

dc\_1959\_21

Barcza Zoltán  
ELTE Meteorológiai Tanszék

Légköri üvegházhatású gázok felszíni mérlegének  
vizsgálata eddy kovariancia mérések és  
biogeokémiai modell segítségével

MTA doktori értekezés

Budapest, 2022

dc\_1959\_21

"No one trusts a model except the man who wrote it;  
everyone trusts an observation except the man who made it."

Harlow Shapley

## Tartalomjegyzék

1. Bevezető .....	4
2. A szénmérleg komponensek mérése és modellezése .....	7
2.1. A globális szén ciklus/Globális vonatkozások .....	7
2.2. A talaj-növény rendszer szénmérlege/Nómenklátúra .....	8
2.3. A talaj-növény rendszer szénmérlegének mérése .....	11
2.4. A talaj-növény rendszer szénmérlegének modellezése .....	13
3. A szénmérleg mérése Magyarországon.....	17
3.1. Módszertan .....	17
3.2. Eredmények.....	20
3.2.1. Eredmények – eddy kovariancia mérések gyep felett .....	20
3.2.2. Eredmények – eddy kovariancia mérések vegyes mezőgazdasági terület felett....	28
3.3. Összegzés és önálló tudományos eredmények .....	43
3.3.1. Munkamegosztás .....	43
3.3.2. Tudományos eredmények és a vonatkozó publikációk .....	45
4. A szénmérleg modellezése Magyarországon és Európában.....	47
4.1. Módszertan .....	47
4.2. Eredmények.....	49
4.2.1. Eredmények – Biome-BGC .....	50
4.2.2. Eredmények – Biome-BGCMuSo.....	64
4.3. Összegzés és önálló tudományos eredmények .....	71
4.3.1. Munkamegosztás .....	71
4.3.2. Tudományos eredmények és a vonatkozó publikációk .....	72
5. Összefoglalás.....	74
Köszönetnyilvánítás .....	75
Irodalomjegyzék.....	76

## 1. Bevezető

A talaj-növény rendszer kiemelt jelentőségű a bioszféra és általában a létezésünk szempontjából, mivel élelmiszerrel látja el az emberiséget és a haszonállatokat, nyersanyagot szolgáltat, és emellett az időjárás és az éghajlat szabályozásában, illetve a víz globális körforgásában is részt vesz (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). A légkörben jelen lévő szén-dioxid ( $\text{CO}_2$ ) teszi lehetővé, hogy a bioszféra részét képező növényzet szerves anyagot halmozzon fel a  $\text{CO}_2$  fotoszintézis útján történő felvételével és átalakításával. Emellett a növényzet létfenntartó folyamatai során, illetve a talajba kerülő szerves anyagok bomlása következtében ugyancsak  $\text{CO}_2$  szabadul fel. A légköri  $\text{CO}_2$  üvegházhatása révén befolyásolja bolygónk éghajlatát (Lacis et al., 2010; IPCC, 2019, 2021). Ugyanakkor az éghajlat a bioszféra működésének befolyásolása révén visszahat a szén-dioxid szintre. Emiatt a talaj-növény rendszer  $\text{CO}_2$  mérlegének megértése alapvető jelentőségű mind az élelmiszerbiztonság, mind az éghajlat szempontjából.

A szárazföldi bioszféra biogeokémiai folyamatait azonban nem ismerjük kielégítő pontossággal. Nagyjából a múlt század közepéig a szárazföldi bioszféra – hosszabb időszak átlagában – közelítőleg egyensúlyban volt a légkörrel: körülbelül ugyanannyi szén-dioxidot vett fel a légkörből a fotoszintézis révén, mint amennyit a bomlási és önfenntartó respirációs folyamatokkal leadott. A 20. század közepétől kezdve azonban a szárazföldi növényzet egyre inkább nettó szén-dioxid felvevővé vált. Ez a folyamat részben ellensúlyozta a növekvő, emberi eredetű  $\text{CO}_2$  kibocsátást (Cao et al., 2002; Tans, 2009; Ciais et al., 2013; Friedlingstein et al., 2020). Jelenleg az emberiség által elsősorban a fosszilis tüzelőanyagok elégetésével, kisebb mértékben egyes ipari folyamatok során (pl. cementgyártás), illetve erdőirtások révén kibocsátott  $\text{CO}_2$  mennyiségnek kb. a fele marad a légkörben, ezzel erősítve az üvegházhatást. A kibocsátás másik felét a Föld óceánjai, illetve a szárazföldi bioszféra köti meg (Denman et al., 2007; Le Quéré et al., 2009; Ciais et al., 2013; Friedlingstein et al., 2020).

Mivel az éghajlatváltozás már bizonyítottan módosította a szárazföldi bioszféra  $\text{CO}_2$  mérlegét, jogos feltételezni, hogy ez a tendencia folytatódni fog (Friedlingstein and Prentice, 2010; Huntzinger et al., 2017). Az éghajlat és a bioszféra közötti kölcsönhatás azt jelenti az ökológiai rendszerek szintjén, hogy  $\text{CO}_2$  megkötő képességük nőhet is, de éppenséggel csökkenhet is. Az első esetben beszélhetünk negatív visszacsatolásról, míg a második eset a pozitív visszacsatolás az éghajlati rendszer szempontjából. Figyelembe kell vegyünk azonban azt is, hogy nem csak a meteorológiai változók (lég hőmérséklet, csapadék mennyisége és

időbeli eloszlása, sugárzás, stb.) befolyásolják a CO<sub>2</sub> mérleget, hanem egyéb fontos környezeti paraméterek is fontosak. Közismert például, hogy a növekvő légköri CO<sub>2</sub> mennyiség stimulálóan hat a fotoszintézisre az ún. CO<sub>2</sub> trágyázás révén (Norby et al., 2005; Leakey et al., 2009), és a tápanyagok (elsősorban a talajnedvesség, a nitrogén és a foszfor) hozzáférhetősége vagy hiánya ugyancsak erősen befolyásolja a növények növekedését (Churkina et al., 2003, 2010; Magnani et al., 2007; De Vries et al., 2009; Höglberg, 2012; Terrer et al., 2016).

Jelenleg nincs konszenzus azzal kapcsolatban, hogy a megváltozó környezeti feltételek és a légköri CO<sub>2</sub> mennyiség milyen mértékben hatnak egymásra (Ciais et al., 2013; Friedlingstein et al., 2014; Huntzinger et al., 2017; Schwalm et al., 2019; Cox, 2019). A szárazföldi bioszféra és az óceánok CO<sub>2</sub> mérlegének jövőbeli alakulásával kapcsolatos bizonytalanságok jelentik az egyik (de nem a legnagyobb) problémát<sup>1</sup> az éghajlat előrejelzése szempontjából (Ciais et al., 2013; Huntzinger et al., 2017; Cox, 2019). Ironikus módon, bár az éghajlati rendszert és annak részeként a légköri CO<sub>2</sub> globális körforgását egyre jobban ismerjük, az éghajlatváltozás mértékére vonatkozó jövőbeli becslések bizonytalansága mégis nőtt az utóbbi években (Maslin and Austin, 2012; Cox, 2019).

Az éghajlatváltozás előrejelzéséhez kötődő bizonytalanságok csökkentése érdekében nyilvánvalóan bővítenünk kell ismereteinket a bioszférikus szén-dioxid mérleggel kapcsolatban is. Ez egyrészt hosszú távú mérési programok megvalósításával lehetséges (ideértve az ökológiai rendszerek manipulálásával foglalkozó kísérleteket is; Leakey et al., 2009). Emellett a létező biogeokémiai és Föld rendszermodelleket (Earth System Model, azaz a legújabb generációs éghajlati modellek, amelyek csatolt klíma-szén ciklus modellek; Lenton et al., 2006; Shevliakova et al., 2013) is javítanunk kell. Ennek egyik lehetséges korszerű módja az ún. modell-adat fúzió, amely a mérési adatok és a modellek együttes használatával a szénmérleg megértésével kapcsolatos tudásunkat célozza meg javítani komplex módon (Williams et al., 2009; Keenan et al., 2011). A modell-adat fúzió nem egyszerűen a mérési adatok felhasználását jelenti a modell pontosítása érdekében (pl. kalibráció révén), hanem a mért adatok segítségével strukturális problémákat is azonosít, így a modellek fejlesztése is része a folyamatnak. A folyamatosan javított modelleket újra kell kalibrálni, érzékenységi vizsgálatot kell végezni, majd a szigorú validáció után lehet alkalmazni nagy térszállán a szénmérleg becslésére.

---

<sup>1</sup> Az éghajlati modellek bizonytalanságainak legfontosabb forrása a felhőzet és a felhőfizikai folyamatok parametrizációja, illetve a vízciklushoz kapcsolódó visszacsatolás (Soden and Held, 2006; IPCC, 2007; Cox, 2019). Mindemellett meg kell említenünk, hogy a felhőzet mennyisége befolyásolja a felszínre érkező sugárzás mennyiségét, ami a szén-dioxid mérleg bizonytalanságában is megjelenik.

Jelen dolgozat célja, hogy bemutassa a bioszférikus CO<sub>2</sub> mérleggel kapcsolatos kutatómunkám eredményeit. Munkám során mérési adatok segítségével számszerűsítettem egy tipikus magyarországi mezőgazdasági régió, illetve egy kezelt gyepek CO<sub>2</sub> forgalmát. A mérési adatokból kiindulva egy biogeokémiai modell segítségével különböző ökológiai rendszerek, illetve Magyarország bioszférikus CO<sub>2</sub> mérlegét is megbecsültem. Ugyancsak kísérletet tettem Magyarország teljes bioszférikus eredetű üvegházhatású gáz mérlegének becslésére is, hazai és külföldi kollégák eredményeit is szintetizálva. Munkámmal a modell-adat fúzió minél több komponensét próbálom lefedni, ami lehetőséget nyithat a szénmérleg becslésekben rejlő bizonytalanságok csökkentésére.

Fontosnak tartom megjegyezni, hogy a növényi folyamatokat, illetve a talajban zajló folyamatokat több tudományterület is vizsgálja (agrártudományok, erdőgazdálkodás, biológia, ökológia, talajtan, stb.), ami azt jelenti, hogy különböző szempontok és módszerek segítségével végeznek kutatásokat. Az itt bemutatásra kerülő eredmények a meteorológia, azon belül is a klímakutatás szempontjából közelítik a növényi folyamatokat, illetve a talajban zajló folyamatokat. Ez azt jelenti, hogy a felvázolt eredmények több szempontból is speciálisak, és emiatt nem feltétlenül értelmezhetők triviálisan pl. az ökológusok vagy mezőgazdasági szakemberek által. Mindenesetre remélem, hogy sikerül más tudományterületek képviselői számára is releváns és könnyen befogadható információt közölni.

## 2. A szénmérleg komponensek mérése és modellezése

### 2.1. A globális szén ciklus/Globális vonatkozások

A légköri CO<sub>2</sub> mérleget, illetve tágabb értelemben a globális CO<sub>2</sub> mérleget tározók és a tározók közötti anyagáramok segítségével számszerűsítik (Global Carbon Project, 2020; Mészáros, 2021). Tározónak tekintjük a rendelkezésre álló fosszilis tüzelőanyagot, a teljes légkört, az óceánt, a növényzetet és a talajt. Az anyagáramon többek között a fosszilis tüzelőanyag égetésével a légkörbe juttatott CO<sub>2</sub> mennyiségét, a földhasználat-váltás CO<sub>2</sub> kibocsátás vonzatát, illetve a növényzet időegység alatti CO<sub>2</sub> felvételét értjük. Mivel az anyagcsere közben különböző vegyületek formájában van jelen a légköri CO<sub>2</sub>-ban is részt vevő elemi szén (kémiai átalakulás történik), ezért nem beszélhetünk kizárólag CO<sub>2</sub> mérlegről. A könnyebb értelmezhetőség kedvéért emiatt a vizsgálatok során szén-egyenértékben fejezik ki a tározókban levő anyagmennyiséget és a fluxusokat. A disszertációban a CO<sub>2</sub>-n kívül érintem az egyéb fontosabb üvegházhatású gázok (metán (CH<sub>4</sub>) és a dinitrogén-oxid (N<sub>2</sub>O)) felszíni fluxusait is. Ezen fluxusokat a gázok globális felmelegedési potenciál (global warming potential, GWP) értéke alapján, az IPCC ajánlásainak megfelelően szénfluxus-egyenértékben fejezem ki megfelelő konverziós faktorok alkalmazásával (IPCC, 1996; Barcza et al., 2010).

A légköri CO<sub>2</sub> szint növekedésének elsődleges okát könnyű azonosítani: ez a fosszilis tüzelőanyagok (kőszén, kőolaj és földgáz) égetése és a cementgyártás. Ezt nem csak a fosszilis tüzelőanyagok használatára vonatkozó statisztikák illetve országos szintű bevallások alapján tudjuk, hanem a légköri oxigén szint mérések, illetve szén-izotóp mérések is alátámasztják (IPCC, 2021 5.6. ábra; Friedlingstein et al., 2020). Hozzájárul még ehhez a földhasználat-váltásból fakadó kibocsátás is (elsősorban erdőirtás, de más tényezők is szerepet játszanak; Friedlingstein et al., 2020). Azonban kevésbé ismert, hogy ha az eddigi összes antropogén CO<sub>2</sub> kibocsátást figyelembe vesszük, és feltételezzük, hogy minden kibocsátott CO<sub>2</sub> molekula a légkörben maradt, akkor a légköri CO<sub>2</sub> koncentráció jelenleg kb. 600 ppm lenne (Global Carbon Project, 2020) a jelenlegi kb. 413 ppm<sup>2</sup> helyett (2021. szeptemberi állapot).

