (-1,4 nap/°C) esetében az összefüggés negatív. Az életformák átlagos fenológiai érzékenysége a fenofázis esetében így viszonylag alacsony negatív összefüggést mutat (-0,61 nap/°C). A vizsgált fenofázisok közül a termések megjelenésének fenológiai érzékenysége a legalacsonyabb.

A legerősebb fenológiai érzékenységet a **vegetációs időszak végét** jelző fenofázisok esetében figyeltem meg, melyek összesített átlagos fenológiai érzékenysége 10,93 nap/°C volt. A virágzás

kezdetének átlagos fenológiai érzékenységéhez (-4,12 nap/°C) képest ez lényegesen nagyobb érték. A jelenség ellentétben áll a korábbi kutatások eredményeinek, melyek szerint az őszi hőmérséklet-változásának hatása a tavaszéhoz képest gyengébb (Menzel et al. 2006). A teljes szeneszcenia bekövetkeztének életformánkénti alakulása mutatta a legváltozatosabb képet. Míg a Terofitonok esetében ez az érték 1,8 nap/°C volt, a Hemiterofitonok esetében 16,37 nap/°C. Meg kell azonban jegyezni, hogy a fenofázis esetében a Hemiterofitonok adatait a *Dipsacus laciniatus* két vetéséből származó egyedek adatai jelentik. A **vegetációs időszak hosszának** fenológiai érzékenysége (7,65 nap/°C) a fásszárúak adataiból (rügyfakadás kezdete és lombhullás vége) származik, az érték összhangban áll a korábbi kutatások eredményeivel (Menzel & Fabian 1999, Menzel 2000, Chmielewski és Rötzer 2001).

Neil és Wu (2006) városi környezet fenológiára gyakorolt hatásait célzó kutatásai szerint a hőmérséklet tűnik a növények fenológiájára legjobban ható tényezőnek. Ilyen szempontból kísérletünkre is alkalmazhatóak a megállapításaik. Fitter és Fitter (2002) eredményeihez hasonlóan Neil és Wu (2006) is arra jutott, hogy a rovarmegporzású, a kora tavaszi virágzású, az egyéves, a rövid-életű és a lágyszárú fajok fenológiájára erősebben hat a városi környezet. Ezen eredményeket kísérletem csak részben igazolta (lásd fentebb).

Összességében elmondható, hogy a klímaváltozásra a különböző fajok (Root et al. 2003; König et al. 2018) és funkciós csoportok eltérően reagálnak (Lavorel & Garnier 2002, Ibañez et al. 2020), mely kísérletemben is megmutatkozott.

## 5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

A fenológiai kutatások többsége nem követi nyomon a vizsgált egyedek **teljes éves fenológiai ciklusát** (Katal et al. 2022). A legtöbb kutatás egyes fenofázisokat céloz meg, legtöbbször a virágzás kezdetét, vagy legfeljebb a reproductív fenológiai eseményeit vizsgálja (pl. Menzel et al. 2006, Sherry et al. 2007) Ilyen szempontból jelen munka hiánypótló, hiszen három vegetációs időszakon át követtem hat életformához tartozó 33 faj szinte az összes mérhető fenofázisának alakulását. Tettem ezt két eltérő mezoklimatikus helyszínen, mely lehetővé tette az összehasonlításokat.

Általánosan elfogadott nézet, hogy a **városi éghajlati viszonyok** a változó globális éghajlati viszonyokhoz hasonlóan tekinthetők; ezért sok kutató az urbanizált területeket a globális klímaváltozás kis léptékű kísérleteiként vagy modelljeként tanulmányozza (Ziska et al. 2003). Ez lehetőséget ad a tér-idő helyettesítés („*space for time substitution*”) módszerének (Pickett 1989) alkalmazására, melyben előrejelezzük a klímaváltozás fenológiára gyakorolt esetleges jövőbeli hatásait (Rötzer et al. 2000, White et al. 2002, Christmann et al. 2023). Park és mtsai (2023) szerint az urbanizációra adott fenológiai válaszok feltárására szolgáló modellek, amelyek kizárólag a hőmérséklettel való kölcsönhatásra összpontosítanak, valószínűleg túlságosan leegyszerűsítettek. Ki kell emelni azonban, hogy a kutatások alapján a hőmérséklet tűnik a növények fenológiájára legjobban ható tényezőnek (Cleland et al. 2007, Peñuelas et al. 2009a, Chuine 2010, Szabó et al. 2016). Számos kutató (Zhang et al. 2004, Neil & Wu 2006, Jochner & Menzel 2015, Lahr et al. 2018, Christmann et al. 2023) szerint a városi környezet bár nem tökéletes modellkörnyezet, de több jellemzője – megemelkedett hőmérséklet és CO<sub>2</sub>-koncentráció, valamint egyre súlyosbodó szárazságok – miatt alkalmas a növények klímaváltozásra adott jövőbeli válaszainak kutatására. Esetemben mindkét helyszínen egy-egy város területén található, azonban míg a budapesti helyszínen egy sűrűn, többemeletes épületekkel beépített, forgalmas városi környezetben található, a gödöllői helyszínen az egyetem kampuszának gyéren beépített területén, négyhektáros botanikus kertben, természetes erdőfolt közvetlen szomszédságában, és a tájvédelmi körzethez tartozó erdő közelében található. Mivel mindkét helyszínen van közvilágítás, így a mesterséges fény jelenléte nem torzítja a hőmérséklet és egyéb tényezők hatását. A fentieket figyelembe véve a gödöllői és budapesti helyszínen közti fenológiai eltéréseket részben tekinthetjük a **jövőben várható fenológiai változásoknak**. A pontosabb előrejelzéshez természetesen számos további számításra és hasonló, minél hosszabb távú kísérletek elvégzésére is szükség van. A jövőben beállítandó kísérleteknél mindenképp fontos szempont, hogy az összehasonlíthatóság érdekében minden kísérleti helyszínen a nemzetközi sztenderdeknek megfelelő *ex situ* kísérlet legyen beállítva.

Ahhoz, hogy a jövőben hasonló kutatásokat lehessen végezni, javasolt a MATE Botanikus Kertjébe és az ELTE Fűvészkertjébe állandó jelleggel, a sztenderdeknek megfelelő, több meteorológiai paramétert monitorozó, megbízható, folyamatos adatszolgáltatást biztosító **meteorológiai állomásokat telepíteni**.

A kísérlet három éve alatt hasznos **tapasztalatokat** gyűjtöttem az ilyen jellegű kutatásokban felhasználható **életformák és fajok alkalmazhatóságával kapcsolatban**. A legtöbb fenofázist a fanerofitonok esetében sikerült rögzíteni. A fásszárúak gondozása bizonyult a legegyszerűbbnek, nem vagy csak minimális gyomlálást igényeltek, az öntözésen kívül szinte semmilyen gondozást nem igényeltek. Hosszú élettartamuk miatt alkalmasak hosszú távú kísérletekben való részvételre, a sarjképző fajok alkalmazásával lehetséges több helyszínen genetikailag azonos

egyedek vizsgálata. Mivel a legtöbb fenológiai kutatás fásszárúakkal kapcsolatban történt, a fásszárúakkal végzett kísérletek adatai jól összehasonlíthatóak. Több évtizedes tapasztalatok alapján jól kiforrott nemzetközi protokollok (pl. IPG kertek) léteznek, melyek még jobban megkönnyítik az összehasonlíthatóságot. A fásszárúak fenológiai kísérletekben való alkalmazásának egyetlen hátránya, hogy a csemete korban kihelyezett egyedek az első egy-két évben nem vagy csak nagyon kevés virágot hoznak, a vegetatív fenofázisok azonban már ekkor is kiválóan megfigyelhetőek. Összességében elmondható, hogy a befektetett energia és megtérülés arányában a fanerofitonok alkalmazása bizonyul a legjobb döntésnek. A geofitonok a második legjobban kutatott életforma, fajaik évelők, a kísérletben is számos fenofázisukat sikerült rögzíteni, azonban gondozásuk több figyelmet igényel mint a fásszárúak esetében. A rendszeres öntözésen kívül gyomlálást igényeltek, ennek ellenére több faj több egyede elpusztult, az életben maradt egyedek pedig a közvetlen napfényt nem viselték jól. Az egyedek pusztulása és kondíciójuk romlása az *Eranthis hyemalis* és a *Galanthus nivalis* esetében már az adatgyűjtést és összehasonlíthatóságot is nagyban akadályozta illetve lehetetlenné tette. A hemikriptofitonok szintén öntözést és gyomlálást igényeltek, fajaik évelők, így többéves megfigyelésekre alkalmasak, a reproduktív fenofázisokon kívül a szeneszcencia is megfigyelhető volt esetükben. A *Sedum acre* egyedei egyik helyen sem érezték jól magukat, mindhárom évben mindkét helyszínen a virágzást követően elpusztultak, az *Ajuga reptans* egyedei közül pedig a budapesti helyszínen csak egy érte meg a harmadik év végét. Az életforma alkalmazását javaslom, főleg az *Euphyorbia epithymoides* és az *Inula ensifolia* fajokét, melyeknél a szeneszcencia is jól megfigyelhető. A *Briza media* is mindkét helyszínen jól érezte magát és mindhárom évben virágzott és magot hozott, azonban az őszi szeneszcencia jeleit csak részben mutatta (részleges levélszíneződés). Ezen kívül a harmadik évre láthatóan kinőtte a cserepeket, a szabadba való kiültetése után rohamosan fejlődni kezdett, tehát ha még egy évig tartott volna a kísérlet, nem biztos, hogy virágzott volna, vagy ha igen, nem biztos, hogy a helyszínek és/vagy évek közti különbséget a meteorológiai paraméterek okozták volna. A chamefitonok szintén öntözést és gyomlálást igényeltek, fajaik évelők, így többéves megfigyelésekre alkalmasak. Azt leszámítva, hogy a *Dianthus plumarius* egyedeiből mindkét helyszínen pusztultak az évek során, Gödöllőn csak egyetlen egyed érte meg a kísérlet végét, az életforma fajai jól teljesítettek, mindhárom évben mindkét helyszínen virágoztak, és a *Dianthus plumarius* kívüli többi faj láthatóan jól érezte magát, terjedt, stb. Az életforma hátránya, hogy a fajok csak a virágzás megfigyelésére voltak alkalmasak. A magról vethető egy- és kétéves fajok kísérletben való alkalmazása az öntözésen és gyomláláson kívül értelemszerűen az évenkénti magfogást és vetést igényelte. Így az évelő fajokkal szemben az energia- és időráfordításon kívül még egy hátrány jelentkezik; a szigorúan vett genetikai azonosság nem tud érvényesülni. Ezen kívül a kétéves fajok nagy valószínűséggel az első évben nem hoznak virágot. A kísérletben azt tapasztaltam, hogy bár elvileg az összes vegetatív és reproduktív fenofázis megfigyelhető rajtuk, a valóságban nagyon sok egyed elpusztult, az életben maradt egyedek is a természetben előfordulóakhoz képest sokkal kisebbek, satnyábbak voltak. A fenti okok miatt magról vethető fajok fenológiai *ex situ* kísérletben való alkalmazását nem javaslom. A ráfordítás-megtérülés arány alapján a leginkább javasolt a fanerofitonok alkalmazása, ezt követi a hemithyerphyták és geofitonok alkalmazása, a chamefitonok alkalmazása, végül a terofitonok és hemiterofitonok következnek.

A Kárpát-medence különösen érzékeny a klímaváltozás hatásaira (Pongrácz et al. 2009, Gálos et al. 2011, Hlásny et al. 2014, Antofie et al. 2015.), így különösen fontos fenológiai kutatásokat végezni a térségben. A fenológiai vizsgálatok mára előkelő helyet foglal el a globális klímaváltozás kutatásában, köszönhetően annak, hogy az így nyert eredményekkel lehetséges előrejelezni a ciklikus jelenségek bekövetkeztének idejét (Morellato et al. 2016). Ezen eredmények felhasználása a **természetvédelem tervezésében** azonban sajnos még gyerekcipőben jár (Morellato et al. 2016). A fentiek alapján javaslom az ország minél több pontján hosszú távú fenológiai megfigyelésre szolgáló *ex situ* kísérlet beállítását, és az

eredmények felhasználását a természetvédelemben, például restaurációs ökológiai projektek tervezése vagy természetvédelmi kezelési tervek kidolgozása során.

Korunkban egyre nagyobb területeket foglalnak el a települések, és ezen belül is a városok, így a **városok „zöldítése”**, biodiverzitásuk növelése kulcsfontosságú. Mivel a városokban élő növényekre a klímaváltozás különösen erős hatása nehezedik, a városi ökoszisztémák és így az általuk biztosított ökoszisztéma szolgáltatások fenntartása érdekében különösen fontos a városi növények kímaváltozásra, és a városban tapasztalható klimatikus jelenségekre adott válaszainak a kutatása (Zhou et al. 2022). A városokba telepítendő növényfajok kiválasztásánál figyelembe kell venni a korábbra tolódó tavaszi fenofázisok esetén fennálló fagyveszélyt (Hänninen 1991, 2011, Inouye 2008, Lessard-Therrien et al. 2014, Vitasse et al. 2014, Polgar & Primack 2011, Chitu & Paltineanu 2020, Schermer et al. 2020, Wang et al. 2022), a vernalizáció felmelegedés hatására történő esetleges elmaradását (Menzel et al. 2006), az alacsonyabb páratartalmat (Öztürk et al. 2015), valamint a légszennyezést (Grange et al. 2017, Mitchell et al. 2018). A jövőben is megfelelő fajok kiválasztásához számos további kutatásra lenne szükség. A kísérletben eltöltött három vegetációs időszak alatt tapasztalható viselkedésük alapján a fásszárú veresgyűrű som, cserszömörce, cseplezsmeggy, fagyal és kökény, valamint a lágyszárú molyhos madárhúr, kerti kakukkfű, színváltó kutyatej, kis télizöld alkalmasnak tűnnek a városi telepítésre, azonban az öntözés ezen fajok esetében is elengedhetetlen. A kísérletben szereplő többi faj egyedei közül több elpusztult, vagy nagyon gyér fejlődést, illetve romló kondíciókat, korai szenescenciát, stb. mutatott.

Mind a városba telepítendő növényfajok kiválasztásánál, mind egy hasonló kísérlet beállításánál a jövőben érdemes törekedni arra, hogy a virágzás a teljes vegetációs időszakot lefedje, így a **beporzók** összes csoportja számára lehetőleg folyamatos táplálékforrást biztosítson. Általánosan elfogadott nézet, hogy a virágzás-fenológiában bekövetkezett változások megszakíthatják a növények és beporzók közti kapcsolatot (Cleland et al. 2007, Forrest & Miller-Rushing 2010), e téren azonban nincs egyetértés a kutatók között. Míg egyes kutatások szerint a fenológiai előretolódása (pl. Parmesan 2006, Forrest & Miller-Rushing 2010), mások szerint az eltolódás hiánya veszélyezteti (pl. Cleland et al. 2012) e kapcsolatok megmaradását. Ennek tükrében javaslom a fenológiai kutatások kiegészítését a fenológiai változások beporzókra gyakorolt hatásának (beporzók mennyisége, jelenlétük időtartama, fajdiverzitás) vizsgálatával.

Tekintve, hogy hazánk egyetlen egy a nemzetközi fenológiai hálózatokhoz (IPG, PhenObs, stb.) csatlakozott botanikus kerttel sem képviselteti magát, valamint az Országos Meteorológiai Szolgálat által működtetett fenológiai megfigyelő hálózat is több mint húsz évvel ezelőtt megszűnt, égető szükség lenne egy vagy több a nemzetközi sztenderdeknek megfelelő, tehát összehasonlításokra és hosszú távú fenológiai megfigyelésekre alkalmas állomás létrehozása. Mivel egy független, kizárólag erre a célra létrehozott hálózat működtetése igen költséges, valamint a nemzetközi hálózatok tagállomásai is botanikus kertekben működnek, javaslom a kísérletem helyszínéül szolgáló két egyetemi botanikus kert, a **MATE Botanikus Kert és az ELTE Fűvészkert IPG hálózathoz való csatlakozását**. Mivel a fásszárúakról áll a legszélesebb körű, leghosszabb időre visszanyúló adatsor a rendelkezésünkre, melyek az esetleges összehasonlítások alapját képezik, valamint a kísérletben is megmutatkozott, hogy a fásszárúak gondozása és hosszú távú életbentartása a legegyszerűbb és ezen életforma képviselői szolgáltatják a legtöbb, legjobban felhasználható adatot, első körben a fásszárúakkal foglalkozó IPG hálózathoz való csatlakozását javaslom. Azonban mivel a klímaváltozás egyre komolyabb mértékben fenyegeti az európai biodiverzitást, alapvető fontosságú a lágyszárú fajok klímaváltozásra adott válaszainak megismerése is, mely célból a vadon élő lágyszárúakkal foglalkozó PhenObs kerthálózatához történő csatlakozást javaslom.

Kiegészítésképpen javasolt a „közösségi tudomány” („*citizen science*”) elve alapján egy egyszerű **megfigyelőhálózat létrehozása iskolákban**. Ezen megfigyelési pontok egyszerre tudnának hozzájárulni az oktatáshoz, környezeti neveléshez, szemléletformáláshoz, valamint értékes fenológiai adatokat szolgáltatnának az ország különböző területeiről. Egy központilag kidolgozott protokoll alapján az iskolák megfigyelhetnének néhány könnyen gondozható, igénytelen, őshonos, évelő fajt (tapasztalataink alapján leginkább fásszárút, pl. kökényt, cserszömörécét, veresgyűrű somot), melyek rügyfakadását, virágzásának kezdetét és végét, lombszíneződésének kezdetét és végét rögzíthetnék, valamint egy egyszerű hőmérő segítségével naplózhatnák a hőmérsékletet. A felsorolt fenofázisok mindegyike várhatóan az iskolai tanítási időszakokra esik, a fajok könnyedén gondozhatóak és megfigyelhetőek az iskolaudvaron. Az eredmények alapján láthatóak lennének az ország különböző területein tapasztalható fenológiai különbségek (lásd. Walkovszky 1998), valamint az idő előrehaladtával az évek közt tapasztalható különbségek (lásd. Walkovszky 1998). Egy ilyen hálózat létrehozása annak tükrében, hogy több mint 20 éve nem létezik hazai fenológiai megfigyelőhálózat, különösen fontos lenne.

Ahhoz, hogy jobban megértsük a fenofázisokat befolyásoló tényezőket, és megbízhatóbban előre tudjuk jelezni a bekövetkezésüket, az átlaghőmérsékletre kiszámolt fenológiai érzékenység nem elég. Richardson és mtsai (2006) szerint a tavaszi fenofázisok idejét a **felmelegedés akkumulált mértéke** („*Heating Degree Days, HDD*”) határozza meg. A rügyfakadás, kizöldülés és virágzás idejének pontosabb előrejelzéséhez a jövőben célszerű lenne ezirányú számításokat végezni. Az őszi fenofázisokat illetően a **lehűlés akkumulált mértékét** („*Cooling Degree Days, CDD*”) érdemes figyelembe venni (Gill et al. 2015). Kutatások igazolják, hogy a tavaszi időszakban a fenológia érzékenyebben reagál a nappali időszakban bekövetkező hőmérséklet-emelkedésre, mint az éjszakaira, mind faj-, mind életközösség-szinten (Piao et al. 2015, Rossi & Isabel 2017). Figyelembe véve, hogy az elmúlt évtizedekben az éjszakai időszak melegedése gyorsabb volt, mint a nappalié (Davy et al. 2017) az aszimmetrikus melegedés fenológiai modellekből való hiányzása a tavaszi fenológia hőmérséklet-érzékenységének alulbecsléséhez vezethet (Piao et al. 2015). Az őszi fenofázisokat illetően lehetséges, hogy míg a magasabb éjszakai hőmérséklet későbbre tolja a lombszíneződés kezdetét, addig a magasabb nappali hőmérséklet a nagyobb arányú párologtatásból kifolyólag korábbra tolja azt (Wu et al. 2018, Chen et al. 2020). Eppich és mtsai (2009) az ELTE Fűvészkertben kb. negyven éven át gyűjtött, a bimbózás, virágzás és hervadás kezdetének időpontjait tartalmazó adatsor feldolgozásakor azt találták, hogy a nevezett fenofázisokra az átlagos napi hőingás, a hőösszeg és a fagyos napok száma volt a legerősebb hatással. A fentiekből kiindulva mind a tavaszi, mind az őszi fenofázisok alakulásának pontosabb megértéséhez célszerű lenne napi hőmérsékleti adatokkal (**napi hőingás, HDD, CDD, nappali és éjszakai hőmérsékletek alakulása**) is számításokat végezni. Mivel ezek igen bonyolult és időigényes műveletek, különösen, ha figyelembe vesszük a kísérlet adatbázisának óriási méretét (kb. 53000 soros Excel táblázat), be kellett látnom, hogy ezen számítások elvégzése jelen doktori munka kereteibe sajnos nem fér bele.

## 6. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. A kísérlet során három vegetációs időszak alatt két eltérő mezoklimatikus helyszínen a Raunkiær-féle életforma osztályozás hat különböző életformájához tartozó 33, döntően hazánkban honos fajt vizsgáltam fenológiai szempontból. Ehhez hasonló, több életformát egyszerre vizsgáló, nemzetközi sztenderdeknek megfelelő *ex situ* kísérlet **hazánkban ez idáig nem történt**.
2. A hat életforma esetében meghatároztam a lehető legtöbb rögzíthető fenofázis (rügyfakadás, bimbók megjelenése, virágzás kezdete, virágzás vége, termések megjelenése, szeneszcencia kezdete, teljes szeneszcencia) **fenológiai érzékenységét** (lásd 4.1 fejezet).
3. Meghatároztam a kísérletben szereplő hat életforma és azon belül 33 faj fenológiai eseményeinek **helyszínek és évek közti változásait**.
4. A fanerofitonok vizsgálatakor a vegetációs időszak kezdetét jelentő rügyfakadást és a **vegetációs időszak** végét jelentő teljes lombhullás állapotát is rögzítettem. Ezek alapján mindkét helyszínen, mindhárom évben meghatároztam a vegetációs időszak hosszát, a hőmérsékleti adatokkal való összevetésük alapján a vegetációs időszak fenológiai érzékenységét, valamint a vegetációs időszak kezdetének, végének és hosszának a helyszíneken az évek közt tapasztalható változásait.
5. A kísérletben szereplő hat életforma között *ex situ* fenológiai kísérletekben való **alkalmazhatóságuk**, és a ráfordítás-megtérülés arány alapján **sorrendet** állítottam fel, melyek megkönnyíthetik a jövőben hasonló kísérletek beállítását.
6. A kísérlet helyszínéül szolgáló két botanikus kertbe, a MATE Botanikus Kertbe és az ELTE Fűvészkertbe meteorológiai bázisállomást telepítettem. A két állomás segítségével két éven keresztül tízpercenkénti gyakorisággal gyűjtöttem meteorológiai adatokat, melyek a következők voltak: hőmérséklet, csapadék, relatív páratartalom, légnyomás, szélereősség, napsugárzás és szélereősség. Az adatok alapján megállapítottam a két botanikus kert átlaghőmérsékletét. A fenológiai kutatásokhoz elengedhetetlen a fenológiai adatok meteorológiai paraméterekkel való összevetése. A két botanikus kertben ez idáig nem történt hosszú távú, ilyen gyakoriságú, ennyi paraméterre kiterjedő **meteorológiai adatgyűjtés**.



## 7.1 ÖSSZEFOGLALÁS

Földünk átlaghőmérséklete emelkedik, mely hatással van a földi életközösségekre (Peñuelas et al. 2017). A bolygó átlaghőmérséklete az ipari forradalmakat megelőző időszakhoz képest mára kb. 1,1 °C-kal emelkedett meg, mely érinti Európa élővilágát is (Begum et al. 2022). Európában megfigyelhető bizonyos klímaérzékeny, őshonos, főleg vizes élőhelyekhez köthető faj kihalása. Kontinensünkön 2080-ra az edényes növényfajok több mint fele válhat veszélyeztetetté e hatások következtében (Thuiller et al. 2005). A fajok klímaváltozásra való reagálási képessége nagymértékben függ attól, hogy képesek-e „követni” az éghajlat változását az új területeken való megtelepedéssel, vagy hogy képesek-e megváltoztatni életmódjukat (például virágzási időszak), hogy alkalmazkodjanak eredeti élőhelyük megváltozott körülményeihez.

A fenológia – a ciklikus biológiai folyamatokat, azok kiváltó és befolyásoló (biotikus és abiotikus) tényezőit, valamint az azonos vagy különböző fajok fenofázisai közötti kölcsönhatásokat vizsgáló tudomány (Lieth 1974) – érzékeny a klímaváltozásra, így jó indikátora annak (Sparks & Menzel 2002, Cleland et al. 2007, Schwartz 2013, Peñuelas et al. 2017). A fenológiai vizsgálatok mára előkelő helyet foglalnak el a globális klímaváltozás kutatásában, köszönhetően annak, hogy az így nyert eredményekkel lehetséges előrejelezni a ciklikus jelenségek bekövetkezését idejét (Morellato et al. 2016). A fenológiai kutatások többsége azonban nem követi nyomon a vizsgált egyedek teljes éves fenológiai ciklusát (Katal et al. 2022).

A Kárpát-medence különösen érzékeny a klímaváltozás hatásaira (Pongrácz et al. 2009, Gálos et al. 2011, Hlásny et al. 2014, Antofie et al. 2015.), így különösen fontos fenológiai kutatásokat végezni a térségben. Ennek ellenére hazánkban nem sok fenológiai kutatás történt (Walkovszky 1998, Eppich et al. 2009, Hunkár et al. 2012, Szabó et al. 2016, Templ et al. 2017), és jelenleg semmilyen fenológiai adatgyűjtő hálózat nem működik. Magyarországon tudomásom szerint ez idáig nem készült a Raunkiær-féle életformaosztályozás szerinti különböző életformákhoz tartozó, vadon élő fajok teljes éves ciklusát több éven át figyelemmel kísérő összehasonlító *ex situ* fenológiai kutatás.

A fentiekből kiindulva három egymást követő évben, két eltérő mezoklimatikus területen (a MATE Botanikus Kertben és az ELTE Fűvészkertben), a Raunkiær-féle életformaosztályozás hat életformájához (mikrofanerofiton, chamefiton, hemikriptofiton, geofiton, Hemiterofiton, terofiton) tartozó életformánként öt-öt fajának helyszínenkénti öt-öt ismétlését vizsgáltam fenológiai szempontból. Az *ex situ* kísérlet beállítása során törekedtem a meteorológiai paraméterek hatását zavaró egyéb paraméterek minél hatékonyabb kizárására, így lehetőség szerint fajonként genetikailag azonos egyedeket használtam, melyeket azonos protokoll szerint helyeztem ki és gondoztam. A fenológiai eltérések klimatikus paraméterekkel való összevetetősége érdekében az első év végén a kísérlet helyszíneire meteorológiai állomásokat telepítettem és két éven át gyűjtöttem a következő meteorológiai adatokat: hőmérséklet, csapadék, relatív páratartalom, légnyomás, napsugárzás és szélereősség. A fenológiai adatgyűjtésre heti rendszerességgel került sor, mindkét helyszínen lehetőség szerint azonos napon. A rögzített fenológiai adatok a következők voltak: rügyfakadás, bimbók száma, virágok/virágzatok száma, termések száma, szenescencia százalékos értéke (lombszíneződés, száradás), lombhullás százalékos értéke, magasság, törzsátmérő. Tehát rögzítettem a vizsgált fajok fenológiájának alakulását fenofázisonként, helyszínenként. Az adatok rögzítése, tárolása és alapvető rendezése, előkészítése a Microsoft Excel 365 online verziójával készült, a statisztikai elemzések pedig az ingyenesen használható R statisztikai környezet 4.2.2 verziójának (R Core Team, 2022) segítségével az Rstudio szkriptszerkesztő programmal (RStudio Team 2015) készültek. A év napjainak sorszáma és a fenológiai esemény bekövetkezését helyszínenkénti

kapcsolatát egyutas varianciaanalízissel (ANOVA-val) állapítottuk meg, I-es típusú (szekvenciális) négyzetösszegek használatával, 0,05% – os szignifikanciaszint mellett (Zar 1984).

A vizsgált fenológiai eseményekről általánosságban elmondható, hogy a várakozásoknak megfelelően alakultak, összhangban voltak a korábbi kutatások eredményeivel (Chmielewski & Rötzer 2001, Fitter & Fitter 2002, Menzel et al. 2006, Wolkovich et al. 2012, 2014, Gallinat et al. 2015, Gill et al. 2015, Zhang et al. 2015, Zohner & Renner 2018, Piao et al. 2019). A bimbók megjelenése, a virágzás kezdete (első virág megjelenése) és a termések megjelenése a hat életformára nézve átlagosan a magasabb átlaghőmérsékletű budapesti helyszínen következett be korábban, míg a vegetációs időszak végét jelző teljes szeneszcencia állapota (különböző fajok és vagy életformák esetében: teljes lombhullás, teljes levélhullás és teljes szeneszcencia) az alacsonyabb átlaghőmérsékletű gödöllői helyszínen történt korábban.

Ezek alapján megállapítottam a vizsgált életformák fenofázisonkénti fenológiai érzékenységét. Az életformák virágzásának fenológiai érzékenysége a fanerofitonok esetében mért  $-6,24$  nap/ $^{\circ}\text{C}$  és a hemikriptofitonoknál megállapított  $-0,47$  nap/ $^{\circ}\text{C}$  között változott. Az összes életforma átlagos értéke  $-4,12$  nap/ $^{\circ}\text{C}$  volt, mely összhangban van a korábbi kutatások eredményeivel (Menzel et al. 2006). A vegetációs időszak hosszának fenológiai érzékenysége  $7,65$  nap/ $^{\circ}\text{C}$  volt, mely érték szintén összhangban áll a korábbi kutatások eredményeivel (Menzel & Fabian 1999, Menzel 2000, Chmielewski & Rötzer 2001). Az őszi fenofázisok, bár később következtek be a magasabb átlaghőmérsékletű budapesti helyszínen, az évek alatt összességében mégis mindkét helyszínen jelentős korábbra tolódást mutattak, mely a vegetációs időszak évek alatti rövidülését hozta magával. Ezzel együtt a rügyfakadás bár szintén a várakozásoknak megfelelően mindhárom évben a magasabb átlaghőmérsékletű helyszínen következett be korábban, az évek alatt meglepő módon mindkét helyszínen későbbre tolódott.

A kísérlet három éve alatt hasznos tapasztalatokat gyűjtöttem az ilyen jellegű kutatásokban felhasználható életformák és fajok alkalmazhatóságával kapcsolatban. A legtöbb fenofázist a fanerofitonok esetében sikerült rögzíteni és a fásszárúak gondozása bizonyult a legegyszerűbbnek. A ráfordítás-megtérülés arány alapján a leginkább javasolt a fanerofitonok alkalmazása, ezt követi a Hemiterofitonok és geofitonok alkalmazása, a chamefitonok alkalmazása, végül a Terofitonok és Hemiterofitonok következnek.

Végül javaslatot tettem a kísérletem helyszínéül szolgáló két egyetemi botanikus kert, a MATE Botanikus Kert és az ELTE Fűvészkert a Nemzetközi Fenológiai Kertek (IPG) hálózatához való csatlakozására, valamint állandó meteorológiai állomásoknak a nevezett kertekbe történő telepítésére.

## 7.2 SUMMARY

The average temperature of our earth is rising, which has an impact on terrestrial life communities (Peñuelas et al. 2017). Compared to the period before the industrial revolutions, the average temperature of the planet has risen approx. 1.1 °C by now, which also affects the wildlife of Europe (Begum et al. 2022). In Europe, the extinction of certain climate-sensitive indigenous species, mainly linked to wetlands, can be observed. By 2080, more than half of the vascular plant species on our continent may become endangered as a result of these effects (Thuiller et al. 2005). The ability of species to respond to climate change depends to a large extent on their ability to "follow" climate change by settling in new areas, or on their ability to change their lifestyle (e.g. flowering period) to adapt to changed conditions in their original habitat.

Phenology - the science that examines cyclic biological processes, their triggering and influencing (biotic and abiotic) factors, as well as the interactions between the phenophases of the same or different species (Lieth 1974) - is sensitive to climate change, so it is a good indicator of it (Sparks & Menzel 2002, Cleland et al. 2007, Schwartz 2013, Peñuelas et al. 2017). Phenological studies now occupy a prominent place in global climate change research, thanks to the fact that with the results obtained in this way it is possible to predict the time of occurrence of cyclical phenomena (Morellato et al. 2016). However, the majority of phenological research does not follow the entire annual phenological cycle of the studied individuals (Katal et al. 2022).

The Carpathian Basin is particularly sensitive to the effects of climate change (Pongrácz et al. 2009, Gálos et al. 2011, Hlásny et al. 2014, Antofie et al. 2015), so it is particularly important to conduct phenological research in this area. Despite this, not much phenological research has been done in Hungary (Walkovszky 1998, Eppich et al. 2009, Hunkár et al. 2012, Szabó et al. 2016, Templ et al. 2017), and no phenological data collection network is operating currently. To the best of my knowledge, comparative *ex situ* phenological research monitoring the entire annual cycle of wild species belonging to different life forms according to Raunkiaer's life form classification over several years has not been carried out in Hungary yet.

Starting off considerations above, I have examined 5 repetitions of 5 species from a phenological point of view, per location for each of the six life forms of Raunkiaer's life form classification (microphanerophytes, chamaephytes, hemicryptophytes, geophytes, hemitherophytes and therophytes) in two different mesoclimate areas (in the MATE Botanic Garden and the ELTE Botanical Garden), in three consecutive years. During setting up the *ex situ* experiment, I tried to exclude other parameters interfering with the effect of meteorological parameters as effectively as possible, so I used genetically identical individuals for each species, whenever it was possible, which were placed and cared according to the same protocol. In order to compare phenological differences with climatic parameters, I installed meteorological stations at the experiment sites at the end of the first year, and collected the following meteorological data for two years: temperature, precipitation, relative humidity, air pressure, solar radiation and wind strength. Phenological data collection took place on a weekly basis on the same day at both locations, if possible. The recorded phenological data were the following: bud break, number of buds, number of flowers/inflorescences, number of fruits, percentage value of senescence (leaf coloration, drying), percentage value of defoliation, height, trunk diameter. So I recorded the evolution of the phenology of the examined species per phenophase and location. The recording, storage and basic arrangement and preparation of the data were made using the online version of Microsoft Excel 365, and the statistical analyzes were made using the R studio script editing

program (RStudio Team 2015) using version 4.2.2 of the freely available R statistical environment (R Core Team, 2022). The relationship between the number of days of the year and the occurrence of the phenological event per site was determined by one-way analysis of variance (ANOVA), using type I (sequential) sums of squares, at a significance level of 0.05% (Zar 1984).

In general, it can be said that the examined phenological events developed as expected and were consistent with the results of previous research (Chmielewski & Rötzer 2001, Fitter & Fitter 2002, Menzel et al. 2006, Wolkovich et al. 2012, 2014, Gallinat et al. 2015, Gill et al. 2015, Zhang et al. 2015, Zohner & Renner 2018, Piao et al. 2019). The appearance of buds, the beginning of flowering (appearance of the first flower) and the appearance of fruits for the six life forms occurred earlier on average at the location in Budapest with a higher average temperature, while the state of complete senescence, which marks the end of the vegetation period (in case of different species and/or life forms: complete defoliation, complete leaf fall and complete senescence) occurred earlier at the Gödöllő location with a lower average temperature.

Based on these, I established the phenological sensitivity of the examined life forms per phenophase. The phenological sensitivity of the flowering of life forms varied between -6.24 days/°C, which was measured at phanerophytes and -0.47 days/°C, which was measured at hemicryptophytes. The average value of all life forms was -4.12 days/°C, which is consistent with the results of previous research (Menzel et al. 2006). The phenological sensitivity of the length of the vegetation period was 7.65 days/°C, which value is also consistent with the results of previous research (Menzel & Fabian 1999, Menzel 2000, Chmielewski & Rötzer 2001). The autumn phenophases showed a significant earlier shift over the years at both locations, although they occurred later at the Budapest location with a higher average temperature, which resulted in the shortening of the vegetation period over the years. At the same time, although the bud break occurred earlier at the site having higher average temperature in all three years, it was delayed year by year at both sites surprisingly.

I have gathered useful experiences regarding the applicability of life forms and species that can be used in this kind of research, during the three years of the experiment. Most phenophases were recorded in the case of phanerophytes, and caring for woody plants proved to be the easiest. Based on the investment-return ratio, usage of phanerophytes is most recommended, followed by usage of hemithyerphytes and geophytes, then chamaephytes, and finally therophytes and hemitherophytes.

Finally, I have proposed connection of the two university botanical gardens serving as the sites of my experiment, the MATE Botanical Garden and the ELTE Botanical Garden, to the International Phenological Gardens (IPG) network, as well as the installation of meteorological stations in the mentioned gardens.

## 8. IRODALOMJEGYZÉK

1. 23/2018. (X. 31.) OGY határozat a 2018-2030 közötti időszakra vonatkozó, 2050-ig tartó időszakra kitekintést nyújtó második Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégiáról
2. 62/2022. (XII. 9.) OGY határozat a 2026-ig szóló 5. Nemzeti Környezetvédelmi Programról (melléklete a Nemzeti Természetvédelmi Alapterv)
3. Alatalo JM., Totland O. (1997): Response to simulated climatic change in an alpine and subarctic pollen-risk strategist, *Silene acaulis*. *Glob. Change Biol.* 3:74–79.
4. Amelia A. Wolf, Erika S. Zavaleta, Paul C. Selmants (2017): Flowering phenology shifts in response to biodiversity loss, *PNAS*, 114 (13): 3463-3468., <https://doi.org/10.1073/pnas.1608357114>
5. Antofie, T., Naumann, G., Spinoni, J., Vogt, J. (2015): Estimating the water needed to end the drought or reduce the drought severity in the Carpathian region. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 19: 177–193.
6. Aono Y., Kazui K. (2008): Phenological data series of cherry tree flowering in Kyoto, Japan, and its application to reconstruction of springtime temperatures since the 9th century. *International Journal of Climatology*, 28(7): 905–914. <https://doi.org/10.1002/joc.1594>
7. Arft, A. M. et al. (1999) Responses of tundra plants to experimental warming: metaanalysis of the international tundra experiment. *Ecol. Monogr.* 69: 491–511.
8. Bandoc, G., Piticar A.; Patriche C., Roşca B., Dragomir E. (2022): Climate Warming-Induced Changes in Plant Phenology in the Most Important Agricultural Region of Romania. *Sustainability* 14: 2776. <https://doi.org/10.3390/su14052776>
9. Banta J.A., Ehrenreich I.M., Gerard S., Chou L., Wilczek A., Schmitt J., Kover P.X., Purugganan M.D. (2012): Climate envelope modelling reveals intraspecific relationships among flowering phenology, niche breadth and potential range size in *Arabidopsis thaliana*. *Ecol Lett*, 15: 769-777. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2012.01796.x>
10. Barck H., VonLinné C., Höjer L. M. (1753): Vernatio arborum. Upsalia, Svédország: exc. LM Höjer, Reg. acad. typogr.
11. Barr AG, Black T, Hogg E, Kljun N, Morgenstern K, Nesic Z (2004): Inter-annual variability in the leaf area index of a boreal aspen-hazelnut forest in relation to net ecosystem production. *Agricultural and Forest Meteorology*, 126: 237–255.
12. Bartholy J., Pongrácz R. (2017): A közelmúlt és a jövő országos éghajlati trendjei. (A klímaváltozáshoz alkal-mazkodó erdőgazdálkodás kihívásai II.) *Erdészeti Lapok* 152(5): 134–136.
13. Bartholy J., Pongrácz R., Pieczka I. (2014): How the climate will change in this century? *Hungarian Geographical Bulletin* 63: 55–67. DOI: 10.15201/hungeobull.63.1.5
14. Begum R.A., Lempert R., Ali E., Benjaminsen T.A., Bernauer T., Cramer W., Cui X., Mach K., Nagy G., Stenseth N.C. et al. (2022): Chapter 1: Point of Departure and Key Concepts In IPCC. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (2022):* Pörtner H.-O., Roberts D.C. (Szerk.) Cambridge University Press: Cambridge, UK, Volume 1, pp. 123–181.
15. Berki I., Rasztovits E., Móricz N. (2014): Erdőállományok egészségi állapotának értékelése – egy új megközelítés. *Erdészettudományi Közlemények* 4(2): 149–155.
16. Bertin R. I. (2008): Plant phenology and distribution in relation to recent climate change. *The Journal of the Torrey Botanical Society* Vol. 135, No. 1, pp. 126-146.
17. Bock A., Sparks T. H., Estrella N., Jee N., Casebow A., Schunk C., Menzel A. (2014): Changes in first flowering dates and flowering duration of 232 plant species on the island of Guernsey. *Global Change Biology*, 20(11): 3508–3519. doi:10.1111/gcb.12579
18. Boisvenue C., Running S.W., (2006): Impacts of climate change on natural forest productivity—evidence since the middle of the 20th century. *Global Change Biol.* 12: 862–882. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01134.x>
19. Borhidi A., (1995): Social behaviour types, the naturalness and relative ecological indicator values of the higher plants in the Hungarian flora. *Acta Botanica Hungarica* 39: 97–181.

20. Both M. (2009): Work of Kitaibel Pál in Geosciences, particular description of land use in the Carpathian basin. PhD Thesis, University of Miskolc, <http://phd.lib.uni-miskolc.hu/jadox/portal/browser.psm1>
21. Bruns E., Chmielewski F. M., VanVliet A. J. (2003): The Global Phenological Monitoring Concept: Towards International Standardization of Phenological Networks. *Phenology: An integrative environmental science*, 93-104.
22. Bucher SF, Römermann C. (2020): Flowering patterns change along elevational gradients and relate to life-history strategies in 29 herbaceous species. *Alpine Botany* 130: 41–58.
23. Buermann W., Bikash P. R., Jung M., Burn D. H., Reichstein M. (2013): Earlier springs decrease peak summer productivity in North American boreal forests. *Environmental Research Letters*, 8: 024027. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/2/024027>
24. Buonaiuto D. M., Wolkovich E. M. (2021): Differences between flower and leaf phenological responses to environmental variation drive shifts in spring phenological sequences of temperate woody plants. *Journal of Ecology*, 109: 2922–2933. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13708>
25. Buonaiuto D. M., Wolkovich E. M. (2021): Differences between flower and leaf phenological responses to environmental variation drive shifts in spring phenological sequences of temperate woody plants. *Journal of Ecology*, 109: 2922–2933. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13708>
26. Burkle LA, Marlin JC, Knight TM. (2013): Plant-pollinator interactions over 120 years: loss of species, co-occurrence, and function. *Science* 339: 1611–1615. doi:10.1126/science.1232728
27. Campanella M.V., Bertiller M.B. (2008): Plant phenology, leaf traits and leaf litterfall of contrasting life forms in the arid Patagonian Monte, Argentina. *Journal of Vegetation Science*, 19: 75-85. <https://doi.org/10.3170/2007-8-18333>
28. Carroll E, Sparks T, Donnelly A, Cooney T. (2009): Irish phenological observations from the early 20th century reveal a strong response to temperature. *Biology and Environment-Proceedings of the Royal Irish Academy* 109B: 115–126.
29. Chen L., Hänninen H., Rossi S. *et al.* (2020): Leaf senescence exhibits stronger climatic responses during warm than during cold autumns. *Nat. Clim. Chang.* 10: 777–780. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0820-2>
30. Chen X, Xu L. (2012): Phenological responses of *Ulmus pumila* (Siberian Elm) to climate change in the temperate zone of China. *International Journal of Biometeorology* 56: 695–706.
31. Chen X. (2013): East Asia. In: MD Schwartz, (Szerk.), *Phenology: An integrative environmental science*, 2. kiadás, (pp. 9–22). Dordrecht: *Springer*.
32. Chew Y.H., Wilczek A.M., Williams M., Welch S.M., Schmitt J., Halliday, K.J. (2012): An augmented *Arabidopsis* phenology model reveals seasonal temperature control of flowering time. *New Phytologist*, 194: 654-665. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04069.x>
33. Chitu E., Paltineanu C. (2020): Timing of phenological stages for apple and pear trees under climate change in a temperate-continental climate. *Int J Biometeorol* 64: 1263–1271 <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01903-2>
34. Chmielewski F. M., Müller A., Bruns E., (2004): Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany, 1961–2000, *Agricultural and Forest Meteorology*, Volume 121, Issues 1–2, Pages 69-78, ISSN 0168-1923, [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(03\)00161-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(03)00161-8).
35. Chmielewski FM (1996): The International Phenological Gardens across Europe. *Present State Perspect Phenol Seas* 1(1):19–23
36. Chmielewski F.M., Heider S., Moryson S., Bruns E. (2013): International Phenological Observation Networks - Concept of IPG and GPM (Chapter 8). In: Schwartz M.D. (Szerk.): *Phenology: An Integrative Environmental Science*. Springer Science+Business Media B.V. Dordrecht, 2. Kiadás, 137-153 p.
37. Chmielewski F. M., Rötzer F. (2001): Response of tree phenology to climate change across Europe, *Agricultural and Forest Meteorology*, Volume 108, Issue 2, Pages 101-112, ISSN 0168-1923, [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(01\)00233-7](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(01)00233-7).
38. Christmann T., Kowarik I., Bernard-Verdier M. *et al.* (2023): Phenology of grassland plants responds to urbanization. *Urban Ecosyst* 26, 261–275 <https://doi.org/10.1007/s11252-022-01302-y>
39. Chu C (1931): New monthly calendar (in Chinese). *Bull Chin Meteorol Soc* 6:1–14
40. Chuine I, Beaubien EG (2001): Phenology is a major determinant of tree species range. *Ecology Letters*, 4, 500–510.