Mi történt a kibocsátott CO<sub>2</sub> egy jelentős részével? Miért kisebb 600 ppm-nél a jelenlegi légköri CO<sub>2</sub> szint? Egyáltalán, milyen mechanizmusok alakítják a légköri CO<sub>2</sub>

---

<sup>2</sup> <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>

szintet, különösen hosszabb távon? Ilyen és ehhez hasonló kérdések adtak lendületet az 1990-es években azon kutatásoknak, amelyek a 2000-es években nagy nemzetközi projektek formájában valósultak meg, és amelyek hatása a mai napig érződik (Haszpra és Barcza, 2005; Schulze et al., 2009).

Ma már tudjuk, hogy a szárazföldi ökológiai rendszerek és az óceánok is évről évre nagy mennyiségű szén-dioxidot vesznek fel a légkörből, és kötnek meg (itt a nettó szénfelvételt kell ez alatt érteni; a kétirányú bruttó szén-dioxid anyagáram ennél jóval több; Global Carbon Project, 2020). A 2010-2019 időszakban az átlagos antropogén CO<sub>2</sub> kibocsátás kb. 11 PgC/év volt (egy Petagramm szén=10<sup>15</sup> gramm, ami egyenértékű 1 gigatonnával; IPCC, 2021). Ebből kb. 5,1 PgC/év mennyiség maradt a légkörben, míg 2,5 PgC/év volt az óceáni CO<sub>2</sub> megkötés, és 3,4 PgC/év a szárazföldi megkötés (Friedlingstein et al., 2020).

Tekintve a CO<sub>2</sub> meghatározó szerepét az éghajlati rendszerben, nagyon is releváns kérdés, hogy a jövőben hogyan fog alakulni a légköri CO<sub>2</sub> szint, figyelembe véve a kibocsátás-csökkentési törekvéseket és az éghajlat-szén ciklus kölcsönhatást. Ez utóbbi kétirányú kapcsolatot jelent a légköri CO<sub>2</sub> szint és a szén ciklus egyes komponenseit befolyásoló éghajlat közt (Huntzinger et al., 2017; Friedlingstein et al., 2020).

A jövőben várható változások, illetve a visszacsatolás jellegének becsléséhez vezető első lépés a talaj-felszín rendszer szénmérlegének, illetve teljes üvegházhatású gáz mérlegének megfelelő pontosságú becslése. A folyamatok számszerűsítéséhez kapcsolódóan szükség van egy megfelelő nevezéktan alkalmazására, amit az alábbiakban mutatok be. A disszertációban közölt eredmények a folyamatokat leíró fizikai mennyiségek fényében értelmezhetőek.

## 2.2. A talaj-növény rendszer szénmérlege/Nómenklatúra

A talaj-növény rendszer szénmérlegét nem könnyű kvantitatív módon vizsgálni. A szénmérleg vizsgálata eleve különböző mennyiségek számszerűsítését jelenti, ahol az egyes komponensek önmagukban is magyarázatot igényelnek (Chapin et al., 2006).

Az egyik legfontosabb vizsgált mennyiség a bruttó elsődleges produkció (Gross Primary Production, GPP), ami a fotoszintézis mértékét fejezi ki. A GPP az a szénmennyiség, amelyet a növényzet egységnyi idő alatt egységnyi területen felvesz asszimiláció útján. A növényzet öfenntartó folyamatai révén, illetve a növekedéshez köthető folyamatok révén is



kilégez CO<sub>2</sub>-t, ami az autotróf respiráció (Ra). Hasonlóan a GPP-hez és a továbbiakban bevezetett mennyiségekhez ezt is időegységre és egységnyi földfelszínre vonatkoztatjuk.

A bevétel (GPP) és a kiadás (Ra) határozza meg azt a szénmennyiséget, ami a növény egyik fő jellemzője, vagyis a produkció mérőszáma (ami tulajdonképpen a biomassza növekmény, szén egyenértékben kifejezve). A növekedés, vagyis a nettó primer produkció (Net Primary Production, NPP) ebben az értelemben  $NPP = GPP - Ra$  alakban írható fel. Globálisan a növényzet 450-650 Petagramm szenet tárol jelenleg (Friedlingstein et al., 2020).

A növényeken kívül egyéb CO<sub>2</sub> kibocsátók is jelen vannak, elsősorban a talajban. Ez a kibocsátás a lebontókhöz, vagyis a mikrobiális élethez, illetve a talajban jelen lévő állatok és gombák élettevékenységéhez köthető. Ezen folyamatokhoz kapcsolódó légzés a heterotróf respiráció (Rh). A heterotróf folyamatok a talaj, illetve az elhalt növényi részek szerves anyag tartalmához köthetők, ami meghatározó jelentőségű tározó a globális szén ciklusban. Emiatt a talajok szerves szén tartalma (Soil Organic Carbon, SOC) a globális folyamatok egyik fő meghatározója, és fontos szereplő az éghajlat-szén ciklus kölcsönhatás szempontjából is. Jelenlegi ismereteink szerint 1500-2400 PgC van elraktározva a talajokban (Friedlingstein et al., 2020).

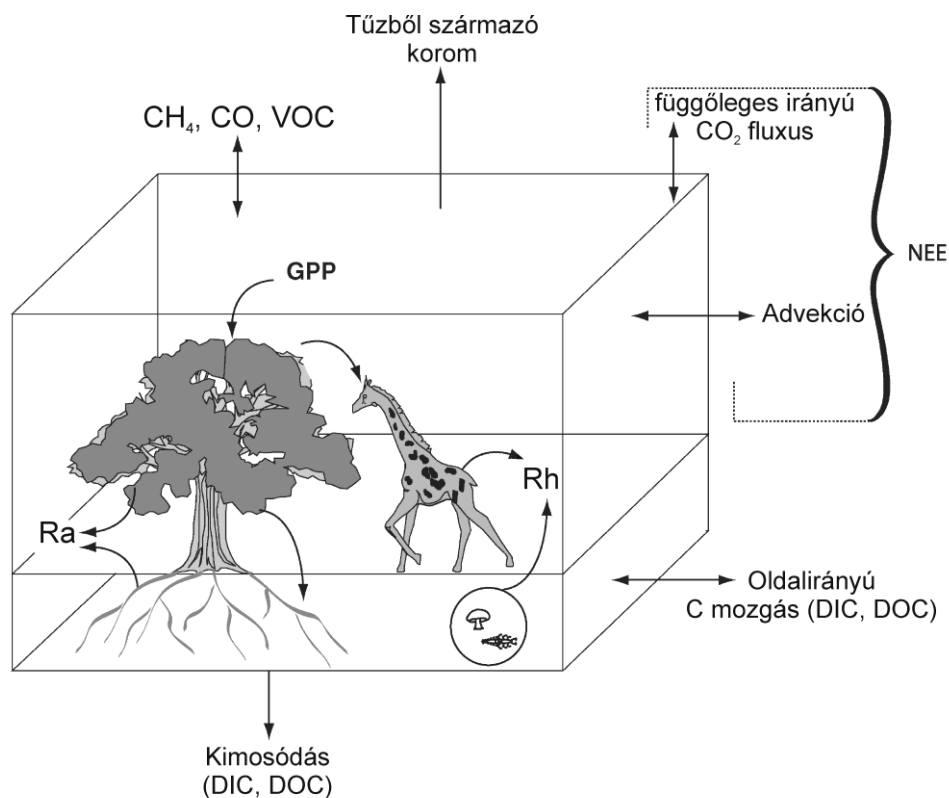
Az autotróf és heterotróf respiráció összege a teljes ökoszisztéma szintű légzés (total ecosystem respiration, Reco):  $Reco = Ra + Rh$ .

A teljes, légkörből történő bruttó szénbevétel (GPP) és a teljes légkör felé történő bruttó kibocsátás (Ra+Rh) eredője az a szénmennyiség, amit a talaj-növény rendszer a légkörral összességében kicserél. Ez a mennyiség a nettó ökoszisztéma kicserélődés (Net Ecosystem Exchange, NEE). Definíció szerint  $NEE = Ra + Rh - GPP = Reco - GPP = Rh - NPP$ . Az NEE eszerint negatív, ha a GPP nagyobb, mint a respiratív tagok összege. Az NEE közvetlenül mérhető, amiről a későbbiekben lesz szó.

Főleg ökológus körökben használatos a nettó ökoszisztéma produkció (Net Ecosystem Productivity, NEP) fogalma is. Az elfogadott szemléletmód szerint az NEP és a -NEE közelítőleg megegyezik, de az NEP több tényezőt vesz figyelembe, mint a -NEE. Az eltérést bizonyos szénveszeséggel járó folyamatok okozzák, mint pl. a talajban lefelé távozó oldott szerves szén (Dissolved Inorganic Carbon, DIC; Chapin et al., 2006). Jelen munkában ezt elhanyagolom, így a következő összefüggést használom:  $NEP = GPP - Reco = -NEE$ .

A talaj-növény rendszer teljes szénmérlegét a nettó ökoszisztéma szénmérleg (Net Ecosystem Carbon Balance, NECB) hivatott számszerűsíteni. Az NECB figyelembe veszi a szén nem szén-dioxid formájában történő áramlását is (metán, szén-monoxid (CO), tűzből származó korom, illékony szerves vegyület (Volatile Organic Compound, VOC), oldott

szerves szén (Dissolved Organic Carbon, DOC), illetve oldott szervetlen szén (Dissolved Inorganic Carbon, DIC) formájában). Ugyancsak figyelembe veszi a laterális (oldalirányú) szénmozgást is, ami többnyire emberi eredetű (fakitermelés; aratás során történő termény, illetve növényi részek elszállítása; kaszálók esetén a széna elszállítása; szántóföldön szerves trágya alkalmazása), de ide tartozik például a víz- és szélrózió hatása is. Ily módon az NECB definíciója:  $NECB = -NEE - FCO - FCH_4 - FVOC - FDIC - FDOC - L$ , ahol  $L$  a laterális szénforgalmat jelzi,  $F$  pedig az adott anyag fluxusára utal. A nagyobb tér- és időskálán értelmezett NECB a nettó bióm produkció (Net Biome Production, NBP), ami az NECB integrálja. Lágyszárúak esetén az NBP lényegében a talajban lévő szén időbeli változásáról árulkodik. Fásszárú növények esetén jelentős a talaj feletti biomassza is, ezért ott az NBP ezzel együtt értelmezhető. A szakirodalomban fellelhető legtöbb cikk a fenti nomenklatúrával dolgozik.



2.1. ábra. A talaj-növény rendszer szénmérlege (ábra forrása: Chapin et al., 2006). A rövidítések magyarázata a szövegben található.

Bár elsősorban a szénmérleg témakörét fogom tárgyalni, szó lesz más üvegházhatású gázokról is – elsősorban a dinitrogén-oxid kibocsátásról, ami szántóföldek esetén jelentős (Schulze et al., 2009). Emiatt szükséges bevezetni a nettó üvegházhatású gáz mérleg fogalmát

(Net Greenhouse-gas Balance, NGB). Az NGB az NBP alapján egyszerűen számítható a fent említett, GWP alapú IPCC konverziós faktorok segítségével, az  $N_2O$  és a  $CH_4$  fluxusainak ismeretében (IPCC, 1996). Mivel a végeredmény a konverzió után ugyancsak szén-egyenérték, ezért a szénmérleg kifejezés használata indokolt (ahol az értelmezés megköveteli, ott erre ki fogok térni). Más üvegházhatású gázokat, illetve a sugárzási kényszer alakításában részt vevő egyéb anyagokat (pl. légköri aeroszol részecskék, ózon) jelen munkában nem tárgyalok.

A 2.1. ábra a talaj-növény rendszer szénmérlegének fent vázolt komponenseit foglalja össze.

### 2.3. A talaj-növény rendszer szénmérlegének mérése

A globális szén ciklus kutatása magába foglalja különböző térszálájú folyamatok számszerűsítését (Schulze et al., 2009). Felhasználja a hagyományos, tározó alapú vizsgálatok eredményeit. Ilyen pl. az erdők faanyagában hosszú távon tárolt szén mennyiségének becslése, ami az erdőgazdálkodásban már régóta kutatott terület (Somogyi, 2008; Ciais et al., 2014), illetve a talajokban tárolt SOC mennyiségének becslése, ami a talajtanban hagyományosan jól feltárt terület (Kreybig, 1937; Pásztor et al., 2010; Ciais et al., 2014; Szatmári et al., 2021). Ugyancsak felhasználja az agrártudományokban, illetve a gyepgazdálkodás területén széles körben alkalmazott biomassza mérések eredményeit (gyepek esetén talaj feletti biomasszát, míg szántóföldi növénytermesztés esetén a szemtermés mennyiségét, illetve a levélzetben és szárban tárolt szerves anyagot mérik laboratóriumi körülmények közt; pl. Sándor et al., 2016).