41. Chuine, I. (2010): Why does phenology drive species distribution? *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 365: 3149–3160.
42. Chuine, I. et al. (2004): Historical phenology: grape ripening as a past climate indicator. *Nature* 432, 289–290
43. Ciscar Martinez J. (Szerk.), (2009): Climate change impacts in Europe. Final report of the PESETA research project. EUR 24093 EN. Luxembourg (Luxembourg): Publications Office of the European Union; JRC55391 doi:10.2791/32500
44. Cleland EE, Allen JM, Crimmins TM, Dunne JA, Pau S, et al. (2012): Phenological tracking enables positive species responses to climate change. *Ecology* 93:1765–71
45. Cleland, E.E.; Chuine, I.; Menzel, A.; Mooney, H.A.; Schwartz, M.D. (2007): Shifting plant phenology in response to global change. *Trends Ecol. Evol.* 22:357–365.
46. Cong N, Wang T, Nan H, Ma Y, Wang X, Myneni RB, Piao S. (2012): Changes in satellite-derived spring vegetation green-up date and its linkage to climate in China from 1982 to 2010: a multi-method analysis. *Global Change Biology* 19: 881–891.
47. Cook BI, Wolkovich E.M., Parmesan C. (2012b): Divergent responses to spring and winter warming drive community level flowering trends. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA* 109: 9000– 9005.
48. Cook BI, Wolkovich EM, Davies T.J., Ault T.R., Betancourt J.L., Allen J.M., Bolmgren K., Cleland E.E., Crimmins T.M., Kraft N.J.B. et al. (2012a): Sensitivity of spring phenology to warming across temporal and spatial climate gradients in two independent databases. *Ecosystems* 15: 1283– 1294.
49. Cooke, J. E., Eriksson, M. E., & Junntila, O. (2012): The dynamic nature of bud dormancy in trees: Environmental control and molecular mechanisms. *Plant, Cell & Environment*, 35: 1707–1728. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2012.02552.x>
50. Cooperative Holocene Mapping Project. (1988): Climatic changes of the last 18,000 years: observations and model simulations. *Science* 241:1043–1052.
51. Cornelius C., Petermeier H., Estrella N., Menzel, A. (2011): A comparison of methods to estimate seasonal phenological development from BBCH scale recording. *International Journal of Biometeorology*, 55: 867–877. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0421-x>
52. Craine JM, Wolkovich EM, Gene Towne E, Kembel SW. (2012): Flowering phenology as a functional trait in a tallgrass prairie. *New Phytologist* 193: 673–682.
53. Crişan I., Stoie A., Buta E., Cantor M. (2018): Flowering phenology of some *Iris* species in the UASVM Cluj agrobotanical garden, *Romanian Biotechnological Letters*, 2018, Vol. 23, No. 3
54. Czimber K., Gálos B. (2016): A new decision support system to analyse the impacts of climate change on the Hungarian forestry and agricultural sectors. *Scandinavian Journal of Forest Research* 31(7): 664–673. DOI: 10.1080/02827581.2016.1212088
55. Czúcz B, (2009): Élővilág és éghajlatváltozás, MTA Ökológiai és Botanikai Kutatóintézete, Vácrátót, ISBN 978-963-8391-41-4, p 1-17.
56. Csáki P., Szinetár M.M., Herceg A., Kalicz P., Gribovszki Z. (2018): Climate change impacts on the water balance – case studies in Hungarian watersheds. *Időjárás* 122(1): 81–99. DOI: 10.28974/idojaras.2018.1.6
57. Csóka Gy., Hirka A. (2011): Alien and invasive forest insects in Hungary (A review). *Biotic Risks and Climate Changes in Forest. Berichte Freiburger Forstliche Forschung* 89: 54–60.
58. Csóka Gy., Koltay A., Hirka A., Janik G. (2009): Az aszályosság hatása kocsánytalan tölgyeseink és bükköseink egészségi állapotára. *Klímafüzetek* 57: 64–73.
59. Davis A., Major R.E., Taylor C.E. (2016): Do trees flower longer in the city? A comparison of flowering eucalyptus trees in streets, remnants and continuous forest and their association with nectarivorous birds. *Urban ecosystems*, 19(2): 735–747. <https://doi.org/10.1007/s11252-015-0515-z>
60. Davy R., Esau I., Chernokulsky A., Outten S., Zilitinkevich, S. (2017): Diurnal asymmetry to the observed global warming. *International Journal of Climatology*, 37: 79–93. <https://doi.org/10.1002/joc.4688>
61. de Frenne P., Brunet J., Verheyen K. et al. (2011): Temperature effects on forest herbs assessed by warming and transplant experiments along a latitudinal gradient, *Global Change Biology*, vol. 17, issue 10, pp. 3240–3253, doi: 10.1111/j.1365-2486.2011.02449.x

62. De Mendiburu F. (2021): *Agricolae: Statistical Procedures for Agricultural Research*. R package Version 1.3-5. 2021. Online elérési út: <https://CRAN.R-project.org/package=agricolae> (hozzásférés: 2023. március 15.)
63. De Valpine P., Harte J. (2001): Plant responses to experimental warming in a montane meadow. *Ecology* 82: 637–648.
64. Defila C. (2008): Plant phenological observations in Switzerland. In: J. Nekovář, E. Koch, E. Kubin, P. Nejedki, T. Sparks, & F. E. Wielgolaski (Szerk.), COST Action 725: The history and current status of plant phenology in Europe. Sastamala, Finland: Finnish Forest Research Institute Muhos Research Unit and COST Office, Vammalan Kirjapaino Oy.
65. Delbart N, Picard G, Le Toans T, Kergoat L, Quegan S, Woodward I, Dye D, Fedotova V. (2008): Spring phenology in boreal Eurasia over a nearly century time scale. *Global Change Biology* 14: 603–614.
66. Diez J.M., Ibanez I., Miller-Rushing A.J., Mazer S.J., Crimmins T.M., Crimmins M.A., Bertelsen C.D., Inouye, D.W. (2012): Forestcasting phenology: from species variability to community patterns. 15(6): 545–553. doi: 10.1111/j.1461-0248.2012.01765.x.
67. Digital Science. (2018-) Dimensions [Software] available from <https://app.dimensions.ai>. Accessed on (DATE), under licence agreement.
68. Dövényi Z., Ambrózy P., Juhász Á., Marosi S., Mezősi G., Michalkó G., Tiner, T. (2008): Magyarország kistájainak katasztere, Inventory of microregions in Hungary. *OTKA Kutatási Jelentések | OTKA Research Reports*.
69. Dunay S., (1984): Plant phenological observations in Hungary, *Légekör* 29: 2–9
70. Dunne J. et al. (2003): Subalpine meadow flowering phenology responses to climate change: Integrating experimental and gradient methods. *Ecol. Monogr.* 73: 69–86
71. Dunne J. et al. (2003): Subalpine meadow flowering phenology responses to climate change: Integrating experimental and gradient methods. *Ecol. Monogr.* 73: 69–86
72. Ellenberg, H. (1996): *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht* (5. kiadás). Ulmer.
73. Eppich B., Dede L., Ferenczy A., Ferenczy Á., Garamvölgyi L., Horváth L., Isépy I., Priszter Sz., Hufnagel L. (2009): Climatic effects on the phenology of geophytes. *Applied Ecology and Environmental Research*. 7: 253-266. [https://doi.org/10.15666/aeer/0703\\_253266](https://doi.org/10.15666/aeer/0703_253266)
74. Estiarte M, Peñuelas J. (2015): Alteration of the phenology of leaf senescence and fall in winter deciduous species by climate change: effects on nutrient proficiency. *Global Change Biology* 21: 1005–1017.
75. Estrella N., Menzel A. (2006): Responses of leaf colouring of four deciduous tree species to climate and weather in Germany. *Climate Res.* 321: 253–267
76. Ettinger AK, Gee S, Wolkovich EM. (2018): Phenological sequences: how early-season events define those that follow. *American Journal of Botany* 105: 1771–1780.
77. Faraway J.J. (2005): *Linear Models with R*; Chapman & Hall/CRC: Boca Raton, FL, USA; London, UK; New York, NY, USA, 229p.
78. Fitter A. H., Fitter R. S. R., Harris I. T. B., Williamson, M. H. (1995): Relationships Between First Flowering Date and Temperature in the Flora of a Locality in Central England. *Functional Ecology*, 9(1), 55–60. <https://doi.org/10.2307/2390090>
79. Fitter AH, Fitter RS (2002): Rapid changes in flowering time in British plants. *Science*. 296(5573):1689-91. doi: 10.1126/science.1071617. PMID: 12040195.
80. FitzJohn R. G., Pennell M. W., Zanne A. E., Stevens P. F., Tank D. C. Cornwell, W. K. (2014): How much of the world is woody? *Journal of Ecology*, 102(5), 1266– 1272. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12260>
81. Flynn D. F. B., Wolkovich E. M. (2018): Temperature and photoperiod drive spring phenology across all species in a temperate forest community. *New Phytologist*, 219: 1353–1362. <https://doi.org/10.1111/nph.15232>
82. Forrest J., Miller-Rushing A. J. (2010): Toward a synthetic understanding of the role of phenology in ecology and evolution *Phil. Trans. R. Soc.* B3653101–3112 <http://doi.org/10.1098/rstb.2010.0145>
83. Fortuniak K., Kłysik K., Wibig J. (2006): Urban–rural contrasts of meteorological parameters in Łódź. *Theor. Appl. Climatol.* 84: 91–101 <https://doi.org/10.1007/s00704-005-0147-y>



84. Fournier-Level A, Taylor MA, Paril JF, Martínez-Berdeja A, Stitzer MC, Cooper MD, Roe JL, Wilczek AM, Schmitt J. (2022): Adaptive significance of flowering time variation across natural seasonal environments in *Arabidopsis thaliana*. *New Phytol.* 234(2):719-734. doi: 10.1111/nph.17999.
85. Fridley, J.D. (2012) Extended leaf phenology and the autumn niche in deciduous forest invasions. *Nature* 485, 359–362
86. Fu YS, Campioli M, Vitasse Y, De Boeck HJ, Van den Berge J, Abdelgawad H, Asard H, Piao S, Deckmyn G, Janssens IA (2014): Variation in leaf flushing date influences autumnal senescence and next year's flushing date in two temperate tree species. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 111(20):7355-60. doi: 10.1073/pnas.1321727111.
87. Fu, Y. H., Zhao, H., Piao, S., Peaucelle, M., Peng, S., Zhou, G., Janssens, I. A. (2015): Declining global warming effects on the phenology of spring leaf unfolding. *Nature*, 526: 104–107. <https://doi.org/10.1038/nature15402>
88. Führer E. (2010): A fák növekedése és a klíma. *Klímafüzetek* 61: 98–107.
89. Galen, C., Stanton, M.L. (1995): Responses of snowbed plant species to changes in growing-season length. *Ecology* 76: 1546–1557
90. Gallinat AS, Primack RB, Wagner DL. (2015) Autumn, the neglected season in climate change research. *Trends Ecol Evol.* 30(3):169-76. doi: 10.1016/j.tree.2015.01.004.
91. Gallinat AS, Primack RB, Willis CG, Nordt B, Stevens AD, Fahey R, Whittemore AT, DuY, Panchen ZA. (2018): Patterns and predictors of fleshy fruit phenology at five international botanical gardens. *American Journal of Botany* 105: 1824–1834.
92. Gálos B., Führer E., Czimber K., Gulyás K., Bidló A., Hänsler A. et al. (2015): Climatic threats determining future adaptive forest management – a case study of Zala County. *Időjárás* 119(4): 425–441.
93. Gálos B., Somogyi Z. (2017): Új klímaszcenáriók – fellélegezhetnek bükköseink? *Erdészettudományi Közle-mények* 7(2): 85–98. DOI: 10.17164/EK.2017.006
94. Gálos B.; Jacob D.; Mátyás C.S. (2011): Effects of Simulated Forest Cover Change on Projected Climate Change—A Case Study of Hungary. *Acta Silv. Lignaria Hung.* 7: 49–62.
95. Gálos, Borbála és Führer, Ernő (2018) A klíma erdészeti célú előrejelzése. *Erdészettudományi Közlemények*, 8 (1). pp. 43-55. ISSN 2062-6711, <https://doi.org/10.17164/EK.2018.003>
96. Ge Q., Wang H., Rutishauser T., Dai, J. (2014): Phenological response to climate change in China: A meta-analysis. *Global Change Biology*, 21: 265–274. <https://doi.org/10.1111/gcb.12648>
97. Ghazanfar S. A. (1997): The phenology of desert plants: a 3-year study in a gravel desert wadi in northern Oman, *Journal of Arid Environments*, Volume 35, Issue 3, Pages 407-417, ISSN 0140-1963, <https://doi.org/10.1006/jare.1996.0190>.
98. Ghazanfar Sh. A. (1997): The phenology of desert plants: a 3-year study in a gravel desert wadi in northern Oman, *Journal of Arid Environments*, Volume 35, Issue 3, 1997, P. 407-417, ISSN 0140-1963, <https://doi.org/10.1006/jare.1996.0190>.
99. Gill A. L., Gallinat A. S., Sanders-Demott R., Rigden A. J., Short Gianotti D. J., Mantooth J. A., Templer P. H. (2015): Changes in autumn senescence in northern hemisphere deciduous trees: A meta-analysis of autumn phenology studies. *Annals of Botany*, 116: 875–888. <https://doi.org/10.1093/aob/mcv055>
100. Golluscio R.A., Oesterheld M., Aguiar M.R. (2005): Relationship between phenology and life form: a test with 25 Patagonian species. *Ecography*, 28: 273-282. <https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2005.03897.x>
101. Gorton A. J., Moeller D. A., Tiffin, P. (2018): Little plant, big city: a test of adaptation to urban environments in common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*). *Proc. R. Soc. B* 285: 20180968
102. Grange S. K., Lewis A. C., Moller S. J., Carslaw, D. C. (2017): Lower vehicular primary emissions of NO<sub>2</sub> in Europe than assumed in policy projections. *Nat. Geosci.* 10: 914–918.
103. Gray S., Jordan R., Crall A., Newman G., Hmelo-Silver C., Huang J., Novak W., Mellor D., Frensley T., Prysby M., Singer A. (2016): Combining participatory modelling and citizen science to support volunteer conservation action. *Biological Conservation* 208: 76–86.
104. Gregg JW, Jones CG, Dawson TE. (2003): Urbanization effects on tree growth in the vicinity of New York City. *Nature* 424: 183–187.

105. Hänninen H. (1991): Does climatic warming increase the risk of frost damage in northern trees? *Plant, Cell & Environment*, 14: 449-454. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1991.tb01514.x>
106. Hänninen H. (2011): Effects of climatic change on trees from cool and temperate regions: an ecophysiological approach to modelling of bud burst phenology. *Canadian Journal of Botany*. 73(2): 183-199. <https://doi.org/10.1139/b95-022>
107. Harper G, Morris L. (2007): Flowering and climate change – part II. *Sibbaldia* 5: 25–42.
108. Harper GH, Mann DG, Thompson R. (2004): Phenological monitoring at Royal Botanic Garden Edinburgh. *Sibbaldia* 2: 33–45.
109. Harrison T., Winfree R., Evans, K. (2015): Urban drivers of plant–pollinator interactions. *Funct. Ecol.* 29: 879–888.
110. Hegazy A. K., Kabiél H. F., Hosni H. A., Badawi E.-S. M., Lovett-Doust L. (2018): Spatial and temporal variation in plant community phenology in the Jebel Marra region of Darfur. *Folia Geobotanica*, 53(4): 389–403. <https://www.jstor.org/stable/48713810>
111. Hegland S. J., Nielsen, A., Lázaro, Bjerknes A.-L., and Totland R. (2009): How does climate warming affect plant–pollinator interactions? *Ecology Letters* 12:184–195.
112. Hepper F.N. (2003): Phenological records of English garden plants in Leeds (Yorkshire) and Richmond (Surrey) from 1946 to 2002. An analysis relating to global warming. *Biodiv Conserv* 12: 2503–2520
113. Herrmann D. L., Schiffman L. A., Shuster W. D. (2018): Widespread loss of intermediate soil horizons in urban landscapes. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 115: 6751–6755.
114. Hlásny T., Mátyás C.S., Seidl R., Kulla L., Merganicova K., Trombik J.; Dobor L., Barcza Z., Konôpka B. (2014): Climate change increases the drought risk in Central European forests: What are the options for adaptation? *Cent. Eur. J.* 60: 5-18.
115. Hopkins WG, Hüner NPA (2008): Introduction to plant physiology. Hoboken, New Jersey, United States: John Wiley & Sons.
116. Horbach S., Rauschkolb R., Römermann C. (2023): Flowering and leaf phenology are more variable and stronger associated to functional traits in herbaceous compared to tree species, *Flora*, Volume 300: 152218, ISSN 0367-2530, <https://doi.org/10.1016/j.flora.2023.152218>.
117. Horváth F., Dobolyi Z. K., Morschhauser T., Lökös L., Karas L. & Szerdahelyi T, (1995): FLÓRA adatbázis 1.2 Taxonlista és attribútum-állomány, Vácrátót, Országos Tudományos Kutatási Alap (OTKA P18733)
118. Howard C.C., Folk R.A., Beaulieu J.M., Cellinese N. (2019): The monocotyledonous underground: global climatic and phylogenetic patterns of geophyte diversity. *Am. J. Bot.* 106: 850–863. <https://doi.org/10.1002/ajb2.1289>.
119. Hulme P. E. (2011): Contrasting impacts of climate-driven flowering phenology on changes in alien and native plant species distributions. *New Phytologist* 189:272–281.
120. Hunkár M., Vincze E., Szenyan I., Dunkel Z. (2012): Application of phenological observations in agrometeorological models and climate change research. *Időjárás*. 116: 195-209.
121. Ibañez M., Altimir N., Ribas A., Eugster W., Sebastià, M. (2020): Phenology and plant functional type dominance drive CO<sub>2</sub> exchange in seminatural grasslands in the Pyrenees. *The Journal of Agricultural Science*, 158(1-2): 3-14. doi:10.1017/S0021859620000179
122. Ibañez I., Primack R. B., Miller-Rushing A. J., Ellwood E., Higuchi H., Lee S. D., Kobori H., Silander J. A. (2010): Forecasting phenology under global warming, *Phil. Trans. R. Soc.* B365:3247–3260
123. Ihne E., Hoffmann H. (1884): Beiträge zur Phänologie. J. Ricker'sche, Giessen
124. Iler AM, Compagnoni A, Inouye DW, Williams JL, CaraDonna PJ, et al. (2019): Reproductive losses due to climate change-induced earlier flowering are not the primary threat to plant population viability in a perennial herb. *J. Ecol.* 279:1931–43
125. Iler AM., CaraDonna PJ., Forrest JRK., Post E. (2021): Demographic Consequences of Phenological Shifts in Response to Climate Change, *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 52:221–45, <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-011921-032939>.
126. Illés G., Fonyó T. (2016): A klímaváltozás fatermésre gyakorolt várható hatásának becslése az AGRATÉR projektben. *Erdészettudományi Közlemények* 6(1): 25–34. DOI: 10.17164/ek.2016.003
127. Inouye DW (2008): Effects of climate change on phenology, frost damage, and floral abundance of montane wildflowers. *Ecology* 89: 353–362.

128. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 1996: Climate change 1995—the science of climate change. In: J. T. Houghton, L. G. Meira Filho, B. A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, and K. Maskell, editors. The second assessment report of the IPCC: contribution of Working Group I. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
129. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2007: *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (Szerk.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.
130. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (Szerk.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
131. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2022: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (Szerk.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.
132. Jacob D., et al. (2013): New high-resolution climate change projections for Euro-pean impact research. *Regional Environmental Change* 14: 563–578. DOI: 10.1007/s10113-013-0499-2
133. Jacoby W.G. (2000): LOESS: A nonparametric, graphical tool for depicting relationships between variables. *Elect. Stud.* 19: 577–613.
134. Janik G., Hirka A., Koltay A., Juhász J., Csóka Gy. (2016): 50 év biotikus kárai a magyar bükkösökben. *Erdészettudományi Közlemények* 6(1): 45–60. DOI: 10.17164/EK.2016.005
135. Jaworski T., Hilszczański J. (2013): The effect of temperature and humidity changes on insects development their impact on forest ecosystems in the expected climate change. *Forest Research Papers*, 74: 345–355. <https://doi.org/10.2478/frp-2013-0033>
136. Jeong S. J., Ho C. H., Gim H. J., Brown M. E. (2011): Phenology shifts at start vs. end of growing season in temperate vegetation over the Northern Hemisphere for the period 1982–2008. *Global Change Biology*, 17: 2385–2399. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02397.x>
137. Jeong S. J., Medvigy D. (2014): Macroscale prediction of autumn leaf coloration throughout the continental United States. *Global Ecology and Biogeography*, 23: 1245–1254. <https://doi.org/10.1111/geb.12206>
138. Jeremy J. (2012): Species performance: The relationship between nutrient availability, life history traits and stress Chapter 8 . In: Monaco T. M.; Sheley R. L. (Szerk.) *Invasive plant ecology and management: Linking processes to practice*. Oxfordshire, UK: CABI Publishing. p. 142-153.).
139. Jia W., Zhao S., Zhang X., Liu S., Henebry G.M., Liu L. (2021): Urbanization imprint on land surface phenology: The urban–rural gradient analysis for Chinese cities. *Glob. Chang. Biol.* 27: 2895–2904. <https://doi.org/10.1111/gcb.15602>
140. Jochner S, Menzel A. (2015): Urban phenological studies – past, present, future. *Environmental Pollution* 203: 250– 261.
141. Kahle H.P. (2008): *Causes and Consequences of Forest Growth Trends in Europe: Results of the Recognition Project*, vol. 21. Brill.
142. Katal N, Rzanny M, Mäder P, Wäldchen J. (2022): Deep Learning in Plant Phenological Research: A Systematic Literature Review. *Front Plant Sci.* 13:805738. doi: 10.3389/fpls.2022.805738. PMID: 35371160; PMCID: PMC8969581.
143. Keenan T. F., Richardson A. D. (2015): The timing of autumn senescence is affected by the time of spring phenology: Implications for predictive models. *Global Change Biology*, 21: 2634–2641.
144. Kharouba H. M., Ehrlén J., Gelman A., Bolmgren K., Allen J. M., Travers S. E., Wolkovich E. M. (2018): Global shifts in the phenological synchrony of species interactions over recent decades. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115: 5211–5216. <https://doi.org/10.1073/pnas.1714511115>

145. Khodorova NV, Boitel-Conti M. (2013): The Role of Temperature in the Growth and Flowering of Geophytes. *Plants* (Basel), 2(4):699-711. doi: 10.3390/plants2040699. PMID: 27137399; PMCID: PMC4844387.
146. Király G. (Szerk.), Balogh L. Baráth K. & Barina Z., Bartha D., Bényeiné M., Csiky J., Dancza I. Dobolyi K., Facsar G., Farkas S., Fischer A., Király G. & Lájér K., Mesterhazy A., Molnár V. A., Nagy A., Németh, Cs., Papp L., Papp M., Virók V. (2009): Új magyar fűvészkönyv. Magyarország hajtásos növényei. Határozókulcsok. / New Hungarian Herbal. The Vascular Plants of Hungary. Identification keys, Jósvalő: *Aggteleki Nemzeti Park Igazgatóság*, 616 p.
147. Koch E., Bruns E., Chmielewski F. M., Defila C., Lipa W., Menzel A. (2007): Guidelines for plant phenological observations. World Climate Data and Monitoring Programme. *World Meteorological Organization (WMO), Geneva, Switzerland*.
148. Kozłowski T. T., Pallardy G. S., (1997): Environmental Regulation of Vegetative Growth, Szerk: Kozłowski T. T., Pallardy G. S., In: *Physiological Ecology, Growth Control in Woody Plants*, Academic Press, pp. 195-322, ISBN 9780124242104, doi.org/10.1016/B978-012424210-4/50005-X.
149. König P, Tautenhahn S, Cornelissen JHC, Kattge J, Bönisch G, Römermann C. (2018): Advances in flowering phenology across the Northern Hemisphere are explained by functional traits. *Global Ecology and Biogeography* 27: 310–321.
150. Körner C. (2003): *Alpine plant life: functional plant ecology of high mountain ecosystems*. Berlin, Germany: *Springer*.
151. Körner C., Basler D. (2010): Plant science. Phenology under global warming. *Science*. 327(5972):1461-2. doi: 10.1126/science.1186473. PMID: 20299580.
152. Kröel-Dulay G., Ransijn J., Schmidt I. et al. (2015): Increased sensitivity to climate change in disturbed ecosystems. *Nat Commun* 6: 6682. <https://doi.org/10.1038/ncomms7682>
153. Krumbiegel A. (2008): Growth forms of biennial and pluriennial vascular plants in central Europe. *Nordic Journal of Botany*. 19:217 - 226. <https://doi.org/10.1111/j.1756-1051.1999.tb00667.x>.
154. Kunkel K.E. et al. (2004): Temporal variations in frost-free season in the United States: 1895–2000. *Geophys. Res. Lett.*,31, L03201 DOI: 10.1029/2003GL018624
155. Lahr EC, Dunn RD, Frank SD (2018): Getting ahead of the curve: cities as surrogates for global change. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 285(1882), 20180643. <https://doi.org/10.1098/rspb.2018.0643>
156. Lambers H, Chapin FS III, Pons TL (2008): *Plant physiological ecology*. New York, United States: *Springer*.
157. Lavorel S., Garnier E. (2002): Predicting changes in community composition and ecosystem functioning from plant traits: revisiting the Holy Grail. *Functional Ecology*, 16: 545–556.
158. Lessard-Therrien M., Davies T. J., Bolmgren K. (2014): A phylogenetic comparative study of flowering phenology along an elevational gradient in the Canadian subarctic. *International Journal of Biometeorology* 58: 455–462.
159. Leuzinger S. et al. (2005): Responses of deciduous forest trees to severe drought in Central Europe. *Tree Physiol*. 25: 641–650
160. Lieth H. (Szerk.) (1974): Phenology and seasonality modeling. *Ecological studies* 8, *Springer V.*, 444 pp <https://doi.org/10.1007/978-3-642-51863-8>
161. Liu G., Chen X., Fu Y., Delpierre N. (2019): Modelling leaf coloration dates over temperate China by considering effects of leafy season climate, *Ecological Modelling*, 394: 34-43, ISSN 0304-3800, <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.12.020>.
162. Liu Q, Fu YH, Zhu Z, Liu Y, Liu Z, Huang M, Janssens IA, Piao S. (2016): Delayed autumn phenology in the Northern Hemisphere is related to change in both climate and spring phenology. *Global Change Biology* 22: 3702–3711.
163. Liu Q., Piao S., Janssens I.A. et al. (2018): Extension of the growing season increases vegetation exposure to frost. *Nat Commun* 9: 426. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02690-y>
164. Longcore T., Rich C. (2004): Ecological light pollution. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2: 191-198. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2004\)002\[0191:ELP\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2004)002[0191:ELP]2.0.CO;2)
165. Luo X., Zhang Y., Sun D. (2020): Response Patterns of Vegetation Phenology along Urban-Rural Gradients in Urban Areas of Different Sizes. Complexity, *Hindawi Special Issue*, Vol. 2020: 1–11. <https://doi.org/10.1155/2020/7607936>

166. Massetti L. (2018): Assessing the impact of street lighting on *Platanus x acerifolia* phenology. *Urban For. Urban Green*. 34: 71–77.
167. Mátyás Cs. (2017): Alkalmazkodás a törvények, társadalmi elvárások és az ökológiai kihívások keresztüzében. (A klímaváltozáshoz alkalmazkodó erdőgazdálkodás kihívásai I.) *Erdészeti Lapok* 152(4): 102–106.
168. Mátyás Cs., Führer E., Berki I., Csóka Gy., Drüszler Á., Lakatos F. et al. (2010): Erdők a szárazsági határon. *Klíma füzetek* 61: 84–97.
169. Meehl, G. A., et al. (2007): Global climate projections. Pages 747–845 in S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, and H. L. Miller (Szerk.) *Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
170. Meier I.C., Leuschner C., (2008): Leaf size and leaf area index in *Fagus sylvatica* forests: competing effects of precipitation, temperature, and nitrogen availability. *Ecosystems* 11: 655–669.
171. Meier U, Bleiholder H, Buhr L, Feller C, Hack H, Hess M, Lancashire PD, Schnock U, Stauss R, van den Boom T, Weber E, Zwerger P (2009): The BBCH system to coding the phenological growth stages of plants – history and publications. *J Kulturpflanz* 61:41–52
172. Meier U. (2001): Growth stages of mono- and dicotyledonous plants - BBCH Monograph, 2. Edition, *Federal Biological Research Centre for Agriculture and Forestry*, 158 p.
173. Memmott, J., Craze, P.G., Waser, N.M. and Price, M.V. (2007): Global warming and the disruption of plant–pollinator interactions. *Ecology Letters*, 10: 710-717. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01061.x>
174. Méndez-Vigo B, Gomaa NH, Alonso-Blanco C, Xavier Picó F. (2013): Among- and within-population variation in flowering time of Iberian *Arabidopsis thaliana* estimated in field and glasshouse conditions. *New Phytol.* 197(4):1332-1343. doi: 10.1111/nph.12082.
175. Meng L, Mao J, Zhou Y, Richardson AD, Lee X, Thornton PE, Ricciuto DM, Li X, Dai Y, Shi X et al. (2020): Urban warming advances spring phenology but reduces the response of phenology to temperature in the conterminous United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA* 117: 4228– 4233.
176. Menzel A, Sparks T, Estrella N, Koch E, Aasa A, Ahas R, Alm-Kübler K, Bissolli P, Braslavská O, Briede A, Chmielewski FM, Crepinsek Z, Curnel Y, Dahl A °, Defila C, Donnelly A, Filella Y, Jatzak K, Ma°ge F, Mestre A, Nordli Ø, Peñuelas J, Pirinen P, Remisˇova V, Scheifinger H, Striz M, Susnik A, van Vliet AJH, Wielgolaski FE, Zach S, Züst A (2006): European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Glob Change Biol* 12 (10):1969–1976. doi:10.1111/j.1365-2486.2006.01193.x
177. Menzel A. (2000): Trends in phenological phases in Europe between 1951 and 1996. *Int J Biometeorol.* Aug;44(2):76-81. doi: 10.1007/s004840000054. PMID: 10993561.
178. Menzel A. (2002): Phenology, its importance to the global change community. *Clim Change* 54:379–385
179. Menzel A. (2003): Plant phenological anomalies in Germany and their relation to air temperature and NAO. *Climatic Change* 57: 243–263
180. Menzel A. (2013) Europe (Chapter 4). In: Schwartz MD (Szerk.): *Phenology: An Integrative Environmental Science*. Springer Science+Business Media B.V. Dordrecht, 2nd Edition, 137-153
181. Menzel, A. Fabian, P. (1999): Growing Season Extended in Europe. *Nature*, 397: 659. <http://dx.doi.org/10.1038/17709>
182. Millennium Ecosystem Assessment. (2005) *Ecosystems and human wellbeing: biodiversity synthesis*. *World Resources Institute*, Washington, D.C.
183. Miller-Rushing A. J., Inouye D. W., Primack R. B. (2008): How well do first flowering dates measure plant responses to climate change? The effects of population size and sampling frequency. *Journal of Ecology*, 96(6): 1289–1296. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2008.01436.x>
184. Miller-Rushing A.J., Inouye D.W. (2009): Variation in the impact of climate change on flowering phenology and abundance: An examination of two pairs of closely related wildflower species. *American Journal of Botany*, 96: 1821-1829. <https://doi.org/10.3732/ajb.0800411>
185. Miller-Rushing A.J., Primack R.B. (2008b): Global warming and flowering times in Thoreau's Concord: A community perspective. *Ecology*, 89: 332-341. <https://doi.org/10.1890/07-0068.1>

186. Miller-Rushing AJ, Høye TT, Inouye DW, Post E. (2010): The effects of phenological mismatches on demography. *Phil. Trans. R. Soc. B* 365: 3177–3186. doi:10.1098/rstb.2010.0148
187. Miller-Rushing AJ, Primack RB. (2008a): Effects of winter temperatures on two birch (*Betula*) species. *Tree Physiology* 28: 659–664.
188. Mitchell L. E. et al. (2018): Long-term urban carbon dioxide observations reveal spatial and temporal dynamics related to urban characteristics and growth. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 115: 2912–2917.
189. Mojzes A., Ónodi G., Lhotsky B. et al. (2020): Experimental drought indirectly enhances the individual performance and the abundance of an invasive annual weed. *Oecologia* 193, 571–581 <https://doi.org/10.1007/s00442-020-04711-y>
190. Molau U. (1997): Responses to natural climatic variation and experimental warming in two tundra plant species with contrasting life forms: *Cassiope tetragona* and *Ranunculus nivalis*. *Global Change Biology*, 3: 97–107. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.1997.gcb138.x>
191. Molau U., Nordenhäll U., Eriksen, B. (2005): Onset of flowering and climate variability in an alpine landscape: a 10-year study from Swedish Lapland . *Am. J. Bot.*, 92: 422–431. <https://doi.org/10.3732/ajb.92.3.422>
192. Molnár M., Brück-Dyckhoff C., Petercord R., Lakatos F. (2010): A zöld karcsúdíszbogár (*Agrilus viridis* L.) szerepe a bükkösök pusztulásában. *Növényvédelem* 46(11): 522–528.
193. Montserrat-Martí G., Palacio S., Milla R. et al. (2011): Meristem Growth, Phenology, and Architecture in Chamaephytes of the Iberian Peninsula: Insights into a Largely Neglected Life Form. *Folia Geobot* 46: 117–136. <https://doi.org/10.1007/s12224-010-9073-6>
194. Mooney H. et al. (2009): Biodiversity, climate change, and ecosystem services. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 1: 46–54. doi:10.1016/j.cosust.2009.07.006
195. Morales MA, Dodge GJ, Inouye DW (2005): A phenological mid-domain effect in flowering diversity. *Oecologia*, 142: 83–89.
196. Morellato L. P., Cerdeira, B., Alberton, S. T. Alvarado, B., Borges E., Buisson, M. G., Camargo L., Cancian F., et al. (2016): Linking Plant Phenology to Conservation Biology. *Biological Conservation* 195: 60–72. doi:10.1016/J.BIOCON.2015.12.033.
197. Móricz N., Rasztoivts E., Gálos B., Berki I., Eredics A., Loibl W. (2013): Modeling 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
198. Morin X, Lechowicz MJ, Augspurger C, O’Keefe J, Viner D, Chuine I (2009): Leaf phenology in 22 North American tree species during the 21st century. *Global Change Biology*, 15, 961–975.
199. Morin X., Roy J., Sonié L., Chuine I. (2010) Changes in leaf phenology of three European oak species in response to experimental climate change. *New Phytol.*, 186: 900–910.
200. Morren C. (1843): Fleurs éphémères. Librairie encyclopédique de Périchon, Bruxelles, 439–440.
201. Mosquin T. (1971): Competition for pollinators as a stimulus for evolution of flowering time. *Oikos* 22: 398–402.
202. Mouradov A, Cremer F, Coupland G. (2002): Control of flowering time: interacting pathways as a basis for diversity. *Plant Cell*. 14: Suppl(Suppl):S111-30. doi: 10.1105/tpc.001362. PMID: 12045273; PMCID: PMC151251.
203. Nagahama A., Kubota Y., Satake A. (2018): Climate warming shortens flowering duration: a comprehensive assessment of plant phenological responses based on gene expression analyses and mathematical modeling. *Ecol Res* 33: 1059–1068. <https://doi.org/10.1007/s11284-018-1625-x>
204. Navarro D.J. (2015): Learning Statistics with R: A Tutorial for Psychology Students and Other Beginners; University of New South Wales: Sydney, NSW, Australia
205. Neil K, Wu J. (2006): Effects of urbanization on plant flowering phenology: a review. *Urban Ecosystem* 9: 243– 257.
206. Nekovar J., Koch E., Kubin E., Nejedlik P., Sparks T., Wielgoalski (2008): COST Action 725 - The history and current status of plant phenology in Europe. COST Office, Brussels. 182 p.
207. Nordt B, Hensen I, Bucher SF, et al. (2021): The PhenObs initiative: A standardised protocol for monitoring phenological responses to climate change using herbaceous plant species in botanical gardens. *Funct Ecol.* 35: 821– 834. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13747>

208. Ofir M., Kigel J. (1999): Photothermal control of the imposition of summer dormancy in *Poa bulbosa*, a perennial grass geophyte. *Physiologia Plantarum*, 105: 633-640. <https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.1999.105406.x>
209. Orlóci L., Kiszpel P., Solymosiné László I., Papp L. (2019): *Delectus seminum sporarum plantarumque Horti Botanici Universitatis Hungariae*. Eotvos Lorand Tudományegyetem, Botanikus Kertje Universitatis Scientiarum Hungariae de Lorand Eoetvoes Nuncupatae.
210. Overpeck J. T., Webb R. S., and Webb T. (1992): Mapping eastern North American vegetation change over the past 18,000 years: no analogs and the future. *Geology* 20:1071–1074.
211. Öztürk M., Bolat B., Ergün A. (2015): Influence of air–soil temperature on leaf expansion and LAI of *Carpinus betulus* trees in a temperate urban forest patch, *Agricultural and Forest Meteorology*, Volume 200: 185-191, ISSN 0168-1923, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.09.014>.
212. Panchen Z. A., Primack R. B., Gallinat A. S., Nordt B., Stevens A.-D., Du Y., Fahey R. (2015): Substantial variation in leaf senescence times among 1360 temperate woody plant species: Implications for phenology and ecosystem processes. *Annals of Botany*, 116(6): 865– 873. <https://doi.org/10.1093/aob/mcv015>
213. Panchen Z. A., Primack R. B., Nordt B., Ellwood E. R., Stevens A.-D., Renner S. S., Willis C. G., Fahey R., Whittemore A., Du Y., Davis C. C. (2014): Leaf out times of temperate woody plants are related to phylogeny, deciduousness, growth habit and wood anatomy. *New Phytologist*, 203(4): 1208– 1219. <https://doi.org/10.1111/nph.12892>
214. Papp L., (Szerk.) Isépy I., Papp L., Prieszter Sz., Szentpéteri E., Szakály Pappné, Á. (2021): *A fűvészkert története*, ISBN 978-963-489-383-7
215. Park D.S., Xie Y., Ellison A.M., Lyra G.M., Davis C.C. (2023): Complex climate-mediated effects of urbanization on plant reproductive phenology and frost risk. *New Phytol.* 239: 2153-2165. <https://doi.org/10.1111/nph.18893>
216. Parmesan C., Yohe G (2003): A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* 421: 37–42.
217. Parmesan C., (2006): Ecological and Evolutionary Responses to Recent Climate Change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 37:1, 637-669
218. Pau S., Wolkovich E. M., Cook B. I., Davies T. J., Kraft N. J. B., Bolmgren K., Betancourt J. L., Cleland E. E. (2011): Predicting phenology by integrating ecology, evolution and climate science. *Global Change Biology* 17:3633–3643.
219. Pavon NP, Briones O (2001): Phenological patterns of nine perennial plants in an intertropical semi-arid Mexican scrub. *J Arid Environm* 49:265–277
220. Pekár S., Brabec M. (2016): *Modern Analysis of Biological Data. Generalized Linear Models in R*; Masaryk University Press: Brno, Czech Republic, 2016; 226p.
221. Peng X, Zhang T, Frauenfeld OW, Wang K, Sun W, Luo J (2019): Evaluation and quantification of surface air temperature over Eurasia based on CMIP5 models. *Clim Res*, 77:167–180. <https://doi.org/10.3354/cr01549>
222. Peñuelas J., Ciais P., Canadell J.G., Janssens I.A., Fernández-Martínez M., Carnicer J., Obersteiner M., Piao S., Vautard R., Sardans J. (2017): Shifting from a fertilization-dominated to a warming-dominated period. *Nat. Ecol. Evol.*, 1: 1438–1445.
223. Peñuelas J., Filella I., Zhang X., Llorens L., Ogaya R., Lloret F., Terradas J. (2004): Complex spatiotemporal phenological shifts as a response to rainfall changes. *New Phytologist*, 161: 837–846. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01003.x>
224. Peñuelas J., Niinemets Ü., Ogaya R., Schmidt I.K., Beier C., Tietema A., Sowerby A., Emmett B.A., Láng E.K., Kröel-Dulay G., Lhotsky B., Cesaraccio C., Pellizzaro G., De Dato G., Sirca C. Estiarte M. (2009b): Changes in the onset of spring growth in shrubland species in response to experimental warming along a north–south gradient in Europe. *Global Ecology and Biogeography*, 18: 473-484. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2009.00460.x>
225. Peñuelas J., Rutishauser T., Filella I. (2009a) Phenology feedbacks on climate change. *Science*, 324: 887–888.
226. Piao S, Liu Q, Chen A, et al. (2019): Plant phenology and global climate change: Current progresses and challenges. *Glob Change Biol.*, 25: 1922– 1940. <https://doi.org/10.1111/gcb.14619>

227. Piao S., Fang J., Zhou L., Ciais P., Zhu B. (2006): Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation. *Global Change Biology*, 12: 672–685. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01123.x>
228. Piao S., Tan J., Chen A., Fu Y. H., Ciais P., Liu Q., Peñuelas J. (2015): Leaf onset in the northern hemisphere triggered by daytime temperature. *Nature Communications*, 6: 6911. <https://doi.org/10.1038/ncomms7911>
229. Pickett S.T.A. (1989): Space-for-Time Substitution as an Alternative to Long-Term Studies. In: Likens, G.E. (Szerk.) *Long-Term Studies in Ecology*. Springer, New York, NY. [https://doi.org/10.1007/978-1-4615-7358-6\\_5](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-7358-6_5)
230. Polgar C.A., Primack R.B. (2011): Leaf-out phenology of temperate woody plants: from trees to ecosystems. *New Phytologist*, 191: 926–941. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03803.x>
231. Pongrácz R., Bartholy J., Miklós E. (2011): Analysis of projected climate change for Hungary using ENSEM-BLES simulations. *Applied Ecology and Environmental Research* 9(4): 387–398. DOI: 10.15666/aeer/0904\_387398
232. Pongrácz R., Bartholy J., Pieczka I., Hunyady A. (2009): Estimation of regional climate change in the Carpathian basin using PRECIS simulations for A2 and B2 scenarios. In Proceedings of the EGU General Assembly Conference Abstracts, Vienna, Austria, 19–24 April 2009; p. 11794.
233. Post E., Pedersen C. (2008): Opposing plant community responses to warming with and without herbivores. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 105: 12353–12358. doi:10.1073/pnas.0802421105. PMID:18719116.
234. Prather RM et al. (2023): Current and lagged climate affects phenology across diverse taxonomic groups. *Proc. R. Soc. B* 290: 20222181. <https://doi.org/10.1098/rspb.2022.2181>
235. Prevéy J. S., Seastedt T. R. (2014): Seasonality of precipitation interacts with exotic species to alter composition and phenology of a semi-arid grassland. *Journal of Ecology*, 102: 1549–1561. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12320>
236. Price M.V., Waser N.M. (1998): Effects of experimental warming on plant reproductive phenology in a subalpine meadow. *Ecology* 79: 1261–1271
237. Primack D, Imbres C, Primack RB, Miller-Rushing AJ, Del Tredici P. (2004): Herbarium specimens demonstrate earlier flowering times in response to warming in Boston. *American Journal of Botany* 91: 1260–1264
238. Primack R.B., Ellwood E.R., Gallinat A.S., Miller-Rushing A.J. (2021): The growing and vital role of botanical gardens in climate change research. *New Phytol*, 231: 917–932. <https://doi.org/10.1111/nph.17410>
239. Primack RB, Miller-Rushing AJ. (2009): The role of botanical gardens in climate change research. *New Phytol.*;182(2):303-313. doi: 10.1111/j.1469-8137.2009.02800.x.
240. Primack RB. (1987): Relationships among flowers, fruits, and seeds. *Annual Review of Ecology and Systematics* 18: 409–430.
241. Puchałka R., Klisz M., Koniakin S., Czortek P., Dylewski Ł., Paż-Dyderska S., Vítková M., Sádlo J., Rašomavičius V., Čarni A., De Sanctis M., K. Dyderski M. K. (2022): Citizen science helps predictions of climate change impact on flowering phenology: A study on *Anemone nemorosa*, *Agricultural and Forest Meteorology*, Volume 325, 2022, 109133, ISSN 0168-1923, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109133>.
242. Puchałka R., Paż-Dyderska S., Dylewski Ł., Czortek P., Vítková M., Sádlo J., Klisz M., Koniakin S., Čarni A., Rašomavičius V., De Sanctis M., Dyderski M. K. (2023): Forest herb species with similar European geographic ranges may respond differently to climate change, *Science of The Total Environment*, 905: 167303, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167303>.
243. Qiu T, Song C, Zhang Y, Liu H, Vose JM. (2020): Urbanization and climate change jointly shift land surface phenology in the northern mid-latitude large cities. *Remote Sensing of Environment* 236: 111477.
244. R Core Team (2022) R. A Language and Environment for Statistical Computing; R Foundation for Statistical Computing: Vienna, Austria, Available online: <http://www.R-project.org/> (hozzásférés: 2023. március 15.)
245. Rafferty NE, CaraDonna PJ, Bronstein JL. (2015): Phenological shifts and the fate of mutualisms. *Oikos*. Jan 1;124(1):14-21. doi: 10.1111/oik.01523. PMID: 25883391; PMCID: PMC4396844.