A hagyományos, sok évtizedre visszanyúló mérések mellett a szén ciklus kutatása alapvetően épít az új keletű, komplex mérőrendszerek és magas szintű adatfeldolgozó eljárások által szolgáltatott információra. Ilyen információforrás pl. az ún. légköri inverz modellek kontinentális skálájú eredményei (Haszpra és Barcza, 2005; Ciais et al., 2010a). Az inverz modellek a légköri  $CO_2$  koncentráció nagy pontosságú mérésén alapulnak, és a felszíni nyelők egyenetlen földrajzi elhelyezkedéséből fakadó kicsiny  $CO_2$  koncentráció eltérésekre alapozva becsli a  $CO_2$  mérleget elsősorban globális illetve kontinentális skálán (Geels et al., 2007; Ciais et al., 2010a). Magyarországon Haszpra László kezdeményezésére létesült előbb a K-pusztai, majd a hegyhátsági légköri monitoring állomás, ahol utóbbi helyen jelenleg is zajlik a légköri  $CO_2$  koncentráció nagy pontosságú mérése (Haszpra, 1999; Haszpra et al., 2008;

2019). A hegyhátsági adatok értékes, és a régiókban egyedi információt nyújtanak a légköri inverz modellek részére.

Az ún. eddy kovariancia (EK) mérés technikának köszönhető, hogy a szénmérleg vizsgálatok lendületet kaptak a múlt század végén. Az EK technika révén vált lehetővé először, hogy nagy pontossággal meghatározzák az ökológiai rendszerek légköri vonatkozású szénmérlegét, ráadásul oly módon, hogy nem történik háborgatás a talaj-növény rendszer szintjén (Baldocchi, 2003; 2020). Az 1990-es évek elején telepítették az első olyan mérőrendszereket, amelyek sok éven keresztül mérték a felszíni CO<sub>2</sub> áramot (az NEE-t), kiegészítve az evapotranszpiráció és a szenzibilis hőáram meghatározásával (Baldocchi, 2008). Magyarországon ilyen jellegű mérések 1997-ben kezdődtek Haszpra László kezdeményezésére, a közreműködéssel (Barcza, 2001; Barcza et al., 2020). Jelenleg több száz helyen zajlik EK mérés világszerte, ezzel felbecsülhetetlen értékű információt nyújtva különböző ökológiai rendszerek szénmérlegéről, változó éghajlati körülmények alatt (Baldocchi, 2020). Globálisan a FLUXNET foglalja egységes keretrendszerbe a szén ciklus vonatkozású EK méréseket (Baldocchi et al., 2001; Bond-Lamberty, 2018). Az eddy kovariancia mérések által szolgáltatott adatok nélkül ma már nem képzelhető el a szénmérleg modellek validálása, illetve kalibrálása (pl. Heinsch et al., 2006; Knorr and Kattge, 2005; Wu et al., 2016).

Számos egyéb mérési módszer is elterjedt a szén ciklus vizsgálata kapcsán (Ciais et al., 2014). Az egyik ilyen mérés a talajrespirációt számszerűsíti kis térskálán, a felszínre helyezett kamrák segítségével (Tóth et al., 2010; Balogh et al., 2011; Lellei-Kovács et al., 2016; Gelybó et al., 2022). A mérés technika előnye, hogy a rendszer részeként üzemelő gázanalizátor lehetőségei alapján más üvegházhatású gázok kibocsátása is mérhető (pl. N<sub>2</sub>O). Ugyancsak alapvető a levélfelület index (LAI) mérése, mert alapvetően befolyásolja a fotoszintézist és ezen keresztül a növényi produkciót, az autotróf recipirációt, illetve a transzspirációt is (Bonan, 2015).

A mérések reprezentatív térbeli skálájának másik végén a műholdas távérzékelés által szolgáltatott adatok állnak. A műholdak megjelenésével óriási lehetőség nyílt a felszíni folyamatokkal foglalkozó szakemberek előtt, mivel igen hamar kiderült, hogy az eredetileg a felhőzet azonosítását célzó meteorológiai célú műholdas szenzorok releváns információt nyújtanak a vegetáció állapotáról is (Cracknell, 2001). Az elmúlt évtizedekben az újabb és újabb szenzorok révén globális léptékben, igen jó időbeli, és egyre javuló térbeli felbontással tudunk adatokat szerezni a növényzet fejlettségéről, a produktivitásról, az időjárás és a növényzet kapcsolatáról (Heinsch et al., 2006; Gelybó et al., 2013; Kern et al., 2017; 2018). A

távérzékelte adatok alapján adat-orientált modelleket konstruáltak, amelyekkel többek közt a GPP is becsülhető globális léptékben (Running et al., 2004). Az adat-orientált modelleket a következő fejezetben tárgyalom, mert bár méréseken alapulnak, különböző matematikai összefüggések alapján alakíthatók a leginkább proxy-nak tekinthető műholdas adatok fizikai mennyiségekké. Egyre népszerűbb a drónokon, repülőgépeken, illetve különböző távirányított repülőgépeken elhelyezett, sugárzásmérésen alapuló szenzorok használata is, amik a műholdas távérzékeléshez hasonlóan köztes információt szolgáltatnak a növényzet működéséről.

A mérés alapú vizsgálatok között kiemelt szerepük van az ökoszisztéma-manipulációs kísérleteknek (Leakey et al., 2009; Leuzinger et al., 2011). A módszer lényege, hogy valamilyen technológia révén előidézzük azokat a körülményeket, amik a megváltozott éghajlat alatt a jövőben előfordulhatnak (pl. magasabb hőmérséklet infravörös lámpákkal előidézve; kevesebb csapadék bizonyos csapadékesemények kizárásával; a légköri CO<sub>2</sub> szint megemelése szabadföldi körülmények közt CO<sub>2</sub> gáz szabályozott, folyamatos kibocsátásával). A kísérletek révén betekintést nyerhetünk a talaj-növény rendszer várható válaszaiba az éghajlatváltozás vonatkozásában, és segítségükkel a rendelkezésre álló matematikai modellek is pontosíthatók (Piao et al., 2013).

A szénciklussal kapcsolatos megfigyelésekről ad kiváló áttekintést Ciais et al. (2014) tanulmánya, amelyben globális lefedettséget biztosító, szénciklussal kapcsolatos adatbázisokról is kapunk információt. Áttekintést kapunk a folyóvizekben szállított szén mennyiségének meghatározásáról, a jelenleg használt és tervezett műholdas szenzorokról, az óceánokkal kapcsolatos mérésekről és megfigyelésekről, illetve helyet kap az emberi beavatkozást (menedzsmentet) leíró adatbázisok létrehozásának tárgyalása is. Bemutatásra kerül az adatok közzétételének a módja, és a felszíni mérőhálózat kiterjesztésének fontosságára is felhívja a figyelmet.

## 2.4. A talaj-növény rendszer szénmérlegének modellezése

A meteorológia tudományterületéhez hasonlóan a szénciklus vizsgálata is ötvözi a mérési eredményeket a számítógépes modellek használatával (Ciais et al., 2014; Friedlingstein et al., 2020). A szénciklus vizsgálatához különböző komplexitású és struktúrájú, ún. biogeokémiai modellek nyújtanak információt a talaj-növény rendszer

működéséről. A szakirodalomban elterjedt szóhasználat szerint a talaj-növény rendszer folyamatait leíró modelleket általánosságban „land surface model”-nek hívják (LSM; Ács and Hantel, 1998; Bonan, 2015), ami magában foglalja a biogeokémiai modelleket is. Emellett az LSM kategória sokkal bővebb, és pl. az időjárás előrejelzésben használt felszíni parametrizációs sémákat is magában foglalja.

Fontos megemlíteni, hogy a szénciklus folyamatainak számszerűsítésére létrehozott biogeokémiai modellek felépítésükben nagyon hasonlóak a hidrológiai modellekhez, az ökológiai modellekhez, az agrártudományok területén használt növénytermesztési (crop) modellekhez, illetve az erdészeti modellekhez. A biogeokémiai modellek annyiban speciálisak, hogy a rendszer teljes szén-, víz-, és sok esetben nitrogénmérlegét is leírják, szemben az ökológiai vagy mezőgazdasági modellekkel, ahol sok esetben pl. csak a termésmennyiség számszerűsítésén, a talaj feletti biomassa becslésén, vagy a vízmérleg komponenseinek a becslésén van a hangsúly. Az üvegházhatású gázok mérlegének fontossága miatt az újabb tendenciák szerint az ökológiai modelleket, illetve az említett egyéb modell típusokat is kiegészítik a biogeokémiai modellekre jellemző komponensekkel, ezért a határ a különböző modell típusok között kezd elmosódni (lásd. pl. Gervois et al., 2008; Wu et al., 2018).

A biogeokémiai modellezés szervesen kapcsolódik a biogeográfia tudományterületéhez, mivel a modellek térben explicit alkalmazásához szükség van a különböző növény típusok földrajzi elhelyezkedésének leírására. Az elterjedt módszertan szerint a modellek nem növényfajokkal dolgoznak, hanem a levélzet élettartama (lombhullató, örökzöld), illetve a növényzet felépítése szerint (fásszárú, nem fásszárú) létrehozott szűkebb kategóriákkal dolgoznak. Ez a fajta logika funkcionális típusokat használ (plant functional type, PFT; Bonan et al., 2002). Ilyen PFT pl. a lombhullató széleslevelű erdő, az örökzöld tűlevelű erdő, a gyepek általános kategóriája, a cserjések, a mezőgazdasági haszonnövények, stb. A PFT térkép lehet statikus, pl. a CORINE felszínborítottság alapján kategorizálva (Barcza et al., 2010), vagy dinamikus. Ez utóbbi esetben a növényzeti övek éghajlatváltozás hatására történő eltolódásával is számolnak. Ezen utóbbi modelles család az ún. „dynamic global vegetation model” (DGVM), ami a szénciklus vizsgálatában nélkülözhetetlen eszköz. A klímamodellezésben használt korszerű ún. Föld Rendszermodellek (Earth System Model, ESM) felszíni sémáját általában egy DGVM adja (Sitch et al., 2012).

Bonan (2015) kategorizálása szerint a biogeokémiai modellek az LSM-ek harmadik generációjába tartoznak. A biogeokémiai modellek igen részletes leírást nyújtanak a növényi folyamatokról (fotoszintézis, allokáció, növényi szárazságsztrezz, tápanyag stressz,

fenológia, öfenntartó légzés, avarképződés, az avar lebontása, a talajban lévő mikrobiális folyamatokhoz kapcsolódó  $\text{CO}_2$  kibocsátás stb.). Emiatt a modellek beállítása (paraméterezése) nem egyszerű feladat, és sokszor akár 100 feletti növényi illetve talajparaméter beállítását is magában foglalja. A modellek komplexitása miatt a folyamatos validáció nélkülözhetetlen. Ez kis térskálán főként az eddy-kovariancia mérések segítségével lehetséges, de egyéb kiegészítő információk (LAI, biomassza) használata is nélkülözhetetlen.

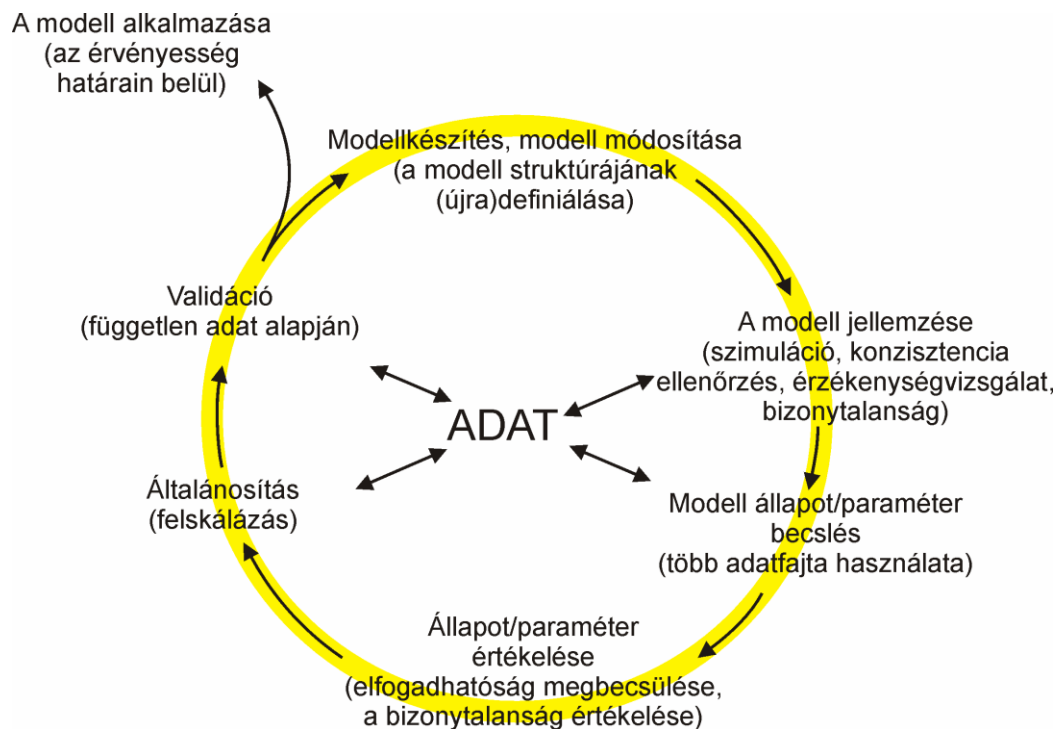
A biogeokémiai modelleket eleinte a természetes (háborítatlan) növényzet folyamatainak leírására fejlesztették ki (Running et al., 1988; 1991; 1993; White et al., 2000; Hidy et al., 2007). Tekintve, hogy az emberi tevékenység a múltban alapvetően formálta át bolygónk felszínét, és tekintve, hogy óriási területeken befolyásoljuk a felszíni folyamatokat jelenleg is, a modellezést ki kellett terjeszteni kezelt erdők, szántóföldek, gyepek stb. biogeokémiai ciklusának a leírására is (Vitousek et al. 1997).