246. Ramírez N. (2002): Reproductive phenology, life-forms, and habitats of the Venezuelan Central Plain. *Am. J. Bot.*, 89: 836-842. <https://doi.org/10.3732/ajb.89.5.836>
247. Rasztoivits E., Berki I., Mátyás Cs., Czimber K., Pötzelsberger E., Móricz N. (2014): The incorporation of extreme drought events improves models for beech persistence at its distribution limit. *Annals of Forest Science* 71: 201–210. DOI: 10.1007/s13595-013-0346-0
248. Rathcke B, Lacey E P, (1985): Phenological Patterns of Terrestrial Plants. *Annual Review of Ecology and Systematics* 16:1, 179-214
249. Raunkiær C. (1934): The life forms of plants and statistical plant geography. *Clarendon Press*, Oxford, UK.
250. Reaumur R. D. (1735): Observation du thermometer, faites à Paris pendant l'année 1735, compares avec celles qui ont été faites sous la ligne, à l'Isle de France, à Alger et en quelques-unes de nos isles de l'Amérique. Paris: Mémoires De L'académie Des Sciences.
251. Renner S. S., Zohner C. M. (2018): Climate change and phenological mismatch in trophic interactions among plants, insects, and vertebrates. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 49: 165–182. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110617-062535>
252. Renner SS, Chmielewski FM. (2022): The International Phenological Garden network (1959 to 2021): its 131 gardens, cloned study species, data archiving, and future. *Int J Biometeorol.* 2022 Jan;66(1):35-43. doi: 10.1007/s00484-021-02185-y
253. Renner SS, Wesche M, Zohner CM. (2021): Climate data and flowering times for 450 species from 1844 deepen the record of phenological change in southern Germany. *Am J Bot.* 108(4):711-717. doi: 10.1002/ajb2.1643. PMID: 33901306.
254. Réthly A., (1936): Hungary's participation in the international study of phenology. *Erdészeti Lapok*, 75: 1029–1038 (in Hungarian).
255. Richardson A. D., Hufkens K., Milliman T., Aubrecht D. M., Furze M. E., Seyednasrollah B. Heiderman R. R. (2018): Ecosystem warming extends vegetation activity but heightens vulnerability to cold temperatures. *Nature*, 560: 368–371.
256. Richardson A. D., Keenan T. F., Migliavacca M., Ryu Y., Sonnentag O., Toomey M. (2013): Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system. *Agricultural and Forest Meteorology*, 169: 156–173. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.09.012>
257. Richardson A.D., Bailey A.S., Denny E.G., Martin C.W., O'keefe, J. (2006): Phenology of a northern hardwood forest canopy. *Global Change Biology*, 12: 1174-1188. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01164.x>
258. Richardson AD, Hollinger DY, Dail DB, Lee JT, Munger JW, O'keefe J (2009): Influence of spring phenology on seasonal and annual carbon balance in two contrasting New England forests. *Tree Physiology*, 29: 321–331.
259. Root T. L., Schneider S. H. (1993): Can large-scale climatic models be linked with multi-scale ecological studies? *Conservation Biology* 7:256–270.
260. Root T. L., Schneider S. H. (2006): Conservation and Climate Change: The Challenges Ahead. *Conservation Biology* 20, no. 3: 706–8. <http://www.jstor.org/stable/3879237>.
261. Root TL, Price JT, Hall KR, Schneider SH, Rosenzweig C, et al. (2003): Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature* 421: 57–60.
262. Rossi S., Isabel N. (2017): Bud break responds more strongly to daytime than night-time temperature under asymmetric experimental warming. *Global Change Biology*, 23: 446–454. <https://doi.org/10.1111/gcb.13360>
263. Rötzer T., Chmielewski F.-M. (2001): Phenological maps of Europe. *Climate Research*, 18(3): 249–257. <http://www.jstor.org/stable/24866760>.
264. Rötzer T., Wittenzeller M., Haeckel H., Nekovar J. (2000): Phenology in central Europe - differences and trends of spring phenophases in urban and rural areas. *Int. J. Biometeorol.* 44: 60–66. <https://doi.org/10.1007/s004840000062>
265. RStudio Team (2023). RStudio: Integrated Development for R; RStudio Inc.: Boston, FL, USA, 2015; Online elérési út: <http://www.rstudio.com/> (hozzásférés: 2023. március 15.)
266. Sakkir S., Shah J.N., Cheruth A.J. et al. (2015): Phenology of desert plants from an arid gravel plain in eastern United Arab Emirates. *J. Arid Land* 7: 54–62 <https://doi.org/10.1007/s40333-014-0036-2>

267. Salguero-Gomez R, Siewert W, Casper BB, Tielbörger K. (2012): A demographic approach to study effects of climate change in desert plants. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 367: 3100–3114.
268. Salomón R.L., Peters R.L., Zweifel R. et al. (2022): The 2018 European heatwave led to stem dehydration but not to consistent growth reductions in forests. *Nat. Commun* 13: 28 <https://doi.org/10.1038/s41467-021-27579-9>
269. Sargent RD, Ackerly DD (2008): Plant-pollinator interactions and the assembly of plant communities. *Trends in Ecology & Evolution*, 23: 123–130.
270. Schermer É., Bel-Venner M.-C., Gaillard J.-M., Dray S., Boulanger V., Le Roncé I., Oliver G., Chuine I., Delzon S., Venner, S. (2020): Flower phenology as a disruptor of the fruiting dynamics in temperate oak species. *New Phytol*, 225: 1181-1192. <https://doi.org/10.1111/nph.16224>
271. Schieber B, Janík R, Snopková Z. (2009): Phenology of four broad-leaved forest trees in a submountain beech forest. *J. For. Sci.* 55(1):15-22. doi: 10.17221/51/2008-JFS.
272. Schmidt G., Sipos A., Penksza K. (szerk.) (2002): A Szent István Egyetem kertjei. *Szent István Egyetem Kiadó, Gödöllő.* 99 p.
273. Schneider S. H. (2004): Abrupt nonlinear climate change, irreversibility and surprise. *Global Environmental Change* 14:245–258.
274. Schnelle F (1955): Pflanzen-Phänologie, Akademische Verlagsgesellschaft. *Geest és Portig, Leipzig*
275. Schnelle F., Volkert E. (1974): International Phenological Gardens in Europe The Basic Network for International Phenological Observations. In: Lieth, H. (Szerk.) Phenology and Seasonality Modeling. Ecological Studies, vol 8. *Springer, Berlin, Heidelberg.* [https://doi.org/10.1007/978-3-642-51863-8\\_32](https://doi.org/10.1007/978-3-642-51863-8_32)
276. Schwartz M. D., Beaubien E. G., Crimmins T. M., Weltzin J. F. (2013): North America (Chapter 5). In: Schwartz MD (Szerk.): Phenology: An Integrative Environmental Science. *Springer Science+Business Media B.V. Dordrecht*, 2nd Edition, 67-91 p.
277. Schwartz M. D. (2013): Introduction (Chapter 1). In: Schwartz MD (Szerk.): Phenology: An Integrative Environmental Science. Springer Science+Business Media B.V. Dordrecht, Berlin/Heidelberg, Germany 2nd Edition, Volume 1, pp. 1–5.
278. Schwartz M.D., Ahas R., Aasa A. (2006): Onset of spring starting earlier across the Northern Hemisphere. *Global Change Biology*, 12: 343-351. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.01097.x>
279. Schwartz M.D., Reiter, B.E. (2000): Changes in North American spring. *Int. J. Climatol.*, 20: 929-932. [https://doi.org/10.1002/1097-0088\(20000630\)20:8<929::AID-JOC557>3.0.CO;2-5](https://doi.org/10.1002/1097-0088(20000630)20:8<929::AID-JOC557>3.0.CO;2-5)
280. Segrestin J, Navas ML, Garnier E. (2020): Reproductive phenology as a dimension of the phenotypic space in 139 plant species from the Mediterranean. *New Phytologist* 225: 740–753.
281. Sheley R.L., Mangold J.M., Anderson J.L. (2006): Potential for successional theory to guide restoration of invasive-plant-dominated rangeland. *Ecological Monographs* 76: 365-379.
282. Sherry R.A., Zhou X., Gu S., Arnone J.A., Schimel D.S. Verburg P.S., Wallace L.L., Luo Y. (2007): Divergence of reproductive phenology under climate warming. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 104: 198–202.
283. Shin N., Saitoh T. M., Takeuchi Y., Miura T., Aiba M., Kurokawa H., Onoda Y., Ichii K., Nasahara K. N., Suzuki R., Nakashizuka T., Muraoka H. (2023): Review: Monitoring of land cover changes and plant phenology by remote-sensing in East Asia. *Ecological Research*, 38( 1): 111–133. <https://doi.org/10.1111/1440-1703.12371>
284. Shirreffs D.A. (1985): Biological flora of the British Isles: *Anemone nemorosa* L. *J. Ecol.* 73: 1005–1020.
285. Škvareninová J. et al. (2017): Effects of light pollution on tree phenology in the urban environment. *Morav. Geogr. Rep.* 25: 282–290.
286. Snopková Z., Hýrošová T. (2017): Snow cover and its influence on the beginning of flowering of snowdrop (*Galanthus nivalis* L.) at the international phenological station (gpm) in Banská Bystrica over the period from 2003 to 2017 In *Snow an ecological phenomenon*, Smolenice, Slovakia, 19th – 21st September 2017

287. Somogyi Z. (2016): Projected effects of climate change on the carbon stocks of European beech (*Fagus sylvatica* L.) forests in Zala County, Hungary. *Lesnícky časopis - Forestry Journal* 62: 3–14. DOI: 10.1515/forj-2016-0001
288. Somogyi Z. (2018): A klímaváltozás miatti fapusztulás tovább gyorsíthatja a klímaváltozást. *Erdészettudományi Közlemények* 8(1): 213–228. DOI: 10.17164/EK.2018.013
289. Sparks T.H., Menzel A. (2002): Observed changes in seasons: An overview. *Int. J. Climatol.* 22: 1715–1725.
290. Sparks TH, Carey PD (1995): The responses of species to climate over two centuries: an analysis of the Marsham phenological record, 1736–1947. *J Ecol* 83:321–329
291. Sporbert M., Jakubka D., Bucher S.F., Hensen I., Freiberg M., Heubach K., König A., Nordt B., Plos C., Blinova I., Bonn A., Knickmann B., Koubek T., Linstädter A., Mašková T., Primack R.B., Rosche C., Shah M.A., Stevens A.-D., Tielbörger K., Träger S., Wirth C., Römermann, C. (2022): Functional traits influence patterns in vegetative and reproductive plant phenology – a multi-botanical garden study. *New Phytol*, 235: 2199–2210. <https://doi.org/10.1111/nph.18345>
292. Springate D.A., Kover P.X. (2014): Plant responses to elevated temperatures: a field study on phenological sensitivity and fitness responses to simulated climate warming. *Glob Change Biol*, 20: 456–465. <https://doi.org/10.1111/gcb.12430>
293. Stenstrom A, Jonsdottir IS. (1997): Responses of the clonal sedge, *Carex bigelowii*, to two seasons of simulated climate change. *Glob. Change Biol*, 3:89–96
294. Stephens R. E., Sauquet H., Guerin G. R., Jiang M., Falster D., Gallagher R. V. (2022): Climate shapes community flowering periods across biomes. *Journal of Biogeography*, 49: 1205– 1218. <https://doi.org/10.1111/jbi.14375>
295. Stuble K. L., Bennion L. D., Kuebbing S. E. (2021): Plant phenological responses to experimental warming—A synthesis. *Global Change Biology*, 27: 4110– 4124. <https://doi.org/10.1111/gcb.15685>
296. Suttle K., Thomsen M. A., Power M. E. (2007): Species interactions reverse grassland responses to changing climate. *Science*, 315: 640–642. <https://doi.org/10.1126/science.1136401>
297. Sütöriné dr. Diószegi Magdolna, egyetemi adjunktus, PhD, Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Tájépítészeti, Településtervezési és Díszkertészeti Intézet, Dísznövénytermesztési és Dendrológiai Tanszék
298. Szabó B, Vincze E, Czúcz B (2016): Flowering phenological changes in relation to climate change in Hungary. *Int J Biometeorol.* 60(9):1347-56. doi: 10.1007/s00484-015-1128-1. Epub 2016 Jan 14. PMID: 26768142.
299. Szirmai O., Horel J., Neményi A., Pándi I., Gyuricza Cs., Czóbel Sz. (2014): Overview of the collections of the first agrobotanical garden of Hungary. *Hungarian Agricultural Research* 23: 19–25.
300. Tanino KK, Kalcsits L, Silim S, Kendall E, Gray GR. (2010): Temperature-driven plasticity in growth cessation and dormancy development in deciduous woody plants: a working hypothesis suggesting how molecular and cellular function is affected by temperature during dormancy induction. *Plant Mol Biol.* 73(1-2):49-65. doi: 10.1007/s11103-010-9610-y.
301. Tarasjev A. (1997): Flowering phenology in natural populations of *Iris pumila*. *Ecography*, 20: 48–54. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.1997.tb00346.x>
302. Templ B, Koch E, Bolmgren K, Ungersböck M, Paul A, Scheifinger H, Rutishauser T, Busto M, Chmielewski FM, Hájková L, Hodzić S, Kaspar F, Pietragalla B, Romero-Fresneda R, Tolvanen A, Vučetič V, Zimmermann K, Zust A. (2018): Pan European Phenological database (PEP725): a single point of access for European data. *Int J Biometeorol.* 62(6):1109-1113. doi: 10.1007/s00484-018-1512-8. Epub 2018 Feb 18. PMID: 29455297.
303. Templ B., Templ M., Filzmoser P. et al. (2017): Phenological patterns of flowering across biogeographical regions of Europe. *Int J Biometeorol* 61: 1347–1358. <https://doi.org/10.1007/s00484-017-1312-6>
304. Thackeray SJ, Sparks TH, Frederiksen M, Burthe S, Bacon PJ, Bell JR et al. (2010): Trophic level asynchrony in rates of phenological change for marine, freshwater and terrestrial environments. *Global Change Biology*, 16: 3304–3313.
305. Thomas C. D. et al. (2004): Extinction risk from climate change. *Nature* 427:145–148.

306. Thomson JD. (2010): Flowering phenology, fruiting success and progressive deterioration of pollination in an early-flowering geophyte. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci.* 365(1555):3187-99. doi: 10.1098/rstb.2010.0115. PMID: 20819812; PMCID: PMC2981941.
307. Thuiller W, Lavorel S, Araújo MB, Sykes MT, Prentice IC (2005): Climate change threats to plant diversity in Europe. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 102(23):824 doi: 10.1073/pnas.0409902102. Epub 2005 May 26. PMID: 15919825; PMCID: PMC1140480.
308. Thuiller W. (2007): Climate change and the ecologist. *Nature* 448: 550–552 <https://doi.org/10.1038/448550a>
309. Tian F., Cai Z., Jin H., Hufkens K., Scheifinger H., Tagesson T., Smets B., Van Hoolst R., Bonte K., Ivits E., Tong X., Ardö J., Eklundh L. (2021): Calibrating vegetation phenology from Sentinel-2 using eddy covariance, PhenoCam, and PEP725 networks across Europe. *Remote Sensing of Environment*, 260, [112456]. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112456>
310. Tooke F, Battay NH. (2010): Temperate flowering phenology. *J Exp Bot.* 61(11):2853-62. doi: 10.1093/jxb/erq165. PMID: 20576790.
311. Traidl-Hoffmann C., Kasche A., Menzel A., Jakob T., Thiel M., Ring J., Behrendt H. (2003): Impact of pollen on human health: More than allergen carriers? *Intern Arch Allergy Immunol* 131:1–13
312. Tuba, Z., Szerdahelyi T., Engloner A., Nagy J. (Szerk.) (2007): Botanika II. Bevezetés a növénytanba, algológiába, gombatanba és a funkcionális növényökológiába RENDSZERTAN ISBN szám: NT-42644/II, *Nemzedékek Tudása Tankönyvkiadó*, 760 p.
313. Turcsányi G. (Szerk.) (1998): Mezőgazdasági növénytan, Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, 555 p.
314. Turisova I., Snopková Z., Škvareninová J. (2007): priestorová analýza nástupu začiatku kvitnutia convallaria majalis l. Na strednom slovensku. 114: 978-80.
315. Tylianakis J. M., Didham R. K., Bascompte J., Wardle D. A. (2008): Global change and species interactions in terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 11: 1351–1363. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01250.x>
316. Újszövetségi Szentírás (1985), Dr. Gál Ferenc fordításában, *Szent István Társulat Könyvkiadó*, Budapest, Második Kiadás
317. Vacek Z, Vacek S, Cukor J. (2023): European forests under global climate change: Review of tree growth processes, crises and management strategies. *J Environ Manage.* 332:117353. doi: 10.1016/j.jenvman.2023.117353. Epub 2023 Jan 28. PMID: 36716544.
318. Van der Putten, W. H., Macel M., Visser M. E. (2010): Predicting species distribution and abundance responses to climate change: why it is essential to include biotic interactions across trophic levels. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 365:2025–2034.
319. Vander Mijnsbrugge K., Malanguis J.M., Moreels S., Turcsán, A., Van der Schueren N., Notivol Paino E. (2022b): Direct Phenological Responses but Later Growth Stimulation upon Spring and Summer/Autumn Warming of *Prunus spinosa* L. in a Common Garden Environment. *Forests*, 13: 23, <https://doi.org/10.3390/f13010023>
320. Vander Mijnsbrugge, K.; Malanguis, J.M.; Moreels, S.; Turcsán, A.; Paino, E.N. (2022a): Stimulation, Reduction and Compensation Growth, and Variable Phenological Responses to Spring and/or Summer–Autumn Warming in *Corylus* Taxa and *Cornus sanguinea* L. *Forests*, 13, 654. <https://doi.org/10.3390/f13050654>
321. Várallyay Gy. (2007): *Láng István - Csete László - Jolánkai Márton (szerk.): A globális klímaváltozás: hazai hatások és válaszok (A VAHAVA Jelentés). Agrokémia és Talajtan*, 56 (1). pp. 199-202. ISSN 0002-1873
322. Verbényiné Neumann K., Czóbel Sz. (2021): Comparative study of flowering phenology of selected plant life forms in urban and rural environments. Preliminary results, pp. 25-36 *Columella – Journal of Agricultural and Environmental Sciences* Vol. 8. No.1 (2021) p. 65, DOI: 10.18380/SZIE.COLUM.2021.8.1.25
323. Verbényiné Neumann K.; Baltazár T.; Saláta D.; Szirmai O.; Czóbel S. (2023): Comparative Study of the Phenology of Seven Native Deciduous Tree Species in Two Different Mesoclimatic Areas in the Carpathian Basin. *Forests*, 14(5):885. <https://doi.org/10.3390/f14050885>
324. Verbényiné Neumann K., Baltazár T., Meinhardt S., Szirmai O. (2023): A Comparative Study of the Flowering Phenology of Wild Growing Geophytes in Two Different Mesoclimatic Areas in the