Az előző fejezetben a műholdas távérzékelés vonatkozásában már volt szó az ún. adat-orientált modellekről. Ezek a modellek alapvetően építenek felszíni vagy távérzékelésen alapuló adatokra, de tartalmazznak modellezett összefüggéseket is a térbeli általánosítás érdekében. Többfajta adat-orientált modell létezik, ezek közül megemlíthetők a műholdas távérzékelésen alapuló produktumok (Running et al., 2004; Jung et al., 2011), illetve az eddy kovariancia adatokon alapuló felskálázott adatbázisok (Papale and Valentini, 2003; Bodesheim et al., 2018; Jung et al., 2020). A közismert MODIS szenzor adatain alapuló ún. MOD17 produktum, illetve a Jung et al. (2011) adatbázis a GPP-re vonatkozó információt nyújt, eltérő térbeli felbontásban, és globális lefedettséggel (Gelybó et al., 2013; Kern et al., 2017). Kiemelendő a Bodesheim et al. (2018) adatbázis, ami fél órás időbeli felbontásban közöl felskálázott, FLUXNET adatokon alapuló szénáramokat, szintén globális léptékben.

Az utóbbi évtizedben vált népszerűvé az ensemble modellező (vagy multimodell) technika alkalmazása a szénciklus kutatásában. Az időjárás számszerű előrejelzéséből átvett technikát alkalmazza az MsTMIP projekt (Huntzinger et al., 2017; Schwalm et al., 2019), illetve a már említett TRENDY is (Sitch et al., 2012; Friedlingstein et al., 2020). A hazai vonatkozások miatt megemlíthető a MACSUR, illetve AgMIP kezdeményezés is (Martre et al., 2015), ami bár elsősorban szántóföldi növénytermesztéssel illetve gyepekkel kapcsolatos modellekre fókuszál, de az említett elvek miatt (modellek közötti határ elmosódása) tulajdonképpen sok biogeokémiai modellt is összefog (Sándor et al., 2016; 2017). Az ensemble módszer használata abban az értelemben is hasznos, hogy szorgalmazza a korábban izoláltan működő kutatócsoportok együttműködését. A multimodell megközelítést használó projektek révén áttekintést kapunk az aktívan használt modellekről is. A teljesség igénye

nélkül a jelenleg is használt fontosabb biogeokémiai modellek a Biome-BGC, a CABLE, a CLASS-CTEM-N+, a CLM család, a DLEM, az ECOSYS, a GTEC, a Hyland, az ISAM, a JULES, a JSBACH, az LPJ illetve LPJ-GUESS, az MC1, az OCN, az ORCHIDEE, a TEM6, az SDGVM, a TEM, a TRIPLEX-GHG, a SiBCASA, a VEGAS, a VISIT és az YIBs (Schwalm et al., 2018; Friedlingstein et al., 2020).

A biogeokémiai modellek és a megfigyelések használata kapcsán megemlítendő a modell-adat fúzió (model-data fusion, MDF) koncepciója (Wang et al., 2009; Keenan et al., 2011). Az MDF túlmutat a modellek mérési adatokon alapuló beállításán (kalibráció, modell optimalizálás; 2.2. ábra). Magában foglalja a modellek nagyobb térskálán történő alkalmazását, a modellek szisztematikus hibáinak feltárását, a modell fejlesztését az újonnan feltárt mechanizmusok figyelembe vétele szempontjából, stb. Munkám során igyekeztem az MDF minél több komponensét alkalmazni.



2.2. ábra. A modell-adat fúzió lépései (forrás: Keenan et al., 2014).



### 3. A szénmérleg mérése Magyarországon

Ebben a fejezetben hazai kísérleti állomásokon történt mérések alapján számszerűsítem a szénmérleg komponenseit, illetve bemutatom a mérések felhasználásával készült egyéb publikációkat is, ahol meghatározó szerepem volt. A vonatkozó módszertan és eredmények részletesebben elérhetők a megjelent publikációkban (Barcza et al., 2003; 2008; 2009a; 2020; Haszpra et al., 2005; Gilmanov et al., 2007; 2010; Nagy et al., 2010; Tóth et al., 2010; Yi et al., 2010).

A bioszférikus szénmérleg monitorozására létrehozott első hazai eddy kovariancia mérés Haszpra László kollégám kezdeményezésére létesült (Haszpra et al., 2001; Haszpra, 2005). A mérés helyszíne a Vas megyei Hegyhátsál település ( $46^{\circ}57'N$ ,  $16^{\circ}39'E$ , 248 m tengerszint feletti magasság), ahol az Antenna Hungária TV-adótornyának felműszerezésével 1994 óta üzemelt egy, a légköri  $CO_2$  koncentráció monitorozását végző mérőállomás (Haszpra, 1999; Haszpra és Barcza, 2005). Itt 1997-ben lett telepítve a torony körül elhelyezkedő vegyes mezőgazdasági terület szénforgalmát monitorozó műszeregyüttes, 82 m magasságban. Ugyanitt 1999-től kezdődően monitoroztuk a tornyot övező kvázitermészetes gyeperő szénforgalmát ugyancsak eddy kovariancia módszerrel, 3 m magasságban. Ez utóbbi mérés technikai okokból először 2000 végéig működött, majd 2016 szeptemberétől 2019 februárig üzemelt.

Bár a két eddy kovariancia mérés egy helyszínhez kötődik, a növényzet eltérő tulajdonságai és viselkedése, illetve az emberi beavatkozás jellege miatt a két ökológiai rendszer szénmérlege nem tárgyalható együtt. Emiatt a két mérőrendszer eredményeit külön mutatom be.

#### 3.1. Módszertan

Hegyhátsál település Nyugat-Magyarországon található, Vas megyében, Körmendtől nem messze, 248 m tengerszint feletti magasságban. A mérés központi eleme a 117 m magas TV adótorony, ami a falutól kb. 1 km-re, délkeletre található ( $46^{\circ}57'N$ ,  $16(39'E)$ ). A mérőműszerek a TV adótoronyon, az adótorony földszintjén elhelyezkedő műszerszobában, illetve a TV adótorony kertjében található mérőárbócra vannak telepítve. A TV torony egy vegyes mezőgazdasági területen áll, ahol a Magyarországon jellemző kisparcellás földművelés zajlik elsősorban. Kisebb erdőfoltok, lakott területek illetve gyeperő területek is

találhatók a torony környezetében (Barcza et al., 2009a). A mérőtorony kertje be van gyepesítve, és évente kétszer kaszálják.

Mivel Hegyhátsálon szabványos meteorológiai mérések nem folynak, ezért az állomás éghajlati viszonyai közeli meteorológiai állomás adataival jellemezhető (Farkasfa, 46°55'N, 16°19'E, 312 m tszf.). Farkasfán a sok éves (1961-1990) átlaghőmérséklet 8.9°C, az átlagos csapadékösszeg pedig 759 mm.

Két eddy kovariancia elven működő mérőrendszer is kapcsolódik Hegyhátsálhoz, és az alább bemutatásra kerülő eredmények alapvetően a két rendszer adatai alapján lettek származtatva. Az eddy kovariancia mérés elvét itt csak röviden mutatom be, mert másutt részletes információ található róla (Barcza, 2001; Haszpra et al., 2005; Pintér, 2009; Aubinet, 2012; Barcza et al., 2020), és erősen technikai jellegű. Az eddy kovariancia módszer egy mikrometeorológiai módszer, ami nagy pontosságú szenzorok segítségével becsli a nyomanyagok, a momentum, illetve az energia függőleges áramát, amelyet a turbulencia közvetít a felszín és a légkör között. A CO<sub>2</sub> anyagáram származtatásához szükség van egy 3 dimenziósszónikus anemométerre, és egy gyors válaszidejű, általában infravörös elnyelés elvét használó gázanalizátorra (infrared gas analyzer, IRGA). Hegyhátsálon zárt utas IRGA-kat használunk, ami azt jelenti, hogy a tornyon telepített szónikus anemométer melletti pontból egy beszívócsövön keresztül jut be a mintázott levegő az IRGA-ba. A turbulencia által függőlegesen szállított CO<sub>2</sub> anyagáram (fluxus) a vertikális szélesség, illetve a CO<sub>2</sub> keverési arány fluktuációjának kovarianciája alapján számítható, ami az NEE származtatásának egyik tagja (alacsony mérőtoronyok esetén közelítőleg megadja a teljes NEE-t). A fluxusszámítás egy sok lépésből álló algoritmus alapján történik, ami részletesen dokumentálva van PhD értekezésemben, illetve a megjelent szakkikkekben (Barcza, 2001; Barcza et al., 2003; Haszpra et al., 2005; 2018; Barcza et al., 2009; 2020). A fluxusszámítás eredményeit tovább elemzem, és a számított fluxus adatok alapján származtatok további áramokat (GPP és Reco; Reichstein et al., 2005), adatpótló eljárást alkalmazok (gap filling; Falge et al., 2001), illetve integrálom az eredményeket napi, havi és éves szinten (Barcza et al., 2003; Farkas et al., 2010; Barcza et al., 2020). A kalibráció és a tárolási tag számítása a profilrendszer nagy pontosságú adatain alapul (Barcza, 2001; Haszpra et al., 2001).

Hegyhátsálon a gyep felett található, 3 m magasságban kialakított EK rendszer eleinte egy Kaijo-Denki DA-600 szónikus anemométerből és egy LI-COR LI-6262 típusú infravörös CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O gázanalizátorból állt (1999-2000). A rendszer létrehozását egy japán-magyar TÉT program támogatta, Iványi Zsuzsa vezetésével. A szónikus anemométer 2001 elején tönkrement, és pótlását a magas költségek miatt csak 2006-ban tudtuk megoldani. 2006

szeptemberében indult újra a mérés, egy GILL R3-50 szónikus anemométerrel. A műszerezettségéről további részleteket a Barcza et al. (2003) illetve Nagy et al. (2010) tanulmányokban közzöltünk. A kiegészítő mérések között kiemelendő a fotoszintetikusan aktív sugárzás mérése (photosynthetically active photon flux density; PPF), illetve a talajnedvesség mérése a gyepes mérőtorony mellett 10-40 cm mélységben. Fontosnak tartom megjegyezni, hogy a 3 m magasságban üzemelő rendszer eredményeinek értelmezéséhez LAI méréseket kezdeményeztem, ceptométer segítségével (Decagon AccuPAR LP-80). A LAI mérések bizonytalanságát 6 ismétléssel biztosítottam.

A 82 m magasságban működő mérőrendszer eleinte egy Gill Windmaster szónikus anemométerből és egy LI-COR LI-6262 típusú gázanalizátorból állt (a 3 m-es rendszerhez hasonlóan). A szónikus anemométert 2002-ben cseréltük le egy GILL R3-50 típusúra (Haszpra et al., 2005; Barcza et al., 2020). A mérési frekvencia a 3 m-es rendszer esetén 5 Hz, míg a 82 m-es rendszer esetén 4 Hz. A gyep feletti rendszer FLUXNET kódja HU-He2, míg a regionális rendszer kódja HU-He1. 2015-ben a 82 m magasan üzemelő HU-He1 kiegészült egy gyors válaszidejű, Los Gatos Research 913-0014 típusú  $N_2O/CO/H_2O$  analizátorral (Haszpra et al., 2018). Az új műszer révén származtatom az  $N_2O$  és a CO vertikális tömegáramát 2015 júliusa óta. Tárolási tag korrekció alkalmazására ezen rendszer esetén nincs mód.

Az adatok elemzéséhez forrásterület (footprint) elemzést végeztem (részleteket lásd Barcza et al., 2003; Barcza et al., 2009a). A 82 m magasan elhelyezkedő EK rendszer elemzéséhez műholdas adatokat is felhasználtam, amit Kern Anikó bocsátott a rendelkezésemre. Bizonytalanság becslő módszereket dolgoztam ki a fluxusok elemzéséhez, illetve a származtatott éves összegekhez (részleteket lásd Barcza et al., 2020). Számos további elemzés készült a fluxusok alapján. Vizsgáltam az NEE-fény kapcsolatot, és az éjszakai adatok alapján az NEE hőmérséklet függését. A fluxus particionálás kapcsán adaptáltam Reichstein et al. (2005) módszerét, és változó méretű időablakok alapján becslöm az éjszakai NEE-hőmérséklet összefüggés extrapolálásával a nappali respirációt, majd ebből a GPP értékét. A fluxus particionálás alapvető információt szolgáltat a modellek részére, ezért a származtatás minőségellenőrzésére külön hangsúlyt fektettem. Vizsgáltam az ún.  $u_*$  korrekció szükségességét (Aubinet, 2012), aminek eredményeképpen úgy találtam, hogy vélhetőleg a kiegyenlített topográfia miatt nincs szükség az  $u_*$  korrekció alkalmazására (ami elhagyja az éjszakai, fejletlen turbulencia által okozott fluxusokat). Az  $u_*$  korrekció elhagyását részben a tárolási tag is indokolja. Kísérletet tettem mindkét rendszer esetén a horizontálisan elszállított

szén becslésére, így módonban állt a teljes szénmérleg (NBP) meghatározása is (Nagy et al., 2010; Barcza et al., 2020).

A 2020-ban megjelent tanulmányban további statisztikai vizsgálatokat végeztem a 82 m magasan végzett mérések értelmezése érdekében. Itt alkalmaztam az ún. kritikus időszak elemzést, amit Kern Anikóval közösen fejlesztettünk tovább és alkalmaztuk Magyarországon (Kern et al., 2018). A módszer lényege, hogy a szokásos szezonális vagy éves adatok helyett rövidebb időszakok meteorológiai adatait használjuk fel a különböző folyamatok többváltozós lineáris regresszió alapú elemzésére. A módszer eredményei egyszerű és könnyen értelmezhető betekintést nyújtanak arra vonatkozóan, hogy mely időszak a meghatározó pl. az éves növényi produkció vagy szénmérleg vonatkozásában.

Említést érdemel, hogy a fluxusmérések alkalmazásának két fő iránya van. Egyrészt az EK rendszerek üzemeltetői hagyományosan éves összegeket származtatnak a fluxusokból, amihez szükség van egy teljes körű adatpótlásra, még azokon a napokon is, amikor egyáltalán nem üzemelt a rendszer technikai okokból. Másrészt a modellező közösség a napi adatokat használja elsősorban, ahol szintén szükség lehet adatpótlásra. Tapasztalatból tudom, hogy sok modellező kellő körültekintés nélkül használ eddy kovariancia adatokat, ami sajnos azt jelenti, hogy teljesen pótolta napokat is használnak a modellek beállítására/validálására. Itt szeretném megjegyezni, hogy ez nem helyénvaló, hiszen az adatpótlás egyfajta statisztikai modell, amit nem szabad összehasonlítani folyamat-orientált modell eredményével. Modellező munkám során kizárólag olyan napok adatait használtam fel a modell eredményének ellenőrzésére, ahol az adatfedettség legalább 75 % volt.

## 3.2. Eredmények

### 3.2.1. Eredmények – eddy kovariancia mérések gyep felett

A 3.1. ábrán a gyep feletti EK méréshez használt mérőtornyot, annak környezetét, illetve az egyik alaplászert mutatom be (a eleinte használt Kaijo-Denki szónikus anemométert, illetve a GILL R3-50 szónikus anemométert). A fotókon látható, hogy egy produktív zárt gyepről van szó, vegyes fajösszetétellel.

Az eddy kovariancia mérések esetén fontos vizsgálni, hogy a turbulens örvények a felszín mely részeiről szállítanak információt a mérőrendszerhez. Ennek meghatározása forrásterület (angol kifejezéssel footprint) analízis segítségével történik, ami térben explicit

módon meghatározza, hogy a mért függőleges áramok milyen területről származnak, és ezen területek hosszú távon milyen súllyal járulnak hozzá a mért információhoz (Schmid, 2002).

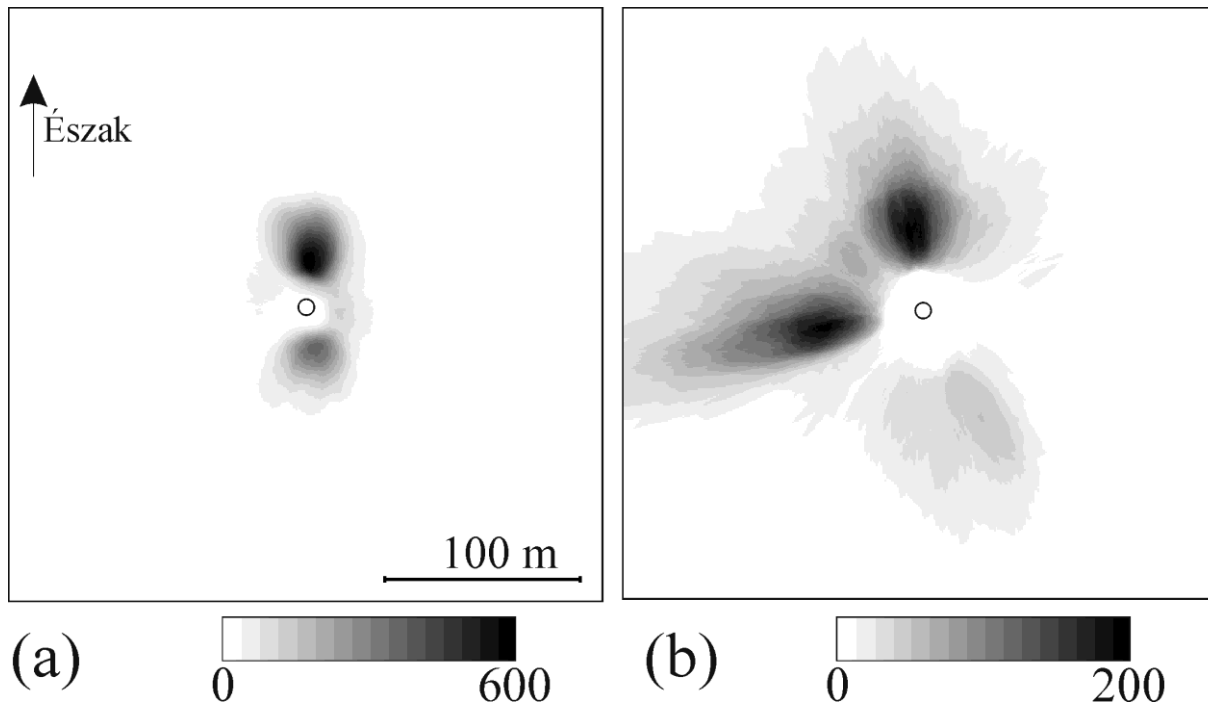


3.1. ábra. A HU-He2 EK állomás fényképeken. Bal oldal: az 1999-2000-ben üzemelő rendszer az eredeti Kaijo-Denki anemométerrel. Jobb oldal: a rendszer immár a GILL R3-50 anemométerrel, ami 2006 októberétől üzemelt. Látható, hogy a beszívócső helyzete változott a műszercsere után. A két fotó más szemszögből készült (a szónikus anemométert tartó árbóc északi tájolású). A LI-6262 analizátort tartalmazó műszerház nem látható a fotókon.

A gyep felett telepített EK rendszer által regisztrált adatok alapján végeztem el a forrásterület vizsgálatot Schmid (1994; 1997) analitikus footprint modelljével. A 3.2. ábrán a forrásterület analízis eredményét mutatja be (Barcza et al., 2003). Az elemzés szerint a forrásterület jól körbehatárolt mind éjjel, mind nappal, és túlnyomó részt a gyepre esik, ahol a mérőrendszer elhelyezkedik (ez nem minden EK torony esetén van így, ami a felszínborítottság tagoltságával függ össze; Göckede et al., 2008). Érdekes a valószínűleg topográfiai okokra visszavezethető, éjszaka megjelenő nyugatias tájolású forrásterület megjelenése. Összességében elmondható, hogy a mérőtorony 100 m-es környezetéből származik a regisztrált jel túlnyomó része.

A HU-He2 rendszer eredményei alapján származtattam és vizsgáltam a  $\text{CO}_2$  áramok alakulását, napon belüli félórás időléptéktől a szezonális alakuláson át az éves összegekig. A nappali minimum NEE  $-1,2$  és  $-1,4 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  között alakult. A Reco a nyugalmi

időszakban tipikusan  $0,01$  és  $0,1 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  érték között változott. A vegetációs időszakban értéke  $0,2-0,4 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  között alakult.

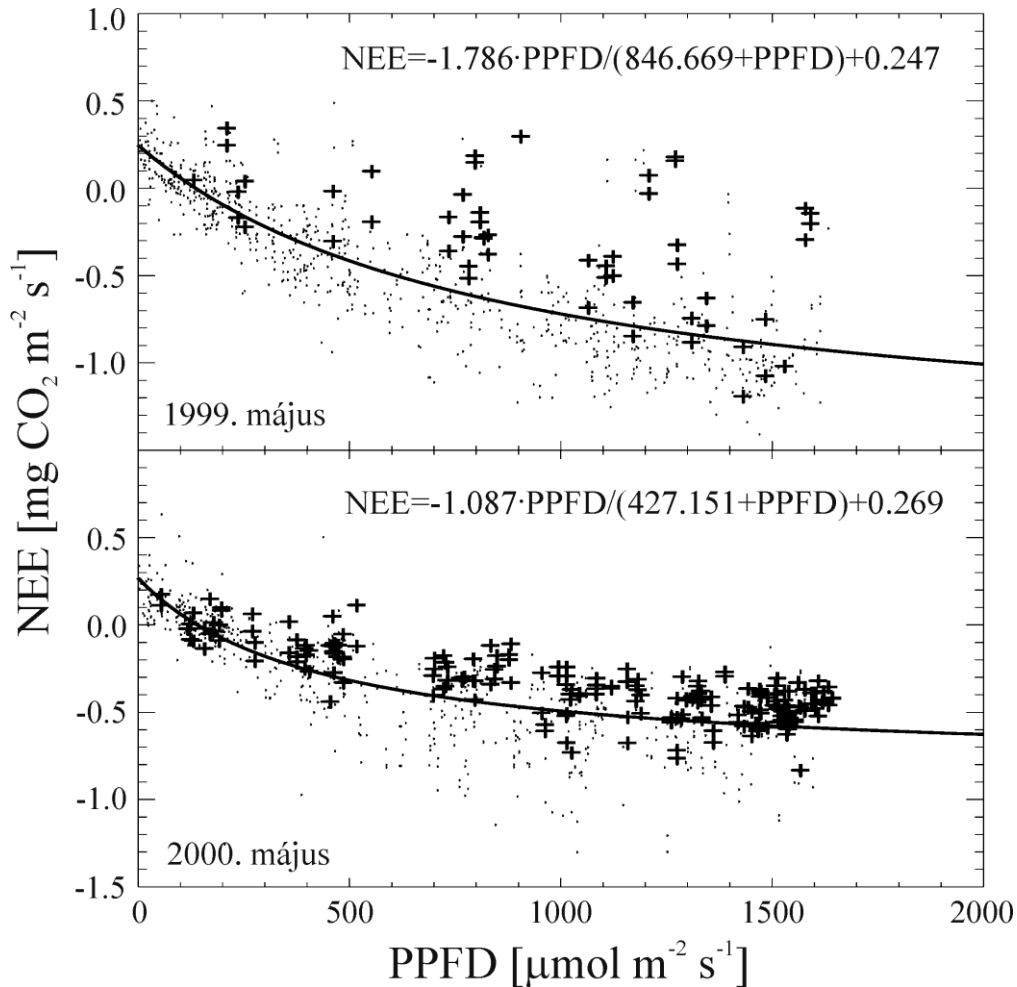


3.2. ábra. A HU-He2 toronyhoz tartozó forrásterület (footprint) térkép nappal (a) és éjszaka (b). A gyakoriságot ábrázoló színárnyalatos kép 1999 nyarának adatai alapján készült. Jól látható az eltérés a nappali és az éjszakai adatok forrásterülete között. A mérőtornyot az ábra közepén levő kör szimbolizálja.

A félórás adatok alapján lehetővé válik a nappali időszak, illetve az éjszakai időszak NEE-jének modellezése a környezeti változók alapján. A 3.3. ábrán a nappali fényintenzitás-NEE görbéket ábrázoltam (Barcza et al., 2003) 1999 és 2000 májusa alapján. 1999 májusa az átlagosnál csapadékosabb volt, míg 2000 májusa szárazabb, ami jól felismerhető az ábrákon (kevésbé volt negatív az NEE 2000 májusában). A vizsgálatba bevontam a telítési hiányt is (vapor pressure deficit; VPD), mert feltételeztem, hogy a légköri szárazság a sztóma záródásán keresztül befolyásolhatja a fotoszintézis intenzitását, és így az NEE-t is. A 3.3. alapján jól kirajzolódik a PPFD-NEE kapcsolat VPD függése, ami rámutat a légköri szárazság szerepére a szénmérleg vonatkozásában.