- Carpathian Basin. *Review on Agriculture and Rural Development* 12 (1-2):3-14. <https://doi.org/10.14232/rard.2023.1-2.3-14>
325. Vitasse Y, Lenz A, Körner C. (2014): The interaction between freezing tolerance and phenology in temperate deciduous trees. *Front Plant Sci.* 5:541. doi: 10.3389/fpls.2014.00541. PMID: 25346748; PMCID: PMC4192447.
326. Vitasse Y., Francois C., Delpierre N., Dufrene E., Kremer A., Chuine I., Delzon S. (2011): Assessing the effects of climate change on the phenology of European temperate trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151: 969–980 <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.03.003>
327. Vitasse Y., Signarbieux C., Fu Y. H. (2018): Global warming leads to more uniform spring phenology across elevations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115: 1004–1008. <https://doi.org/10.1073/pnas.1717342115>
328. Walkovszky A (1998): Changes in phenology of the locust tree (*Robinia pseudoacacia* L.) in Hungary. *Int J Biometeorol* 41:155–160 <https://doi.org/10.1007/s004840050069>
329. Wang H., Ge Q., Rutishauser T., Dai Y., Dai, J. (2015): Parameterization of temperature sensitivity of spring phenology and its application in explaining diverse phenological responses to temperature change. *Sci. Rep.*, 5:8833.
330. Wang S., Wu Z., Gong Y. *et al.* (2022): Climate warming shifts the time interval between flowering and leaf unfolding depending on the warming period. *Sci. China Life Sci.* 65: 2316–2324. <https://doi.org/10.1007/s11427-022-2094-6>
331. Wesolowski T, Rowinski P. (2006): Timing of bud burst and tree-leaf development in a multispecies temperate forest. *Forest Ecology and Management* 237: 387–393.
332. White MA, Nemani RR, Thornton PE, Running SW. (2002): Satellite evidence of phenological differences between urbanized and rural areas of the eastern United States deciduous broadleaf forest. *Ecosystems* 5: 260–273.
333. Wickham H. (2016): *Ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*; Springer: New York, NY, USA, 213p.
334. Wickham H., Averick M., Bryan J., Chang W., McGowan L., François R., Grolemund G., Hayes A., Henry L., Hester J. *et al.* (2019): Welcome to the tidyverse. *J. Open Source Softw.* 4: 1686.
335. Wickham H., Francois R., Henry L., Müller K., Vaughan D. (2023) *dplyr: A Grammar of Data Manipulation*. R Package Version 1.1.0. 2023. Online elérési út: <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr> (hozzásférés: 2023. március 15.).
336. Wickham H., Seidel D. (2022): *Scales: Scale Functions for Visualization*. R Package Version 1.2.1. 2022. Online elérési út: <http://CRAN.R-project.org/package=scales> (hozzásférés: 2023. március 15.)
337. Willis C. G., B. R. Ruhfel, R. B. Primack, A. J. Miller-Rushing, J. B. Losos, and C. C. Davis (2010): Favorable climate change response explains non-native species' success in Thoreau's woods. *PLoS ONE* 5(1):e8878.
338. Willis CG, Ruhfel B, Primack RB, Miller-Rushing AJ, Davis CC. (2008): Phylogenetic patterns of species loss in Thoreau's woods are driven by climate change. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 105, 17 029–17 033. doi:10.1073/pnas.0806446105)
339. Wohlfahrt G, Tomelleri E, Hammerle A. (2019): The urban imprint on plant phenology. *Nat Ecol Evol.* 3(12):1668-1674. doi: 10.1038/s41559-019-1017-9. Epub 2019 Nov 11. PMID: 31712692; PMCID: PMC6882677.
340. Wolfe D. W., Schwartz M. D., Lakso A. N., Otsuki Y., Pool R. M., Shaulis N. J. (2005): Climate change and shifts in spring phenology of three horticultural woody perennials in northeastern USA. *International Journal of Biometeorology*, 49: 303–309. <https://doi.org/10.1007/s00484-004-0248-9>
341. Wolfe D.W., Schwartz M.D., Lakso A.N. (2005): Climate change and shifts in spring phenology of three horticultural woody perennials in northeastern USA. *Int J Biometeorol* 49: 303–309 <https://doi.org/10.1007/s00484-004-0248-9>
342. Wolkovich E, Donahue MJ (2021): How phenological tracking shapes species and communities in nonstationary environments. *Biol. Rev.* 96: 2810–2827. doi:10.1111/brv.12781
343. Wolkovich E.M., Cook B.I., Allen J.M., Crimmins T.M., Betancourt J.L., Travers S.E., Pau S., Regetz J., Davies T.J., Kraft N.J.B. *et al.* (2012): Warming experiments underpredict plant phenological responses to climate change. *Nature* 485: 494–497.

344. Wolkovich E.M., Cook B.I., Davies T.J. (2014): Progress towards an interdisciplinary science of plant phenology: building predictions across space, time and species diversity. *New Phytol*, 201: 1156-1162. <https://doi.org/10.1111/nph.12599>
345. Wolkovich E.M., Ettinger A.K. (2014): Back to the future for plant phenology research. *New Phytol*, 203: 1021-1024. <https://doi.org/10.1111/nph.12957>
346. Wookey PA, Parsons AN, Welker JM, Potter J, Callaghan TV, et al. (1993): Comparative responses of phenology and reproductive development to simulated environmental changes. *Oikos* 67:490–502
347. World Meteorological Organization, Commission for Agricultural Meteorology: Ed (2000): Report of the RA VI Working Group on Agricultural Meteorology. CAgM report No. 82, WMO/TD No. 1022
348. Wright H. E., Kutzbach J. E., Webb T., Ruddiman W. E, Street-Perrott F. A., Bartlein P. J. (Szerk.) (1993): Global climates since the last glacial maximum. University of Minnesota Press, Minneapolis.
349. Wu C. et al. (2018): Contrasting responses of autumn-leaf senescence to daytime and night-time warming. *Nat. Clim. Change* 8: 1092–1096
350. Xiaoqiu Chen (2013) East Asia (Chapter 2). In: Schwartz MD (Szerk.): Phenology: An Integrative Environmental Science. Springer Science+Business Media B.V. Dordrecht, 2nd Edition, 28-42 p.
351. Xie Y., Wang X., Wilson A. M., Silander J. A. (2018): Predicting autumn phenology: How deciduous tree species respond to weather stressors, *Agricultural and Forest Meteorology*, Volumes 250–251, 2018, Pages 127-137, ISSN 0168-1923, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.12.259>.
352. Xing T., Lan G., Weihan W., Wen Z., Jing W., Jingru W., Linke L., Qiang Z., Honghai L., Yun L. (2022): Modelling alteration of leaf coloration peak date in *Cotinus coggygia* in a high-elevation karst region, *Agricultural and Forest Meteorology*, 323: 109044, ISSN 0168-1923, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109044>
353. Yang L. H., Rudolf V. (2010): Phenology, ontogeny and the effects of climate change on the timing of species interactions. *Ecology Letters*, 13: 1–10. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01402.x>
354. Yao R., Wang L., Huang X., Guo X., Niu Z., Liu H. (2017): Investigation of Urbanization Effects on Land Surface Phenology in Northeast China during 2001–2015. *Remote Sens.* 9: 66. <https://doi.org/10.3390/rs9010066>
355. Yu H, Luedeling E, Xu J. (2010): Winter and spring warming result indelayed spring phenology on the Tibetan Plateau. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA* 107: 22151–22156.
356. Zani D., Crowther T. W., Mo L., Renner S. S., Zohner C. M. (2020): Increased growing-season productivity drives earlier autumn leaf senescence in temperate trees, *Science*, 370: 1066-1071, <https://doi.org/10.1126/science.abd8911>
357. Zar J.H. (1984): Biostatistical Analysis, 2nd ed.; Prentice-Hall Internattional: London, UK, 718p.
358. Zettlemoyer MA, Schultheis EH, Lau JA (2019): Phenology in a warming world: differences between native and non-native plant species. *Ecol Lett.* 22: 1253-1263. <https://doi.org/10.1111/ele.13290>
359. Zhang H., Yuan W., Liu S., Dong W. (2015): Divergent responses of leaf phenology to changing temperature among plant species and geographical regions. *Ecosphere* 6(12):250. <http://dx.doi.org/10.1890/ES15-00223.1>
360. Zhang XY, Friedl MA, Schaaf CB, Strahler AH (2004): Climate controls on vegetation phenological patterns in northern mid- and high latitudes inferred from MODIS data. *Global Change Bio* 10:1133–1145
361. Zhao Meifang, Peng Changhui, Xiang Wenhua, Deng Xiangwen, Tian Dalun, Zhou Xiaolu, Yu Guirui, He Honglin, and Zhao Zhonghui (2013): Plant phenological modeling and its application in global climate change research: overview and future challenges. *Environmental Reviews* 21(1): 1-14. <https://doi.org/10.1139/er-2012-0036>
362. Zhou LM, Tucker CJ, Kaufmann RK et al. (2001): Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999. *Journal of Geophisiology Research*, 106: 20069–20083.

363. Zhou Y. et al. (2022): Understanding urban plant phenology for sustainable cities and planet. *Nat. Clim. Chang.* 12: 302–304. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01331-7>
364. Ziska LH, Gebhard DE, Frenz DA, Faulkner S, Singer BD, Straka J (2003): Cities as harbingers of climate change: Common ragweed, urbanization, and public health. *J Allergy Clin Immunol* 111:290–295
365. Zohner CM, Mo L, Renner SS. (2018): Global warming reduces leaf-out and flowering synchrony among individuals. *Elife*. 7:e40214., doi: 10.7554/eLife.40214.
366. Zubtsova T.V., Ostapko V.M., Mulenkova E.G. (2002): Influence of meteorologic conditions on the dynamics of *Anemone ranunculoides* (L.) Holub phenologic development. *Ind. Bot.* 5: 157–161

### Elektronikus hivatkozások:

367. http1 = [https://hu.wikipedia.org/wiki/P%C3%A1rizsi\\_%C3%A9ghajlatv%C3%A9delmi\\_egyezm%C3%A9ny](https://hu.wikipedia.org/wiki/P%C3%A1rizsi_%C3%A9ghajlatv%C3%A9delmi_egyezm%C3%A9ny) (hozzáférés 2023. augusztus 30.)
368. http2 = [https://hu.wikipedia.org/wiki/%C3%89ghajlatv%C3%A1ltoz%C3%A1si\\_Korm%C3%A1nyk%C3%B6zi\\_Test%C3%BClet](https://hu.wikipedia.org/wiki/%C3%89ghajlatv%C3%A1ltoz%C3%A1si_Korm%C3%A1nyk%C3%B6zi_Test%C3%BClet) (hozzáférés 2023. augusztus 30.)
369. http3 = [https://lechnerkozpont.hu/doc/corine/CountrySketch2012\\_Magyarország\\_HU.pdf](https://lechnerkozpont.hu/doc/corine/CountrySketch2012_Magyarország_HU.pdf) (hozzáférés 2023. augusztus 30.)
370. http4= [https://de.wikipedia.org/wiki/Egon\\_Ihne](https://de.wikipedia.org/wiki/Egon_Ihne) (hozzáférés 2023. augusztus 30.)
371. http5 = [https://de.wikipedia.org/wiki/Hermann\\_Hoffmann\\_\(Botaniker\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Hermann_Hoffmann_(Botaniker)) (hozzáférés 2023. augusztus 30.)
372. http6= <http://www.zamg.ac.at/pep725/> (hozzáférés 2023. augusztus 30.)
373. http7= <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=NL2012053944> (hozzáférés 2023. augusztus 30.)
374. http8= <http://www.pep725.eu/> (hozzáférés 2023. augusztus 30.)
375. http9= [www.usa-npn.org](http://www.usa-npn.org) (hozzáférés 2023. augusztus 30.)
376. http10= [www.budburst.org](http://www.budburst.org) (hozzáférés 2023. augusztus 30.)
377. http11 = [www.inaturalist.org](http://www.inaturalist.org) (hozzáférés 2023. augusztus 30.)
378. http12 = <http://www.kvmkl.hu/aktualis-tarlataink/a-szolo-jovesnek-konyve> (hozzáférés 2023. augusztus 30.)
379. http13 = <https://vadonleso.hu/fajok> (hozzáférés 2023. augusztus 30.)
380. http14 = <http://ipg.hu-berlin.de/> (hozzáférés 2023. augusztus 30.)
381. http15= <https://www.agrar.hu-berlin.de/de/institut/departments/dntw/agrarmet/phenology> (hozzáférés 2023. augusztus 30.)
382. http16 = <https://www.idiv.de/en/phenobs.html> (hozzáférés 2023. augusztus 30.)
383. http17= <https://idata.idiv.de/ddm/Data/ShowData/1877?version=0> (hozzáférés 2023. augusztus 30.)
384. http18= <http://gpm.hu-berlin.de/> (hozzáférés 2023. augusztus 30.)
385. http19= <http://botanikuskert.szie.hu/kerttortenet> (hozzáférés 2023. augusztus 30.)
386. http20= <https://uwm.edu/biometeorology/about/> (hozzáférés 2023. augusztus 30.)
387. http21= <https://termeszetvedelem.hu/az-elohelyvedelmi-iranyelv-17-cikke-alapjan-keszített-orszagjelentes-2019/>

# 9. MELLÉKLETEK

## 1. melléklet: A vizsgált növényfajok összesítő jellemzése

Faj	Család	Származás	Flóraelem	Virág	Termés	Virágzás	Egyéb
<i>Cornus sanguinea</i>	<i>Cornaceae</i>	Őshonos	SME	Ernyő	Bogyó	V-VI	
<i>Cotinus coggygria</i>	<i>Anacardiaceae</i>	Őshonos	PoM	Buga	Csonthéjas	V-VI	
<i>Cerasus fruticosa</i>	<i>Rosaceae</i>	Őshonos	PON	Csoportokban	Csonthéjas	IV-V	
<i>Prunus spinosa</i>	<i>Rosaceae</i>	Őshonos	EUR	Magános	Csonthéjas	IV	
<i>Ligustrum vulgare</i>	<i>Oleaceae</i>	Őshonos	AsM	Összetett fűt	Bogyó	V-VII	mérgező
<i>Amygdalus nana</i>	<i>Rosaceae</i>	Őshonos	PON	Magános	Csonthéjas	IV-V	védett
<i>Rosa spinosissima</i>	<i>Rosaceae</i>	Őshonos	EUA	Magános	Aszmag áltermés	IV-V	
<i>Dianthus plumarius</i>	<i>Caryophyllaceae</i>	Őshonos	PAN	Magános	Toktermés	V-VI	védett, itt: kertészeti változat
<i>Sedum album</i>	<i>Crassulaceae</i>	Őshonos	SME	Bogernyő	Tüszőtermés	VI-VII	
<i>Vinca minor</i>	<i>Apocynaceae</i>	Őshonos	SME	Magános	Ikertüsző	IV-V	
<i>Thymus vulgaris</i>	<i>Lamiaceae</i>	Adventív (Ny- Mediterrán, sziklakerti, kivadulhat)	ADV	Álörv emeletekből álló összetett, alján szaggyalított füzér	Makkocska	V-X	
<i>Cerastium tomentosum</i>	<i>Caryophyllaceae</i>	Adventív (D- Olaszorsz., sziklakerti, kivadulhat)		Álernyővirágzat	Toktermés	V-VII	
<i>Globularia cordiflora</i>	<i>Globulariaceae</i>	Őshonos	ALB	Fejecske		V-VII	védett
<i>Euphorbia epithymoides</i>	<i>Euphorbiaceae</i>	Őshonos	PaB	Magános cyathiumok	Toktermés	IV-VI	
<i>Ajuga reptans</i>	<i>Lamiaceae</i>	Őshonos	EUR	Hengeres fűzés	Makkocska	IV-VI	
<i>Inula ensifolia</i>	<i>Asteraceae</i>	Őshonos	PoP	Magános (fészek)	Kaszattermés	VI-VIII	
<i>Sedum acre</i>	<i>Crassulaceae</i>	Őshonos	EUR	Magános	Tüszőtermés	V-VII	



<i>Briza media</i>	<i>Poaceae</i>	Őshonos	KOZ	Laza buga	Szemtermés	V-VI	
<i>Iris pumila</i>	<i>Iridaceae</i>	Őshonos	PoP	Magános	Tokszerű áltermés	IV-V	védett
<i>Polygonatum multiflorum</i>	<i>Asparagaceae</i>	Őshonos	EUA	Csomó	Bogyó	V-VI	mérgező
<i>Convallaria majalis</i>	<i>Liliaceae</i>	Őshonos	EUR	Fürt	Bogyó	IV-V	mérgező
<i>Galanthus nivalis</i>	<i>Amarillydaceae</i>	Őshonos	CEU	Magános	Húsos tokszerű áltermés	II-IV	védett
<i>Eranthis hyemalis</i>	<i>Ranunculaceae</i>	Nem őshonos, 17. szd.-tól, kivadult, khg-inkben vadon előfordul	MED	Magános	Tüszőcsozor	II-III	védett
<i>Dipsacus pilosus</i>	<i>Dipsacaceae</i>	Őshonos	AsM	Fészekszerű virágzat	Kaszat áltermés	VII-IX	
<i>Dipsacus laciniatus</i>	<i>Dipsacaceae</i>	Őshonos	PoM	Fészekszerű virágzat	Kaszat áltermés	VII-IX	
<i>Capsella bursa- pastoris</i>	<i>Brassicaceae</i>	Archeofiton gyom	KOZ	Sátorozó virágzat	Becőketermés	III-XII	T1-es
<i>Malva sylvestris</i>	<i>Malvaceae</i>	Archeofiton gyom	KOZ	Bogas levélhónalji forgó	Papsajt	V-X	
<i>Hibiscus trionum</i>	<i>Malvaceae</i>	Archeofiton gyom	KOZ	Magános	Toktermés	VI-VIII	T4-es
<i>Solanum nigrum</i>	<i>Solanaceae</i>	Archeofiton gyom	KOZ	Forgóvirágzat	Bogyó	VI-X	T4-es
<i>Silene alba</i>	<i>Caryophyllaceae</i>	Archeofiton gyom	EUR	Áleryővirágzat	Toktermés	V-X	kétlaki, H3-as
<i>Portulaca oleracea</i>	<i>Portulacaceae</i>	Archeofiton gyom	KOZ	Levélhónalji magános	Toktermés	VII-IX	T4-es
<i>Consolida regalis</i>	<i>Ranunculaceae</i>	Archeofiton gyom	EUA	Laza buga	Tüsző	V-IX	T2-es
<i>Papaver rhoeas</i>	<i>Papaveraceae</i>	Archeofiton gyom	EUA	Magános	Toktermés	V-VII	T2-es

Forrás: Király, G. (szerk.), Balogh, Lajos & Kornél, Baráth & Barina, Zoltán & Bartha, Dénes & Márta, Bényeiné & Csiky, János & István, Dancza & Konstantin, Dobolyi & Géza, Facsar & Sándor, Farkas & A., Fischer & Király, Gergely & Lájér, Konrád & Mesterhazy, Attila & Molnár V., Attila & Anikó, Nagy & Németh, Csaba & László, Papp & Mária, Papp & Viktor, Virók. (2009) Új magyar fűvészkönyv. Magyarország hajtásos növényei. Határozókulcsok. / New Hungarian Herbal. The Vascular Plants of Hungary. Identification keys, Jósvafő: Aggteleki Nemzeti Park Igazgatóság, 616 p. és Borhidi, A., 1995: Social behaviour types, the naturalness and relative ecological indicator values of the higher plants in the Hungarian flora. Acta Botanica Hungarica 39, 97–181.

## 2. melléklet: A cserepekben használt talajkeverék vizsgálatának eredményei

Mintakód.	ö.Zn mg/kg	ö.Cu mg/kg	Cd mg/kg	Ni mg/kg	Pb mg/kg	Cr mg/kg	Hg mg/kg	As mg/kg
1	90,8	15,9	<0,30	12,8	41,2	16,3	0,13	7,27
2	89,2	16,2	<0,30	12,0	38,3	13,4	0,10	7,54
3	77,9	13,7	<0,30	13,1	34,2	17,8	0,10	6,84
4	80,4	13,7	<0,30	11,1	35,5	17,7	0,11	6,80
5	83,4	15,2	<0,30	12,6	37,3	18,4	0,12	7,28
Mintakód	pH-KCl	KA	Ca % (m/m)	CaCO <sub>3</sub> % (m/m)	Humusz % (m/m)	NO <sub>3</sub> -N + NO <sub>2</sub> -N mg/kg	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> mg/kg	K <sub>2</sub> O mg/kg
1	7,61	35	2,87	7,17	3,28	28,0	>700	302
2	7,61	35	2,85	7,12	3,61	28,4	>700	304
3	7,60	33	2,91	7,27	3,17	26,2	>700	380
4	7,60	31	3,01	7,52	3,16	23,5	>700	364
5	7,57	36	2,95	7,37	3,06	26,8	>700	382
Mintakód	Mg mg/kg	Na mg/kg	Zn mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Összsó % (m/m)	SO <sub>4</sub> -S mg/kg	Fe mg/kg
1	135	37	>10	2,89	21	<0,020	9,6	41
2	128	33	>10	2,86	19	<0,020	8,6	38
3	141	39	>10	3,02	20	<0,020	9,0	39
4	141	36	>10	3,02	19	<0,020	8,1	39
5	141	31	>10	3,08	20	<0,020	9,6	39

**A vizsgált paraméterek:** ö.Zn = összes cinktartalom, ö.Cu= összes réztartalom, Cd= kadmiumtartalom, Pb= ólomtartalom, Cr= krómtartalom, Hg= higanytartalom, As=arzéntartalom, pHKCl= kálium-klorid oldattal készített oldat kémhatása, KA= Arany-féle kötöttségi szám, Ca%= kalciumtartalom, CaCO<sub>3</sub>% = szénsavas mésztartalom, Humusz%= humusztartalom, NO<sub>3</sub>-N + NO<sub>2</sub>-N = nitrit-nitrát nitrogén-tartalom, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> =foszfor-pentoxid tartalom, K<sub>2</sub>O =kálium-oxid tartalom, Mg = magnéziumtartalom, Na = nátriumtartalom, Zn = cinktartalom, Cu= réztartalom, Mn= mangántartalom, Összsó = vízben oldható összes sótartalom, SO<sub>4</sub>-S = kéntartalom, Fe=vastartalom

### 3. melléklet: 2020. év összesített meteorológiai adatai

A 2020-as évre a budapesti helyszínhez használt meteorológiai adatok (lágymányosi OMSZ állomás)		
Lágymányos 2020	Átlaghőmérséklet (°C)	Csapadékösszeg (mm)
Január	0.50	9.7
Február	6.66	20.7
Március	8.30	33.8
Április	13.92	9.3
Május	15.84	9
Június	20.98	87.1
Július	23.02	67.8
Augusztus	24.04	82.4
Szeptember	19.50	28.7
Október	12.48	92.7
November	6.34	21.5
December	4.37	24.5
<b>Összesítés</b>	<b>13.00</b>	<b>477.5</b>

A 2020-as évre a gödöllői helyszínhez használt meteorológiai adatok (aszódi OMSZ állomás)		
Aszód 2020	Átlaghőmérséklet (°C)	Csapadékösszeg (mm)
Január	-1.08	13
Február	5.21	22
Március	6.74	17
Április	11.87	5.6
Május	14.30	25.2
Június	19.79	123.5
Július	21.50	63.6
Augusztus	22.78	68.8
Szeptember	17.81	31.3
Október	11.26	119.9
November	4.90	21.6
December	3.45	36.7
<b>Összesítés</b>	<b>11.54</b>	<b>535.2</b>

Forrás: OMSZ adatsor  
 Lágymányos: 44505-  
 ös számú  
 meteorológiai  
 állomás, Aszód  
 44214-es számú  
 meteorológiai állomás

#### 4. melléklet: 2021. év összesített meteorológiai adatai

Gödöllő 2021	Január	Február	Március	Április	Május	Június	Július	Augusztus	Szeptember	Október	November	December
Havi hőmérséklet átlag	0,95	1,97	5,66	8,39	13,37	21,82	23,44	19,6	16,59	9,71	5,16	0,91
Havi csapadék összeg	12,6	12,6	5,4	30,6	66,6	9,4	122,4	52,4	17,8	17,2	42,8	26,8
Fagyos napok száma	21	18	15	5	0	0	0	0	0	1	7	26
Trópusi éjszakák száma	0	0	0	0	0	4	3	0	0	0	0	0
Havi maximum hőmérséklet	12,36	19,09	21,34	23,84	28,12	36,36	35,64	33,39	29,06	23,61	14,41	14,05
Havi minimum hőmérséklet	-11,41	-13,17	-5,83	-3,04	2,59	6,34	13,41	7,83	4,27	-0,47	-3,24	-7,79
Évi fagyos napok száma	93	7	10,7	416,6								
	Évi trópusi éjszakák száma	Évi átlaghőm. (°C)	Évi csapadékösszeg (mm)									
<b>Budapest 2021</b>												
Havi hőmérséklet átlag	2,99	3,85	9,49	10,22	15,17	24,18	25,39	21,92	18,64	11,49	7,1	2,75
Havi csapadék összeg	12	40,2	3,8	46,4	75,2	12,8	146,4	44,6	21,2	19,2	51	33,8
Fagyos napok száma	12	8	8	1	0	0	0	0	0	0	2	15
Trópusi éjszakák száma	0	0	0	0	0	10	17	3	0	0	0	0
Havi maximum hőmérséklet	13,72	19,9	22,9	25,9	30,24	38,22	37,79	35,07	30,77	25,06	15,33	15,99
Havi minimum hőmérséklet	-6,29	-8,43	-2,75	-0,6	5,58	9,24	16,74	11,56	8,08	2,85	-0,49	-4,32
Évi fagyos napok száma	153,19	30	12,77	506,6								
	Évi trópusi éjszakák száma	Évi átlaghőmérs. (°C)	Évi csapadékösszeg (mm)									
<b>Gödöllő 2021</b>												
Havi páratartalom % átlag	88,51	84,43	59,86	65,40	69,94	60,74	64,99	72,49	69,86	74,01	89,36	88,60
Évi átlag 73.93 %												
<b>Budapest 2021</b>												
Havi páratartalom % átlag	78,44	74,21	54,16	57,90	62,31	51,39	56,16	61,73	61,28	67,36	79,78	78,47
Évi átlag 65.03 %												
Fagyos napok időszaka	Január	Február	Március	Április	Május	Június	Július	Augusztus	Szeptember	Október	November	December
Gödöllő 2021				04. 9-ig						10. 25-től		
Budapest 2021				04. 9-ig							11. 24-ig	
Trópusi éjszakák időszaka	Január	Február	Március	Április	Május	Június	Július	Augusztus	Szeptember	Október	November	December
Gödöllő 2021						06. 22-től	07. 27-ig					
Budapest 2021						06. 18-tól	08. 15-ig					

## 5. melléklet: 2022. év összesített meteorológiai adatai

Gödöllő 2022	Január	Február	Március	Április	Május	Június	Július	Augusztus	Szeptember	Október	November	December
Havi átlaghőmérséklet	0,91	4,55	6,08	9,27	17,04	21,93	23,51	23,35	15,12	12,43	6,19	1,51
Havi csapadék összeg	2,7	12,2	17,1	59	45,4	37,6	25,7	65,8	97,5	7	25,4	78
Fagyos napok száma	23	13	16	2	0	0	0	0	0	0	6	18
Trópusi éjszakák száma	0	0	0	0	0	2	4	3	0	0	0	0
Havi maximum hőmérséklet	13,94	12,95	21,42	20,57	29,89	36,39	37,77	35,8	29,24	21,44	18,02	12,49
Havi minimum hőmérséklet	-9,20	-3,62	-7,29	-3,53	5,67	10,5	11,12	14,01	3,83	1,92	-2,25	-7,28
Évi fagyos napok száma	Évi trópusi éjszakák száma	Évi átlaghőm. (°C)	Évi csapadékössz. (mm)									
78	9	11,82	473,4									
<b>Budapest 2022</b>												
Havi átlaghőmérséklet	2,76	6,44	7,87	11,32	19,49	24,06	25,35	25,16	16,85	13,88	8,19	3,29
Havi csapadék összeg	2,4	14,6	15,8	61,6	23,4	47,8	25	62,6	150,4	12,2	58,4	123,8
Fagyos napok száma	19	3	9	0	0	0	0	0	0	0	1	7
Trópusi éjszakák száma	0	0	0	0	1	5	14	17	0	0	0	0
Havi maximum hőmérséklet	15,99	14,35	23,36	22,78	31,8	37,23	38,62	36,86	29,8	22,67	18,44	9,19
Havi minimum hőmérséklet	-5,85	-1,08	-3,27	0,9	10,02	14,61	14,36	16,44	7,09	5,09	-0,37	-3,09
Évi fagyos napok száma	Évi trópusi éjszakák száma	Évi átlaghőm. (°C)	Évi csapadékössz. (mm)									
39	37	13,72	598									
<b>Gödöllő 2022</b>												
Havi páratartalom % átlag	77,69	69,50	48,74	66,32	62,64	59,59	49,73	62,48	78,01	83,94	97,95	93,61
Évi átlag 70,85 %												
<b>Budapest 2022</b>												
Havi páratartalom % átlag	67,87	62,71	45,22	58,79	53,44	52,80	45,42	55,82	69,86	76,49	90,47	82,06
Évi átlag 63,41 %												
<b>Fagyos napok időszaka</b>												
Gödöllő 2021				04. 4-ig							11. 19-től	
Budapest 2021			03. 14-ig								11. 21-ig	
<b>Trópusi éjszakák időszaka</b>												
Gödöllő 2021						06. 29-től		08. 29-ig				
Budapest 2021					05. 13-tól			08. 29-ig				

## 6. melléklet: A vizsgált Fanerofitonok regressziószámításának eredménytáblázata

A – A két helyszín együtt

Fenofázis/Ható tényező	r <sup>2</sup>	F-Statistika	n	a	b	Szignifikancia szint
<b>Rügyfakadás</b>						
Átlaghőmérséklet (Március–Április)	0.060	12.050	179	61.180	2.060	<0.001 ***
Csapadék (Március–Április)	0.120	25.220	179	72.170	0.260	<0.001 ***
Min. hőmérséklet (Március–Április)	0.030	3.370	114	85.610	1.090	0.07 .
Max. hőmérséklet (Március–Április)	0.010	1.000	114	61.860	0.880	0.32
Fagyos napok száma	0.220	31.430	114	91.390	-1.140	<0.001 ***
<b>Bimbózás</b>						
Átlaghőmérséklet (Március–Április–Május)	0.550	118.300	99	67.570	3.600	<0.001 ***
Csapadék (Március–Április–Május)	0.140	15.220	99	95.430	0.260	<0.001 ***
Min. hőmérséklet (Március–Április–Május)	0.520	86.860	83	108.590	2.910	<0.001 ***
Max. hőmérséklet (Március–Április–Május)	0.430	60.730	83	34.200	3.010	<0.001 ***
Number of frost days	0.430	60.070	83	114.190	-2.460	<0.001 ***
<b>Virágzás kezdete</b>						
Átlaghőmérséklet (Március–Június)	0.580	120.800	91	59.150	4.430	<0.001 ***
Csapadék (Március–Június)	0.010	0.610	91	131.300	-0.120	0.44
Min. hőmérséklet (Március–Június)	0.560	98.740	81	111.730	3.870	<0.001 ***
Max. hőmérséklet (Március–Június)	0.640	142.40	81	8.750	4.090	<0.001 ***
Fagyos napok száma (Március–Június)	0.360	45.210	81	135.990	-5.930	<0.001 ***
Trópusi éjszakák száma (Március–Június)	0.240	25.520	81	119.410	5.490	<0.001 ***
<b>Termések megjelenése</b>						
Átlaghőmérséklet (Május–Június)	0.370	44.750	78	86.000	3.380	<0.001 ***
Csapadék (Május–Június)	0.030	2.590	78	142.990	0.140	0.11
Min. hőmérséklet (Május–Június)	0.310	32.990	76	126.610	2.950	<0.001 ***
Max. hőmérséklet (Május–Június)	0.360	41.050	76	49.990	3.090	<0.001 ***
Trópusi éjszakák száma (Május–Június)	0.300	31.130	76	142.100	3.150	<0.001 ***
<b>Lombszíneződés kezdete</b>						

Átlaghőmérséklet (Július–Október)	0.780	664.800	195	362.110	-6.230	<0.001 ***
Csapadék (Július–Október)	0.170	39.190	195	227.510	0.350	<0.001 ***
Min. hőmérséklet (Július–Október)	0.570	172.800	130	279.580	-5.100	<0.001 ***
Max.hőmérséklet (Július–Október)	0.860	777.700	130	443.340	-6.300	<0.001 ***
Trópusi éjszakák száma (Július–Október)	0.320	61.240	130	243.770	-2.850	<0.001 ***

#### Lombhullás vége

Átlaghőmérséklet (November–December)	0.500	187.700	191	361.800	-6.040	<0.001 ***
Csapadék (November–December)	0.030	6.140	191	326.570	0.100	0.01 *
Min. hőmérséklet (November–December)	0.400	82.370	125	314.160	-4.610	<0.001 ***
Max.hőmérséklet (November–December))	0.500	124.100	125	373.220	-3.150	<0.001 ***
Fagyos napok száma (November–December)	0.350	65.860	125	315.130	1.550	<0.001 ***

+ statisztikailag szignifikáns különbség 10% szignifikancia szint mellett; \* statisztikailag szignifikáns különbség 5% szignifikancia szint mellett; \*\* statisztikailag szignifikáns különbség 1% szignifikancia szint mellett; \*\*\* statisztikailag szignifikáns különbség 0,1% szignifikancia szint mellett; trópusi éjszaka = napi minimum-hőmérséklet > 20 °C.

#### B – Budapest

Fenofázis/Ható tényező	r <sup>2</sup>	F-Statisztika	n	a	b	Szignifikancia szint
<b>Rügyfakadás</b>						
Átlaghőmérséklet (Március–Április)	0.020	2.200	96	57.600	1.950	0.14
Csapadék (Március–Április)	0.050	4.480	96	71.250	0.160	0.04 *
Min. hőmérséklet (Március–Április)	0.160	11.580	62	88.330	4.080	0.001 **
Max. hőmérséklet (Március–Április)	0.270	21.930	62	-109.360	8.040	<0.001 ***
Fagyos napok száma	0.210	16.120	62	92.020	-1.920	<0.001 ***
<b>Bimbózás</b>						
Átlaghőmérséklet (Március–Április–Május)	0.490	4.490	47	63.700	3.770	<0.001 ***
Csapadék (Március–Április–Május)	0.250	15.000	47	91.070	0.360	<0.001 ***
Min. hőmérséklet (Március–Április–Május)	0.490	36.040	40	105.440	3.150	<0.001 ***
Max. hőmérséklet (Március–Április–Május)	0.320	17.560	40	31.510	3.050	<0.001 ***
Number of frost days	0.560	48.410	40	114.850	-3.330	<0.001 ***
<b>Virágzás kezdete</b>						
Átlaghőmérséklet (Március–Június)	0.840	232.300	45	51.970	4.340	<0.001 ***
Csapadék (Március–Június)	0.002	0.090	45	119.560	0.050	0.76

Min. hőmérséklet (Március–Június)	0.820	180.900	41	100.230	4.120	<0.001 ***
Max. hőmérséklet (Március–Június)	0.890	317.300	41	-10.770	4.490	<0.001 ***
Fagyos napok száma (Március–Június)	0.410	27.500	41	130.550	-5.350	<0.001 ***
Trópusi éjszakák száma (Március–Június)	0.460	33.480	41	111.410	5.460	<0.001 ***

#### Termékek megjelenése

Átlaghőmérséklet (Május–Június)	0.380	21.930	38	74.140	3.910	<0.001 ***
Csapadék (Május–Június)	0.100	3.880	38	137.910	0.240	0.06 +
Min. hőmérséklet (Május–Június)	0.360	20.450	38	115.380	3.690	<0.001 ***
Max. hőmérséklet (Május–Június)	0.340	18.520	38	35.900	3.530	<0.001 ***
Trópusi éjszakák száma (Május–Június)	0.370	20.940	38	138.040	3.300	<0.001 ***

#### Lombszíneződés kezdete

Átlaghőmérséklet (Július–Október)	0.820	454.800	102	356.660	-5.670	<0.001 ***
Csapadék (Július–Október)	0.210	27.290	102	226.390	0.360	<0.001 ***
Min. hőmérséklet (Július–Október)	0.710	161.600	68	298.000	-5.790	<0.001 ***
Max. hőmérséklet (Július–Október)	0.900	596.800	68	446.770	-6.250	<0.001 ***
Trópusi éjszakák száma (Július–Október)	0.540	76.740	68	251.280	-2.860	<0.001 ***

#### Lombhullás vége

Átlaghőmérséklet (November–December)	0.650	191.400	103	371.720	-7.050	<0.001 ***
Csapadék (November–December)	0.001	0.200	103	333.560	0.020	0.66
Min. hőmérséklet (November–December)	0.720	168.200	68	313.620	-8.060	<0.001 ***
Max. hőmérséklet (November–December))	0.540	76.180	68	375.050	-3.210	<0.001 ***
Fagyos napok száma (November–December)	0.500	64.830	68	315.950	2.260	<0.001 ***

+ statisztikailag szignifikáns különbség 10% szignifikancia szint mellett; \* statisztikailag szignifikáns különbség 5% szignifikancia szint mellett; \*\* statisztikailag szignifikáns különbség 1% szignifikancia szint mellett; \*\*\* statisztikailag szignifikáns különbség 0,1% szignifikancia szint mellett; trópusi éjszaka = napi minimum-hőmérséklet > 20 °C.

#### C – Gödöllő

Fenofázis/Ható tényező	r <sup>2</sup>	F-Statistika	n	a	b	Szignifikancia szint
<b>Rügyfakadás</b>						
Átlaghőmérséklet (Március–Április)	0.440	64.190	83	46.920	4.730	<0.001 ***
Csapadék (Március–Április)	0.280	31.000	83	73.660	0.370	<0.001 ***
Min. hőmérséklet (Március–Április)	0.620	82.930	52	109.880	4.820	<0.001 ***



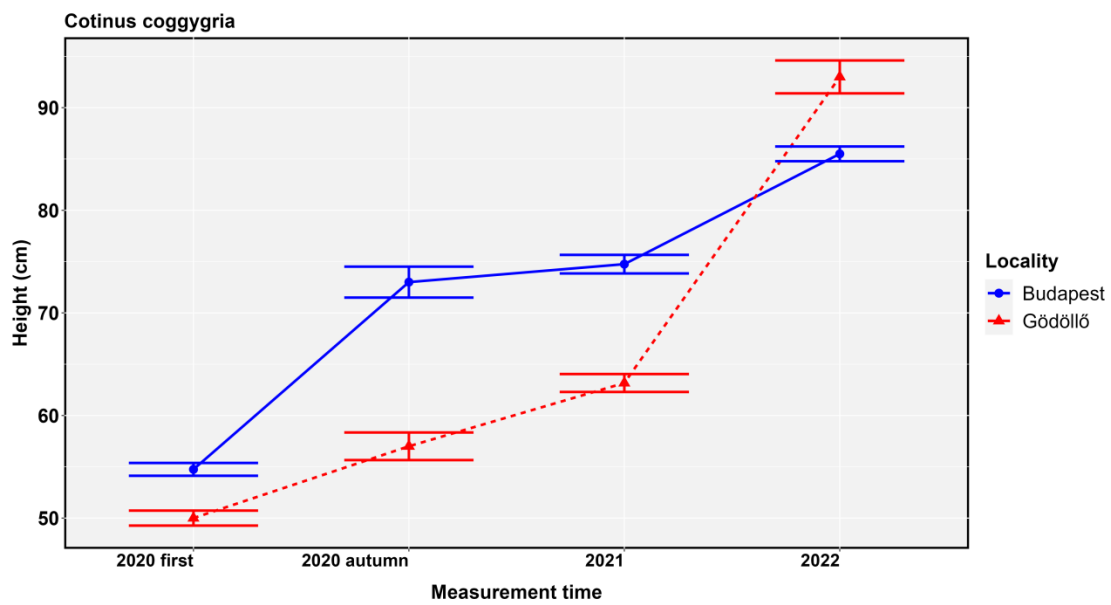
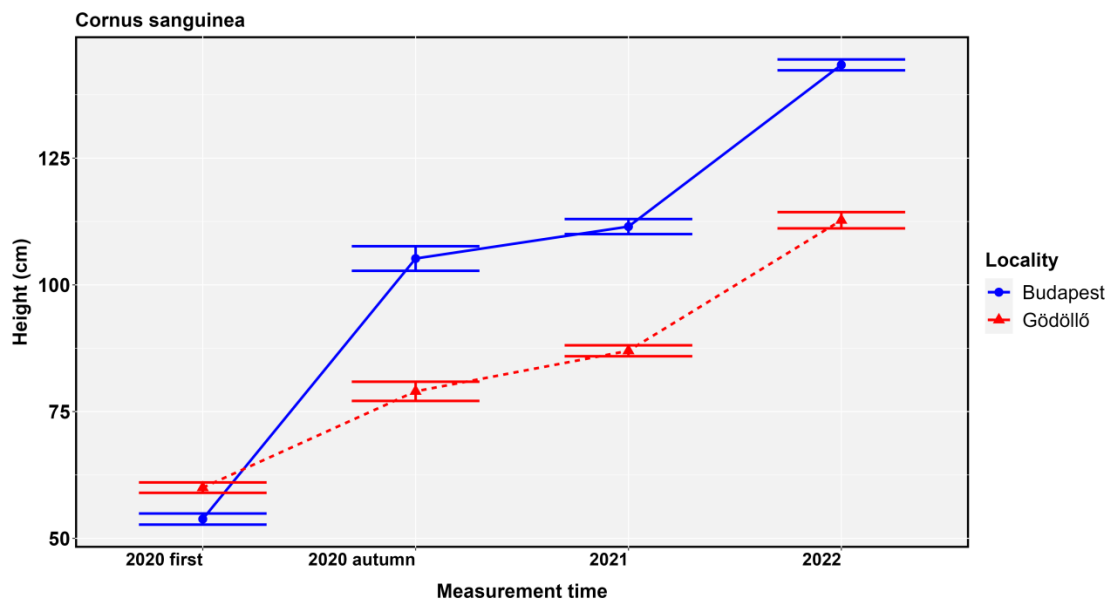
Max. hőmérséklet (Március–Április)	0.170	10.340	52	12.490	3.390	0.002 **
Fagyos napok száma	0.710	122.000	52	99.700	−1.370	<0.001 ***
<b>Bimbózás</b>						
Átlaghőmérséklet (Március–Április–Május)	0.630	86.640	52	69.000	3.640	<0.001 ***
Csapadék (Március–Április–Május)	0.060	3.250	52	99.180	0.170	0.08 +
Min. hőmérséklet (Március–Április–Május)	0.620	67.840	43	111.800	3.170	<0.001 ***
Max. hőmérséklet (Március–Április–Május)	0.560	52.700	43	32.290	3.160	<0.001 ***
Number of frost days	0.360	22.840	43	113.860	−2.040	<0.001 ***
<b>Virágzás kezdete</b>						
Átlaghőmérséklet (Március–Június)	0.520	48.510	46	59.770	4.950	<0.001 ***
Csapadék (Március–Június)	0.060	2.630	46	148.290	−0.420	0.11
Min. hőmérséklet (Március–Június)	0.580	51.580	40	120.110	4.700	<0.001 ***
Max. hőmérséklet (Március–Június)	0.560	49.340	40	18.950	4.000	<0.001 ***
Fagyos napok száma (Március–Június)	0.350	20.130	40	141.700	−6.660	<0.001 ***
Trópusi éjszakák száma (Március–Június)	0.230	11.290	40	123.950	10.120	0.002 **
<b>Termések megjelenése</b>						
Átlaghőmérséklet (Május–Június)	0.400	24.920	40	98.250	2.780	<0.001 ***
Csapadék (Május–Június)	0.090	3.870	40	161.280	−0.300	0.06 +
Min. hőmérséklet (Május–Június)	0.310	16.460	38	132.530	2.670	<0.001 ***
Max. hőmérséklet (Május–Június)	0.440	28.100	38	66.620	2.600	<0.001 ***
Trópusi éjszakák száma (Május–Június)	0.210	9.410	38	142.910	5.280	0.005 **
<b>Lombszíneződés kezdete</b>						
Átlaghőmérséklet (Július–Október)	0.850	502.900	93	388.460	−7.970	<0.001 ***
Csapadék (Július–Október)	0.090	8.940	93	228.580	0.330	0.003 **
Min. hőmérséklet (Július–Október)	0.880	446.400	62	290.010	−8.180	<0.001 ***
Max.hőmérséklet (Július–Október)	0.900	544.800	62	456.070	−6.870	<0.001 ***
Trópusi éjszakák száma (Július–Október)	0.790	228.200	62	252.400	−14.060	<0.001 ***
<b>Lombhullás vége</b>						
Átlaghőmérséklet (November–December)	0.450	69.010	88	352.510	−5.250	<0.001 ***
Csapadék (November–December)	0.140	13.630	88	313.340	0.390	<0.001 ***