A 3.4. ábra az éjszakai NEE (ami a fotoszintézis hiánya miatt a teljes respiráció) hőmérséklet függését ábrázolja. Az ábra a szokásos fél órás időlépcső alkalmazása helyett éjszakai átlagos értékekkel dolgozik, mivel a szélcsendes időszakokat időnként felváltó szelesebb idő a mechanikus turbulencia révén okozhat olyan magasabb NEE értéket, amit nem szabad a hőmérsékletnek tulajdonítani. A Barcza et al. (2003) tanulmányban külön is

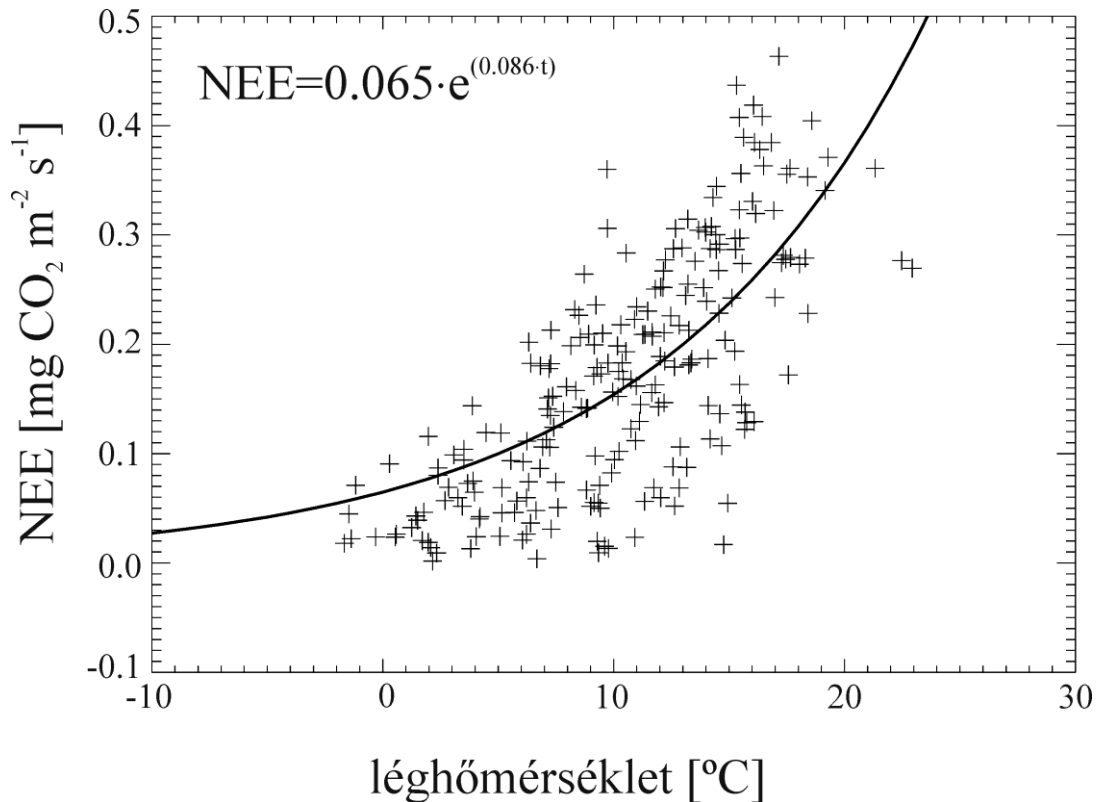
foglalkoztam az  $u_*$  korrekció fentebb említett problémakörével (4. ábra a szakcikkben). Itt rámutattam, hogy szükségtelen az  $u_*$  korrekció használata Hegyhátsálon, mert turbulencia hiányában sem „vész el” az éjszaka kilélegzett  $\text{CO}_2$ , hanem idővel átkeveredik, és megjelenik a napi összegekben.



3.3. ábra. A nappali NEE a fotoszintetikusan aktív sugárzás függvényében 1999 májusában és 2000 májusában. A negatív NEE  $\text{CO}_2$  felvételt jelent. A plusz jel a magas VPD-vel jellemezhető időszakok adatait jelentik, míg a pöttyök az alacsony VPD-hez tartoznak. Ún. négyszögletes hiperbola függvényt illesztettem az adatokra (magyarul egyenlő szárú hiperbola függvényként is ismert).

A hiányzó adatok pótlásával és a félórás adatok integrálásával válik lehetővé a napi léptékű szénmérleg komponensek számítása. A napi NEE összegek az elvárásoknak megfelelően követték a növényzet aktivitásának szezonális alakulását (Barcza et al., 2003). A legnegatívabb napi NEE összeg kb.  $-9 \text{ gC m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$  volt a mérési időszakban.

dc\_1959\_21



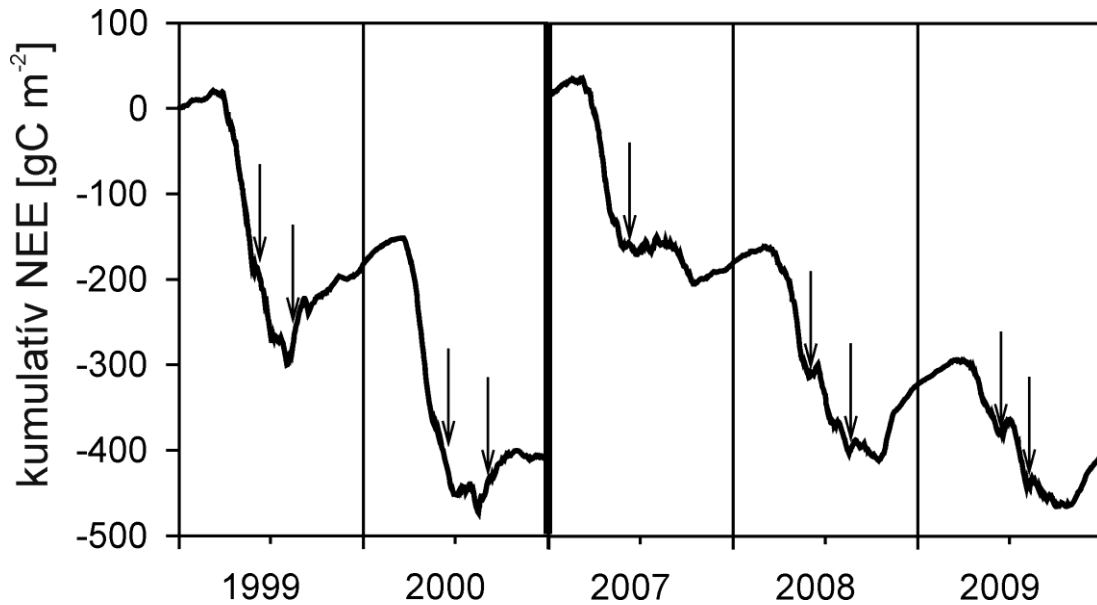
3.4. ábra. Az éjszakai átlagos NEE az éjszakai átlagos léghőmérséklet függvényében (+ szimbólum). Az adatok a vegetációs időszakot reprezentálják. Exponenciális függvényt illesztettem az adatokra (folytonos vonal). A közölt egyenletben  $t$  a léghőmérséklet szimbóluma Celsius fokban kifejezve.

Érdekesség, hogy melegebb időszakban még januárban is mértünk CO<sub>2</sub> felvételt, ami összhangban van a szakirodalmi eredményekkel (Tuba et al., 2008). A tavaszi intenzív növekedés során váltott előjelet az NEE, így a gyepek a vegetációs időszak túlnyomó részében CO<sub>2</sub> nyelő volt.

A napi adatok alapján ábrázolható az NEE éves dinamikája (Barcza et al., 2003), valamint kumulatív NEE görbék származtathatók, amelyek szemléletesen mutatják a forrásnyelő jellegét a talaj-növény rendszernek. A 3.5. ábrán jól látható, hogy a szén-dioxid felvételt (amit a negatív NEE jelez) rövid időre megszakítja a kaszálás, de a gyepek hamar regenerálódnak, és valószínűleg az erőforrások (vagyis a fotoszintézis során korábban létrehozott szénhidrátok) átcsoportosításával (gyors új levélnövekedés) a CO<sub>2</sub> nyelés helyreáll (Nagy et al., 2010).



dc\_1959\_21



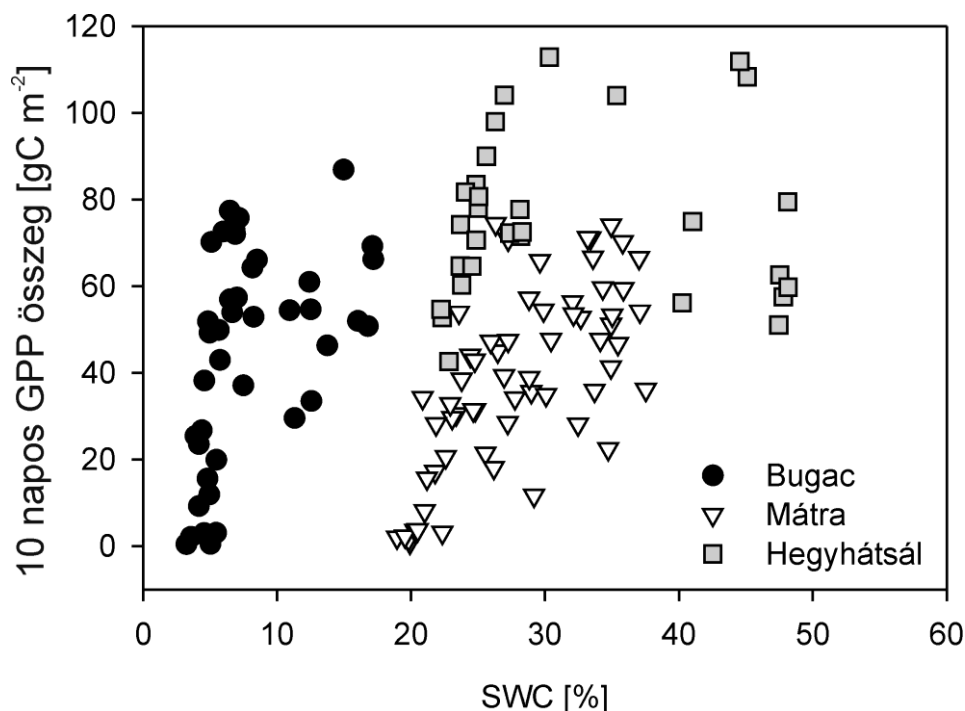
3.5. ábra. Kumulatív NEE a HU-He2 mérőhelyen az 1999-2000 illetve 2007-2009 időszakban. A nyilak a kaszálás időpontjait jelzik.

A módszertanban említett fluxus particionáló módszer alapján a mért NEE felhasználásával félórás léptékben származtattam GPP és Reco értékeket, és ezeket napi szinten integráltam a teljes mérési adatsor felhasználásával. A teljes mérési időszakban a maximális napi GPP  $16,5 \text{ gC m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$ , míg a Reco esetén ez  $14 \text{ gC m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$  volt. A napi GPP és a Hegyhátsálon mért talajnedvesség adatok napi átlaga alapján készült a 3.6. ábra, kiegészítve a Nagy et al. (2010) könyvfejezetben tárgyalt Bugac és Mátra (Szurdokpuszói) állomások eredményeivel.

Az ábrán jól látható, hogy az eltérő talajtípussal jellemezhető mérőhelyeken eltérő a GPP és a talajnedvesség kapcsolata (Nagy et al., 2010). Hegyhátsálon jó minőségű barna erdőtalaj a jellemző, aminek a víztartó képessége igen jó. A talaj időnként a sok csapadék miatt telítődik. Ez utóbbi a kiszáradással együtt egyaránt negatívan hat a fotoszintézisre, és ebből fakadóan lesz haranggörbe alakú a GPP-SWC függés. Ez a telítődés miatti leszabályozás nem jellemző Mátra és Bugac állomásokra. Az eredmények rámutatnak a talajtípus fontosságára a gyepek szénmérlege vonatkozásában.

Kitekintésként megemlítem, hogy a hazai gyepek vizsgálata távérzékelte adatok alapján jelenleg is zajlik Kern Anikóval való együttműködés keretében, ami kiegészíti az *in situ* mérési eredményeket. Az új NÖSZTÉP ökoszisztéma alaptérkép részletes gyeptérképezést is tartalmaz Magyarországra (Tanács et al., 2019), ami új lehetőségeket nyit a vizsgálatok

kapcsán. Itt a gyepék éves dinamikája, szárazságra való reagálása kitűnően vizsgálható a különböző gyepkategóriákra.



3.6. ábra. A származtatott GPP 10 napos összegei a 10 napos átlagos talajnedvesség értékek függvényében Bugacon, a Mátrában és Hegyhátsálon (Nagy et al., 2010). A GPP adatok a május és augusztus közötti időszak alapján lettek származtatva.

A 3.1. táblázat foglalja össze a teljes gyep felett végzett EK mérés eredményeit éves szinten. Ez az adatsor eddig még nem lett publikálva, mivel eddig csak a korábbi évek eredményeit közöltük (Barcza et al., 2003; Nagy et al., 2010). Ahhoz, hogy a teljes szénmérleget származtatni tudjam (az NBP-t; lásd 2. fejezet) szükség van a laterális szénmozgás jellemzésére. Hegyhátsálon az ott dolgozó technikus kolléga révén hozzájutottam a kaszálás után elszállított szén mennyiségéhez, és abból a gyepterület alapján (kb. 2,3 hektár) származtattam az 1 m<sup>2</sup> felületre eső elszállított szén mennyiségét. Feltételezhetjük, hogy a kaszáláson kívül más horizontális szénmozgás nem történt. Ez alapján a -NEE és az elszállított szén alapján becsülhető az NBP, ami tulajdonképpen a talaj-növény rendszer teljes szénmérlege (lényegében a talajban tárolt szén változásával egyenértékű lágyszárúak esetén).