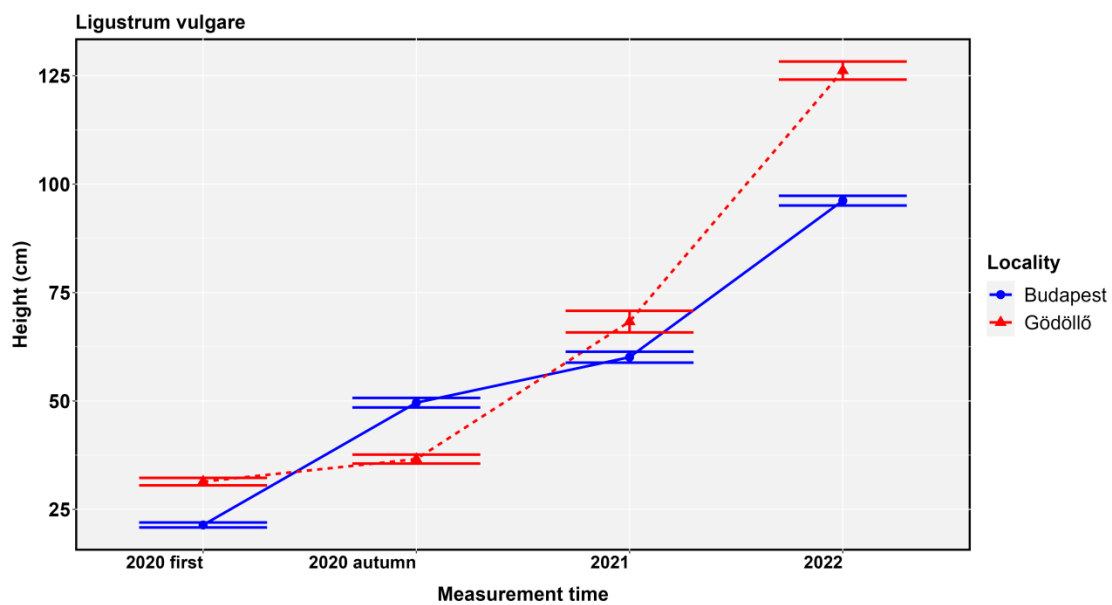
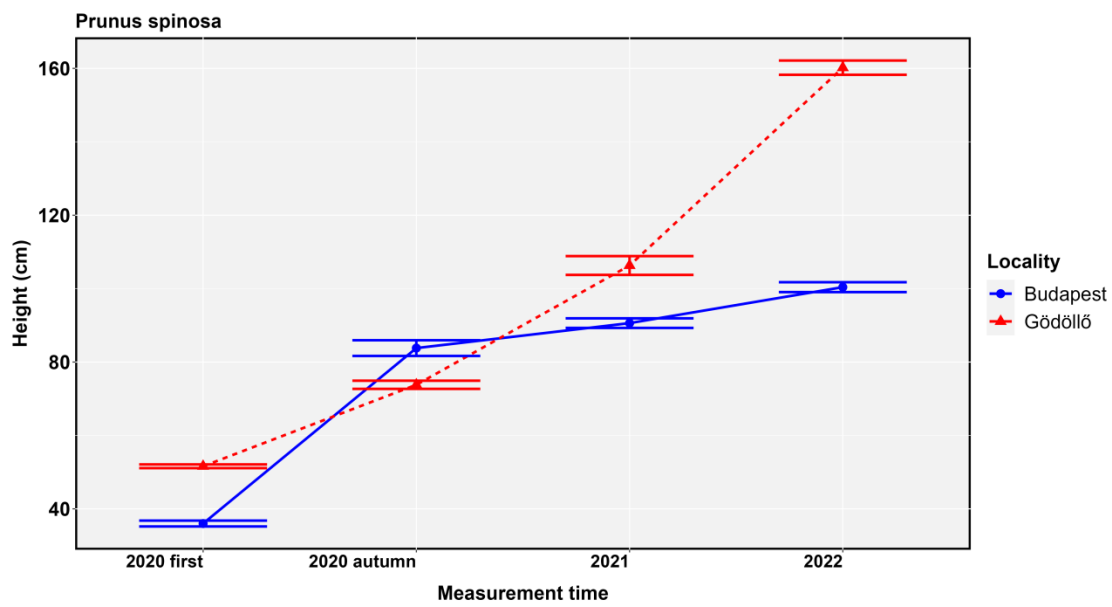
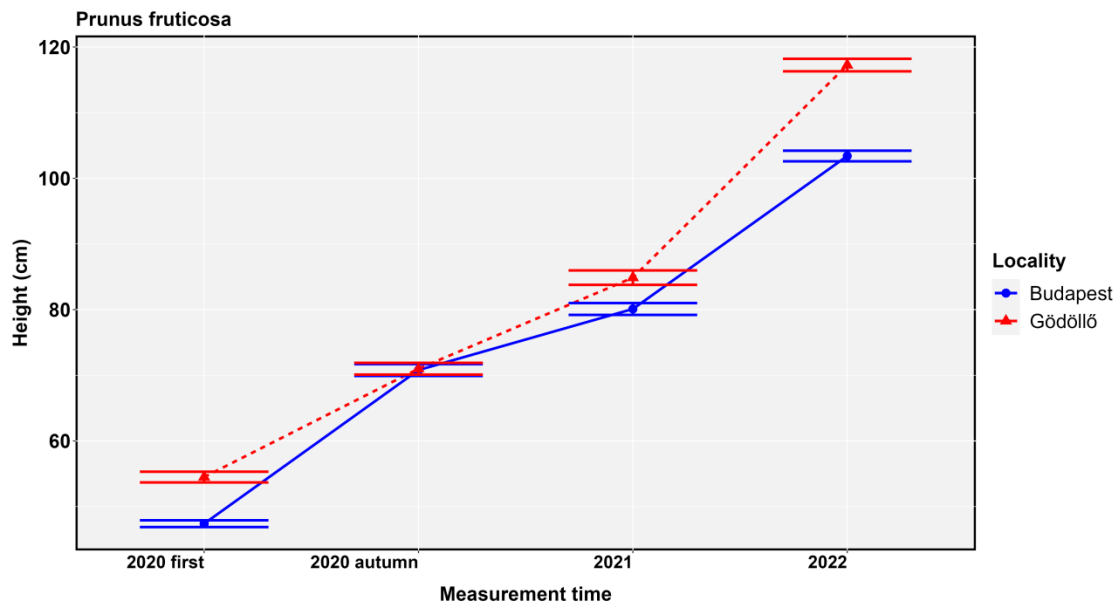
Min. hőmérséklet (November–December)	0.550	66.920	57	308.920	−4.120	<0.001 ***
Max.hőmérséklet (November–December))	0.360	31.390	57	365.810	−2.740	<0.001 ***
Fagyos napok száma (November–December)	0.480	50.190	57	311.050	1.370	<0.001 ***

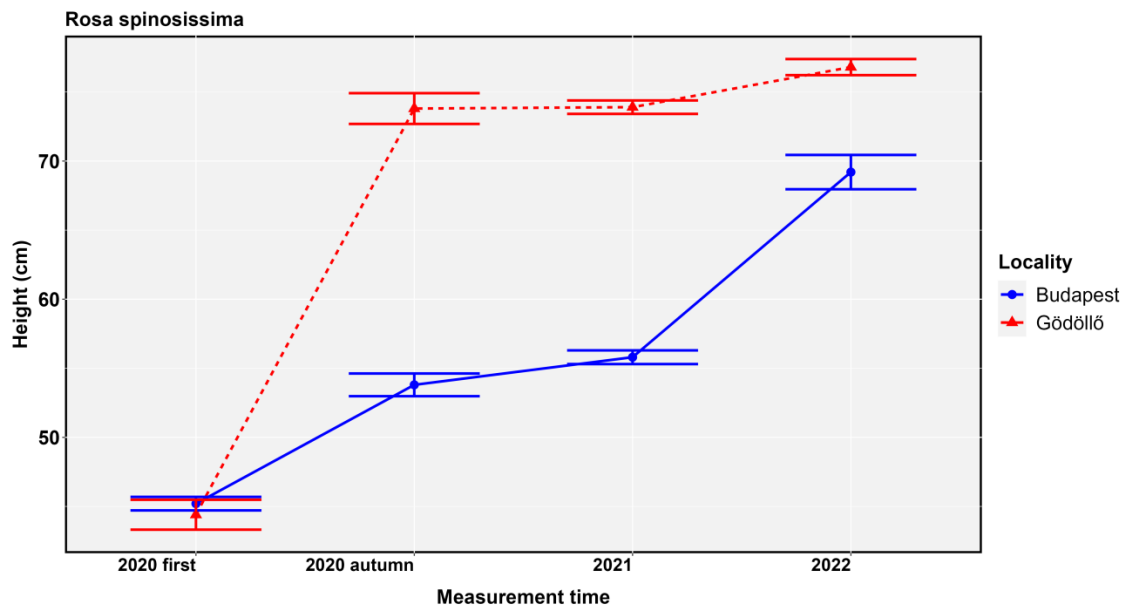
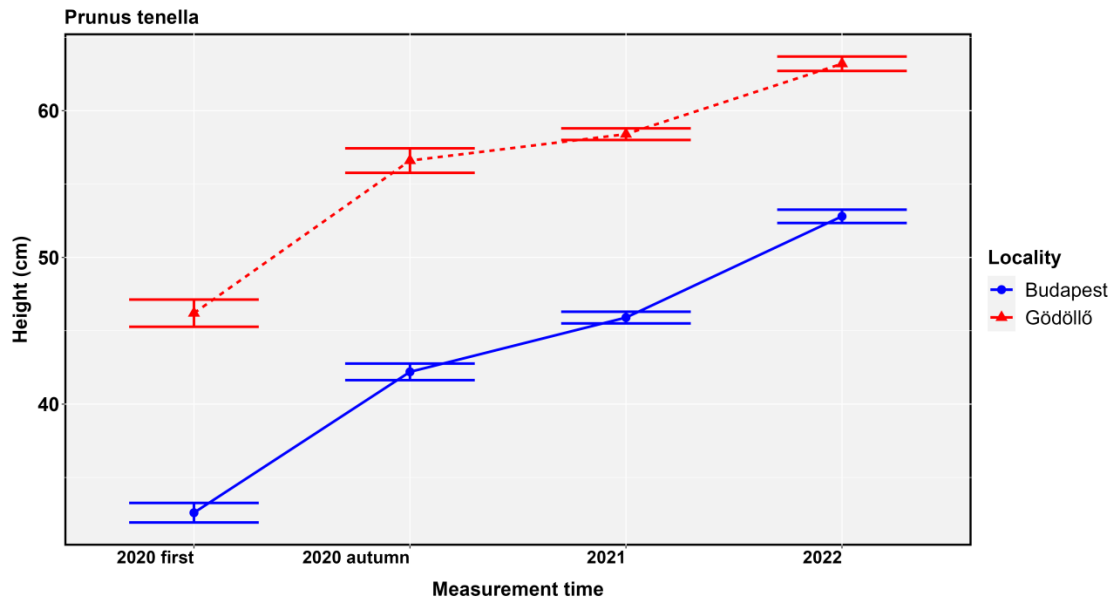
---

+ statisztikailag szignifikáns különbség 10% szignifikancia szint mellett; \* statisztikailag szignifikáns különbség 5% szignifikancia szint mellett; \*\* statisztikailag szignifikáns különbség 1% szignifikancia szint mellett; \*\*\* statisztikailag szignifikáns különbség 0,1% szignifikancia szint mellett; trópusi éjszaka = napi minimum-hőmérséklet > 20 °C.

## 7. melléklet: A vizsgált Fanerofitonok magassági adatai







2021. adatok cm-ben	Cornus sanguinea	Cotinus coggygria	Prunus fruticosa	Prunus spinosa	Ligustrum vulgare	Rosa spinosissima	Amygdalus nana
G1 kezdő	67	54	79	73	26	73	61
G2	105	71	77	81	32	81	54
G3	67	46	61	82	39	82	52
G4	77		67	56	52	56	68
G5				77	34	77	48
G1 záró	88	64	86	125	63	70	57
G2	110	86	99	172	69	73	60
G3	78	58	115	169	111	73	59
G4	104		95	135	126	71	68
G5				93	131	83	57
F1 kezdő	101	57	82	62	62	54	43
F2	89	68	67	87	50	57	51
F3	87	76	72	99	33	62	40
F4	105	91	74	107	52	55	37
F5	144		59	64	51	41	40
F1 záró	107	73	109	78	98	63	53
F2	93	60	85	90	39	63	57
F3	112	73	90	118	58	65	43
F4	116	100	92	123	87	53	48
F5	161		71	78	71	45	47

2022. adatok cm-ben	Cornus sanguinea	Cotinus coggygria	Prunus fruticosa	Prunus spinosa	Ligustrum vulgare	Rosa spinosissima	Amygdalus nana
G1 kezdő	88	64	86	125	63	70	57
G2	110	86	99	172	69	73	60
G3	78	58	115	169	111	73	59
G4	104		95	135	126	71	68
G5				93	131	83	57
G1 záró	106	88	100	153	89	73	67
G2	119	121	124	196	93	69	55
G3	82	70	135	176	137	73	56
G4	144		110	164	148	76	74
G5				112	164	93	64
F1 kezdő	107	73	109	78	98	63	53
F2	93	60	85	90	39	63	57
F3	112	73	90	118	58	65	43
F4	116	100	92	123	87	53	48
F5	161		71	78	71	45	47
F1 záró	138	94	126	80	108	104	57
F2	132	69	102	90	120	65	63
F3	138	86	99	118	74	65	50
F4	135	93	97	129	93	58	50
F5	174		93	85	86	54	44

## 8. melléklet: A vizsgált Fanerofitonok törzsátmérő adatai

2021 Mérések: 2020. december és 2021. október 1.							
Adatok mm-ben	Cornus sanguinea	Cotinus cogg.	Prunus fruticosa	Prunus spinosa	Ligustrum vulg.	Rosa spinos.	Amygd. nana
G1 kezdő	6,00	7,00	11,00	7,00	7,00	4,00	6,00
G2 kezdő	9,00	7,00	13,00	12,00	5,00	6,00	6,00
G3 kezdő	7,00	8,00	11,00	12,00	4,00	5,00	5,00
G4 kezdő	8,00		12,00	10,00	7,00	4,00	6,00
G5 kezdő				12,00	7,00	4,00	5,00
G1 záró	10,00	7,00	11,00	12,00	6,00	5,50	7,00
G2 záró	11,00	12,00	15,00	18,00	7,00	6,00	7,00
G3 záró	9,00	9,00	18,00	16,00	8,00	6,00	5,00
G4 záró	9,00		16,00	15,00	10,00	5,50	9,00
G5 záró				14,00	9,00	5,00	6,00
F1 kezdő	6,00	7,00	11,00	7,00	5,00	5,00	4,00
F2 kezdő	8,00	5,00	11,00	8,00	5,00	4,00	4,00
F3 kezdő	6,00	10,00	10,00	7,00	7,50	5,00	5,00
F4 kezdő	7,00	9,00	16,00	7,00	7,00	5,00	4,00
F5 kezdő	9,50		9,00	10,00	8,00	3,00	6,00
F1 záró	9,00	9,00	13,00	9,00	6,00	5,00	5,00
F2 záró	9,00	7,00	12,50	9,00	8,00	4,00	5,00
F3 záró	8,00	9,50	12,00	9,00	7,00	5,00	6,00
F4 záró	8,00	11,00	16,50	9,00	7,00	5,00	5,00
F5 záró	11,50		11,50	10,00	9,00	4,00	6,50
G1 különbség	4,00	0,00	0,00	5,00	-1,00	1,50	1,00
G2 különbség	2,00	5,00	2,00	6,00	2,00	0,00	1,00
G3 különbség	2,00	1,00	7,00	4,00	4,00	1,00	0,00
G4 különbség	1,00		4,00	5,00	3,00	1,50	3,00
G5 különbség				2,00	2,00	1,00	1,00
F1 különbség	3,00	2,00	2,00	2,00	1,00	0,00	1,00
F2 különbség	1,00	2,00	1,50	1,00	3,00	0,00	1,00
F3 különbség	2,00	-0,50	2,00	2,00	-0,50	0,00	1,00
F4 különbség	1,00	2,00	0,50	2,00	0,00	0,00	1,00
F5 különbség	2,00	0,00	2,50	0,00	1,00	1,00	0,50
Gödöllő különbség összesítve							
Cornus sanguinea	Cotinus coggyria	Prunus frutic.	Prunus spinosa	Ligustrum vulg.	Rosa spinos.	Prunus ten.	Átlagos növekedés
2,25	2,00	3,25	4,40	2,00	1,00	1,20	2,30
Budapest növekedés összesítve							
Cornus sanguinea	Cotinus coggyria	Prunus frutic.	Prunus spinosa	Ligustrum vulg.	Rosa spinos.	Prunus ten.	Átlagos növekedés
1,75	1,17	1,50	1,40	0,90	0,20	0,90	1,12
2022 Mérések: 2021. október 1. és 2022. október 14.							
Adatok mm-ben	Cornus sanguinea	Cotinus cogg.	Prunus fruticosa	Prunus spinosa	Ligustrum vulg.	Rosa spinos.	Amygd. nana
G1 kezdő	10,00	7,00	11,00	12,00	6,00	5,50	7,00
G2 kezdő	11,00	12,00	15,00	18,00	7,00	6,00	7,00
G3 kezdő	9,00	9,00	18,00	16,00	8,00	6,00	5,00
G4 kezdő	9,00		16,00	15,00	10,00	5,50	9,00
G5 kezdő				14,00	9,00	5,00	6,00
G1 záró	11,00	13,00	12,00	21,00	9,00	6,00	11,00
G2 záró	12,00	17,00	18,00	21,00	11,00	7,00	7,00
G3 záró	10,00	10,00	24,00	20,00	12,00	6,00	6,00
G4 záró	11,00		18,00	19,00	15,00	6,00	7,00
G5 záró				15,00	16,00	6,00	6,00
F1 kezdő	9,00	9,00	13,00	9,00	6,00	5,00	5,00
F2 kezdő	9,00	7,00	12,50	9,00	8,00	4,00	5,00
F3 kezdő	8,00	9,50	12,00	9,00	7,00	5,00	6,00
F4 kezdő	8,00	11,00	16,50	9,00	7,00	5,00	5,00
F5 kezdő	11,50		11,50	10,00	9,00	4,00	6,50
F1 záró	10,00	10,00	14,00	9,00	6,00	5,00	5,00
F2 záró	12,00	8,00	13,00	9,00	7,00	5,00	5,00
F3 záró	10,00	10,00	13,00	10,00	7,00	5,00	5,00
F4 záró	9,00	10,00	13,50	10,00	9,00	5,00	5,00
F5 záró	14,00		12,00	10,00	9,00	4,00	5,00
G1 különbség	1,00	6,00	1,00	9,00	3,00	0,50	4,00
G2 különbség	1,00	5,00	3,00	3,00	4,00	1,00	0,00
G3 különbség	1,00	1,00	6,00	4,00	4,00	0,00	1,00
G4 különbség	2,00		2,00	4,00	5,00	0,50	-2,00
G5 különbség				1,00	7,00	1,00	0,00
F1 különbség	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F2 különbség	3,00	1,00	0,50	0,00	-1,00	1,00	0,00
F3 különbség	2,00	0,50	1,00	1,00	0,00	0,00	-1,00
F4 különbség	1,00	-1,00	-3,00	1,00	2,00	0,00	0,00
F5 különbség	2,50	0,00	0,50	0,00	0,00	0,00	-1,50
Gödöllő különbség összesítve							
Cornus sanguinea	Cotinus coggyria	Prunus frutic.	Prunus spinosa	Ligustrum vulg.	Rosa spinos.	Prunus ten.	Átlagos növekedés
1,25	4,00	3,00	4,20	4,60	0,60	0,60	2,61
Budapest növekedés összesítve							
Cornus sanguinea	Cotinus coggyria	Prunus frutic.	Prunus spinosa	Ligustrum vulg.	Rosa spinos.	Prunus ten.	Átlagos növekedés
1,75	0,83	-0,13	0,40	0,20	0,20	-0,50	0,39

## 10. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretném köszönetemet kifejezni témavezetőmnek, Prof. Dr. Czóbel Szilárdnak, akivel a szalmi kapcsolat már a mesterképzésen elkezdődött, amikor a diplomamunkám konzulenseként segítette a munkámat. Köszönöm neki a doktori képzés alatt nyújtott segítséget, melyből külön kiemelném a kísérlet beállításában való segítséget, a publikációk írása alatti iránymutatást és a kéziratok szakmai bírálatát, valamint a disszertáció elkészítésében nyújtott folyamatos segítséget. Köszönetemet szeretném kifejezni továbbá a két kísérleti helyszínül szolgáló botanikus kert vezetőinek Dr. Pándi Ildikónak és Dr. Orlóci Lászlónak, akik lehetővé tették a kísérlet beállítását, valamint a kertek dolgozóinak, különösen Papp Lászlónak, Szentpéteri Enikőnek és Pozsonyi Márknak, akik a növények folyamatos gondozásával és tanácsaikkal nagyban hozzájárultak ahhoz, hogy az adatgyűjtést a közben felmerülő nehézségek ellenére is a három év során végig zavartalanul tudjam végezni, végül hálával tartozom a kísérleti növényeket biztosító Sütöriné dr. Diószegi Magdolnának, Magyar Lajosnak, a Beretvás és Társa Kft.-nek, valamint az Etter Kft.-nek és a Hegede Kertészetnek, akik nagylelkű növényadományai nélkül nem jöhetett volna létre a kutatás. Külön köszönet illeti Dr. Baltazár Tivadart a statisztikai elemzésben és az ábrák elkészítésében való segítségnyújtásért.