A 3.1. táblázat alapján nyilvánvaló, hogy az NBP erősen változik az évek közt, és egyaránt jellemző rá a negatív érték (szénvesztés), és a pozitív (szénmegkötés). Az átlagos NBP -25 gC m<sup>-2</sup> év<sup>-1</sup>, ami azt sugallja, hogy hosszabb távon a hegyhátsáli gyep szénvesztő. Természetesen a megfigyelési évek száma nem elegendő ennek a bizonyításához, és további

vizsgálatokra van szükség. Mindenesetre aggasztó előjel lehet az éghajlatváltozás szempontjából az eredmény.

3.1. táblázat. Éves eredmények a hegyhátsági gyepre vonatkozóan. Csak azokat az éveket mutatom be, amikor elegendő mennyiségű adat állt rendelkezésre az éves összegek származtatásához. Az NBP a lekaszált és elszállított széna mennyisége alapján lett becsülve, az NEE felhasználásával.

	éves átlaghő- mérséklet [°C]	vegetációs időszak* átlaghő- mérséklete [°C]	éves csapadék- összeg [mm]	vegetációs időszak* csapadék- összege [mm]	NEE [gC m <sup>-2</sup> év <sup>-1</sup> ]	GPP [gC m <sup>-2</sup> év <sup>-1</sup> ]	Reco [gC m <sup>-2</sup> év <sup>-1</sup> ]	levágott és elszállított szén [gC m <sup>-2</sup> év <sup>-1</sup> ]	NBP [gC m <sup>-2</sup> év <sup>-1</sup> ]
<b>1999</b>	10.5	15.2	735	582	-183	-1786	1603		
<b>2000</b>	11.6	15.7	606	441	-226	-1689	1463	223	<b>3</b>
<b>2007</b>	11.4	15.3	786	628	-227	-1523	1295		
<b>2008</b>	11.4	15.1	661	543	-165	-1681	1516	291	<b>-126</b>
<b>2009</b>	11.0	15.5	937	681	-96	-1557	1462	154	<b>-58</b>
<b>2010</b>	10.1	14.4	893	659	-165	-1727	1561	61	<b>105</b>
<b>2012</b>	11.2	15.8	615	495	-83	-1575	1493	114	<b>-31</b>
<b>2014</b>	11.8	15.4	1017	794	-236	-1821	1584	205	<b>32</b>
<b>2015</b>	11.8	15.8	631	536	-40	-1235	1195	136	<b>-97</b>
<b>2016</b>	11.2	15.3	733	539	-173	-1673	1501	142	<b>30</b>
<b>2017</b>	11.0	15.7	641	519	-164	-1427	1263	250	<b>-86</b>

\* áprilistól októberig

A fő kérdés természetesen az, hogy a környezeti feltételek milyen mértékben befolyásolják az éves szénmérleget. Az EK mérés első néhány évének tapasztalata alapján úgy tűnt, hogy az éves csapadékösszeg és az éves NEE viszonylag erős kapcsolatban áll (Nagy et al., 2010). Az újabb évek adatait is figyelembe véve azonban ez a kapcsolat már nem jelenik meg. Jelenleg a legerősebb statisztikai összefüggés a vegetációs időszak átlaghőmérséklete és az NBP között áll fenn ( $R^2=0,33$ ; növekvő átlaghőmérséklet esetén az NBP csökken), de a kapcsolat nem szignifikáns. Hasonló, de gyengébb kapcsolat áll fenn az éves GPP, illetve Reco és a vegetációs időszak átlaghőmérséklete között (növekvő átlaghőmérséklet esetén mind a GPP mind a Reco csökken). Korai lenne bármilyen biztos dolgot kijelenteni, de ha hosszabb távon is beigazolódik ez a kapcsolat, akkor az éghajlatváltozással összefüggő melegedés a gyep kisebb produkcióját okozhatja, ami az NBP csökkenésével is járhat. Ez utóbbi kapcsán, ahogy a 3.1. táblázatból látjuk, ez szénvesztést is okozhat (negatív NBP), ami a talajdegradáció előjele, és amennyiben nagyobb térskálán is fennáll a jelenség, pozitív visszacsatolást jelenthet a szén ciklus-éghajlat kapcsolatban.

Záró gondolatként megemlítendő, hogy az HU-He2 rendszer adatsora a később tárgyalt modellező munka szempontjából alapvető jelentőségű lett. A kiegészítő LAI

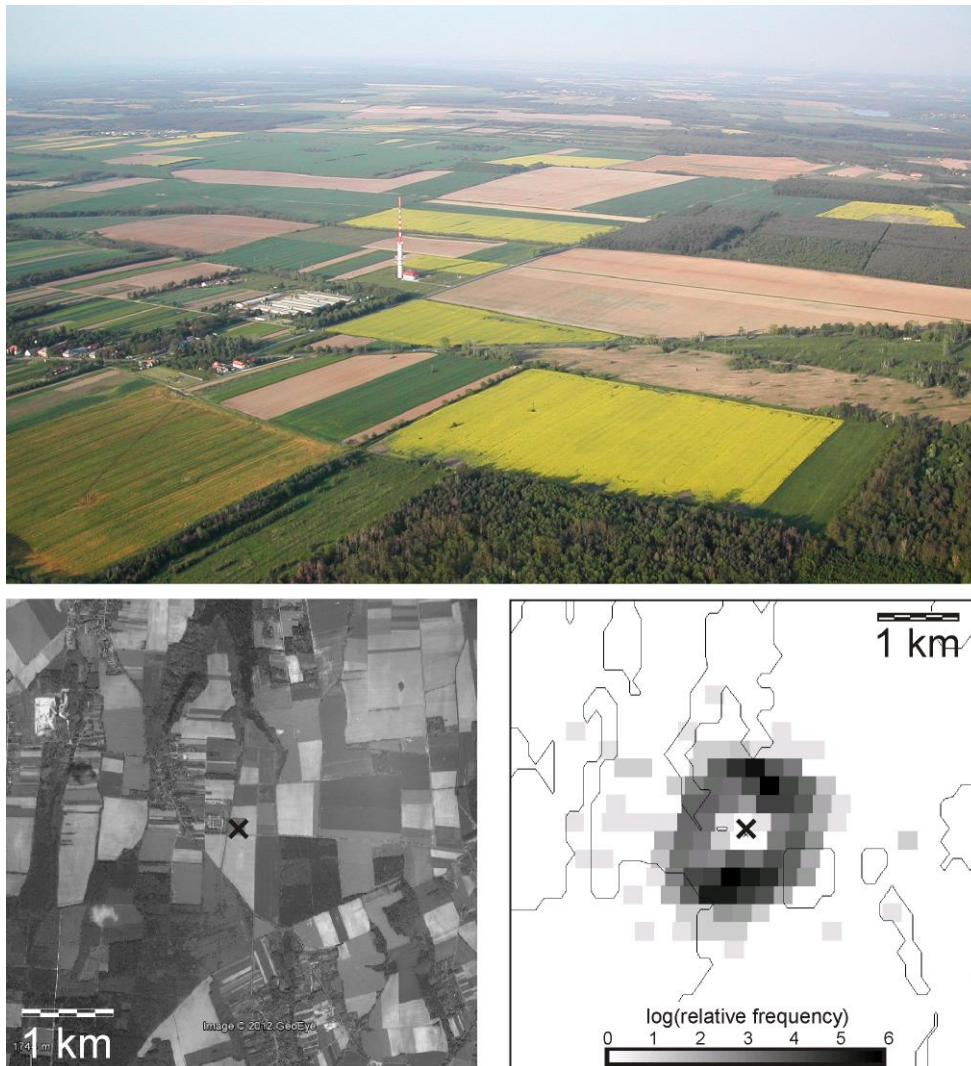
mérésekkel egy adatgazdag kísérleti állomásnak számít a gyep feletti mérés. Többek között a későbbiekben bemutatott RBBGCMuso szoftvercsomag demo anyagának is használjuk az EK eredményeket.

### 3.2.2. Eredmények – eddy kovariancia mérések vegyes mezőgazdasági terület felett

Míg a 3 m magasságban üzemelő HU-He2 EK torony tipikusnak mondható a FLUXNET hálózaton belül (alacsony mérési magasság, viszonylag homogén felszínborítottság, adott ökoszisztémához köthető szénmérleg komponensek származtatása), addig a 82 m magasságban üzemelő HU-He1 mérőrendszer meglehetősen speciális. Ennek egyrészt a szokatlanul nagy mérési magasság az oka, másrészt a tornyot övező, meglehetősen komplex felszínborítottság. Világszerte kevés számú hasonló, magas torony alapú EK mérés üzemel, aminek révén számos módszertani kihívással kellett szembenéznem az évek során.

A 3.7. ábrán mutatom be a hegyhátsági „magas torony” (tall tower) alapú mérőhelyet, és a környezetét. A légifotó alapján jól látható, hogy a torony környezete Magyarországon tipikusnak mondható kisparcellás mezőgazdasági művelés alatt áll, de láthatók erdőfoltok is, illetve lakott területek is. A fotón a toronytól jobbra kivehető a 3 m-es mérőrendszer is a torony kertjében.

A 82 m magasságban működő mérőrendszer eredményeinek értelmezése nem a szokásos menetrend szerint történt. Egy EK mérőrendszer esetén a térbeli reprezentativitás általában adott, és a térbeli heterogenitás csupán zaj formájában jelenik meg (zaj alatt a cél-ökoszisztémához nem köthető fluxusadatokat értem; Göckede et al., 2004; 2008). A HU-He1 állomás esetén az adatsor lényegi tulajdonsága, hogy a széliránytól, illetve a légköri viszonyoktól függően mindig más és más felszínborítottsággal jellemezhető hely  $\text{CO}_2$  fluxusát „látja” a rendszer. Más szavakkal, ami az alacsony tornyok esetén „zaj”, az a mi rendszerünk esetén maga a „jel”! Ez a jellegzetesség alapvetően érinti a mérőrendszer eredményeinek értelmezését.



3.7. ábra. A hegyhátsági HU-He1 mérőállomás, és a mért  $\text{CO}_2$  áramok hozzávetőleges forrásterülete. Felső fotó: 2004. május 19-én készült légifotó. Bal alul: a környező régió műholdképen megjelenítve (forrás: Google Earth). Jobb alul: tipikusnak mondható forrásterület statisztika a 2007-es év adatai alapján (Barcza et al., 2009a; Gelybó et al., 2013). Az X az ábrákon az adótorony helyét jelöli. A légifotót Simon Martin készítette.

A fent vázolt nehézségek miatt kutatómunkám kezdeti éveiben foglalkoztam a mért adatok feldolgozásával és számszerűsítésével (Barcza, 2001; Haszpra et al., 2005), és csak ezután, megfelelő módszertani fejlesztések után foglalkoztam azzal, hogy tulajdonképpen minek is mérjük konkrétan a szénmérlegét (Barcza et al., 2009a).

A mérés térbeli reprezentativitásának vizsgálata két lépésben zajlott. Először a CORINE felszínborítottság adatbázist kapcsoltam össze a Kljun et al. (2004) footprint modellel, aminek segítségével származtatni tudtam a főbb felszínborítottság-típusok hozzájárulását a mért NEE adatokhoz. Második lépésként műholdas adatok segítségével a mezőgazdasági területek adatsorát tovább bontottam, és egy saját fejlesztésű módszerrel

különválasztottam az őszi és tavaszi vetésű mezőgazdasági haszonnövényeket (amennyire ezt a műholdas adatok térbeli felbontása lehetővé tette). Ez a művelet kiegészítette a durva „szántóföld” CORINE kategóriát jobban értelmezhető, markánsan eltérő fenológiai ciklussal rendelkező növényi információval. Az eredményeket a 3.2. táblázat foglalja össze.

Az eredmények szerint hosszú időszak átlagában a mért CO<sub>2</sub> áramok eredete 77,5%-ban szántóföldekhez köthető, így indokolt a vegyes mezőgazdasági területre jellemző mérésről beszélni. A teljes jel 39,9%-a őszi vetésű gabonához köthető (őszi búza, árpa, repce), míg kb. 34,4%-a tavaszi vetésűhöz (elsősorban kukorica). A gyepek hozzájárulása is jelentős (kb. 16,3%). Érdemes megemlíteni, hogy itt nyilvánvaló okból nem a TV adótorony kertje az elsődleges forrás. A hozzájárulás évek közötti változékonysága kicsit, ami alól kivételt képeznek a haszonnövények fajtái, ami nyilván a gazdálkodók döntésén alapul.

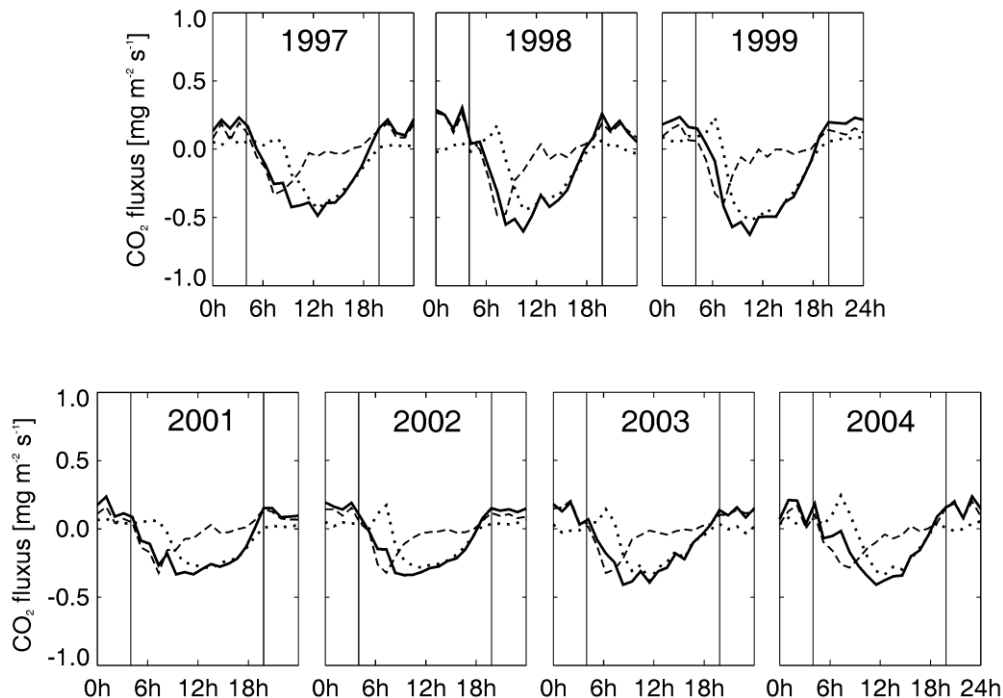
3.2. táblázat. A 82 m magasságban mért CO<sub>2</sub> áramok forrásterülete az 1997-2018 időszakban (Barcza et al., 2020). A százaléktérképek a súlyozott forrásterület függvény alapján készültek, figyelembe véve a felszínborítottság térképét. Az őszi és tavaszi vetésű gabona esetén a hozzájárulás összege mindig kevesebb, mint a szántóföld értéke, mivel nem minden pixelhez rendelhető egyértelműen gabonafajta. Műholdas adatok csak 2000-től álltak rendelkezésre (Terra műhold). 2000-ben nem volt mérés.

	Szántóföld	Őszi vetésű gabona	Tavaszi vetésű gabona	Gyep	Lomblevelű erdők	Beépített területek	Túlevelű erdők	Átmeneti erdős-cserjés területek
1997	75.6%	-	-	18.3%	1.4%	4.0%	0.7%	0.1%
1998	72.7%	-	-	20.3%	2.5%	2.7%	1.6%	0.2%
1999	77.2%	-	-	17.5%	2.4%	1.3%	1.5%	0.0%
2000	-	-	-	-	-	-	-	-
2001	79.1%	42.3%	32.4%	14.8%	2.0%	2.5%	1.4%	0.2%
2002	76.5%	30.9%	42.7%	17.7%	2.9%	1.2%	1.6%	0.0%
2003	80.4%	22.8%	54.7%	14.9%	2.3%	1.6%	0.9%	0.0%
2004	74.8%	32.7%	38.7%	18.8%	3.2%	1.7%	1.3%	0.1%
2005	79.1%	35.0%	40.9%	15.8%	2.5%	1.6%	1.0%	0.1%
2006	77.7%	54.6%	20.3%	16.2%	3.3%	1.5%	1.2%	0.1%
2007	74.8%	43.1%	28.9%	18.2%	3.3%	2.2%	1.4%	0.1%
2008	73.6%	33.0%	38.2%	19.6%	4.2%	1.2%	1.2%	0.0%
2009	76.4%	44.4%	28.7%	17.4%	2.8%	2.3%	1.0%	0.1%
2010	78.3%	28.3%	47.4%	15.2%	3.3%	1.5%	1.5%	0.1%
2011	77.9%	19.1%	55.6%	15.9%	3.2%	1.6%	1.3%	0.0%
2012	77.5%	32.1%	41.9%	17.2%	3.0%	1.5%	0.8%	0.1%
2013	81.2%	44.0%	33.2%	13.3%	3.2%	1.4%	0.8%	0.1%
2014	77.2%	52.9%	18.6%	16.9%	3.0%	1.6%	1.1%	0.2%
2015	80.5%	53.0%	23.2%	13.2%	4.0%	1.1%	1.1%	0.1%
2016	79.7%	52.5%	23.4%	13.8%	4.1%	1.5%	1.0%	0.0%
2017	77.2%	58.3%	15.3%	15.1%	4.9%	1.5%	1.2%	0.1%
2018	80.4%	42.6%	16.5%	12.8%	3.7%	1.5%	1.5%	0.1%
<b>Átlag</b>	<b>77.5%</b>	<b>39.9%</b>	<b>34.4%</b>	<b>16.3%</b>	<b>3.1%</b>	<b>1.8%</b>	<b>1.2%</b>	<b>0.1%</b>

A korábbi, forrásterület vizsgálatával foglalkozó tanulmányban még arra is kísérletet tettem, hogy a mért NEE jelet társítsam a különböző fenológiai ciklusú gabonafajtákhoz (Barcza et al., 2009; 8. ábra). A különböző parcellák közötti „áthallás” miatt a mért jel nyilván zajos, de hasznos a részletes elemzésekhez.

A 82 m magasságban működő EK rendszer szénmérlegre vonatkozó származtatott adatait különböző módszerekkel és szempontok szerint értékeltem és elemeztem. Alább ennek egy összefoglalását mutatom be, hasonló logikát követve, mint a 3 m magasságban üzemelő mérőrendszer esetén.

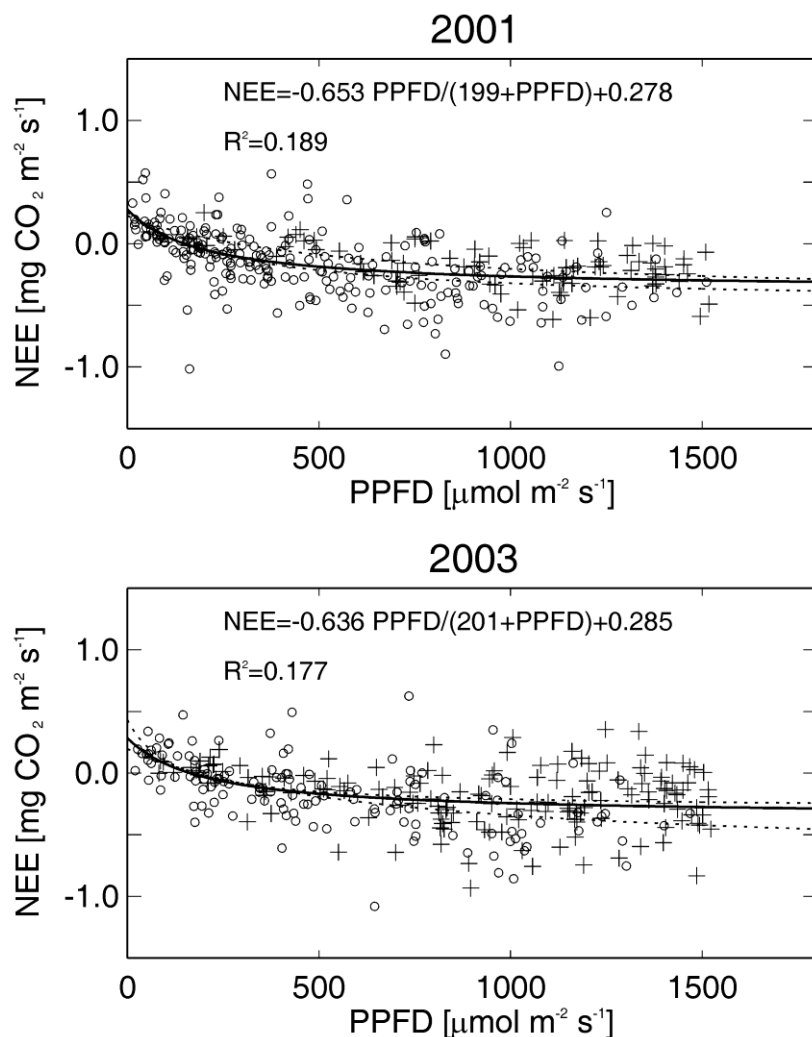
Fontos megemlíteni, hogy a nagyobb mérési magasság miatt óras átlagokat származtattam a turbulens áramok kapcsán. A magas mérőtorony esetén nem lehet eltekinteni az ún. tárolási tag származtatásától, ami a mérés szintje alatt időszakosan felhalmozódó CO<sub>2</sub> profil alapján számszerűsíthető (részletekért lásd Barcza, 2001 illetve Haszpra et al., 2005). Ezt demonstrálja a 3.8. ábra, ahol együtt ábrázoltam a számított turbulens fluxusokat, a tárolási tagot, illetve a kettő összegét, az NEE-t, havi aggregálással. Az ábrák kitűnően szemléltetik, hogy ökológiailag korrekt áramokat kizárólag a tárolási tag figyelembe vételével lehet származtatni (pontozott versus folytonos vonal).



3.8. ábra. Havi szinten átlagolt napi NEE menetek (folytonos vonal), turbulens áram menetek (pontozott vonal; ez maga a nyers CO<sub>2</sub> fluxus), illetve a tárolási tag (szaggatott vonal) az 1997-2004 időszak június hónapjai alapján. 2000-ben nem volt mérés. A függőleges vonalak a napkelte és a napnyugta hozzávetőleges időpontját ábrázolja az x tengelyen.

Az NEE, és a fluxus-particionálás eredményeképpen a GPP illetve Reco származtatása így módon a tárolási taggal korrigált eredmények alapján történt.

A HU-He1 rendszer esetén a nappali minimum NEE  $-1,5 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  értéket is elérhet. A Reco éjszaka  $0,1-0,3 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  értéket vesz fel tipikusan (Haszpra et al., 2005). A 3 m-es rendszerhez hasonlóan vizsgáltam a nappali NEE függését a besugárzástól. A 3.9. ábrán 2001 és 2003 vonatkozásában láthatók erre vonatkozóan eredmények. Összevetve az ábrákat a 3.3. ábrával feltűnő, hogy az NEE kevésbé negatív értékeket vett fel (kisebb  $\text{CO}_2$  felvétel), mint a gyep (ez részben a 2001-2003-as időszakra jellemző szárazságnak is köszönhető; Barcza et al., 2020).



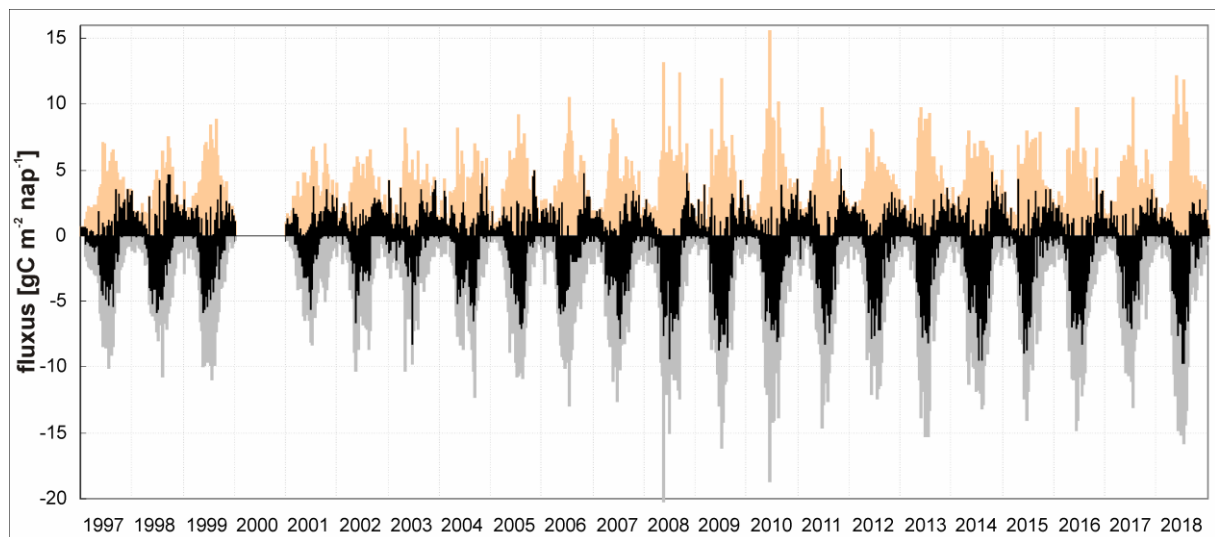
3.9. ábra. Órás NEE a fotoszintetikusan aktív sugárzás függvényében 2001 és 2003 júliusában. A negatív NEE  $\text{CO}_2$  felvételt jelent. A plusz jel a magas (1,5 kPa-nál nagyobb) VPD-vel jellemezhető időszakok adatait jelentik, míg a körök az alacsony VPD-hez tartoznak. Négyzetes hiperbola függvényt illesztettem az adatokra. A folytonos vonal a teljes adatsorra vonatkozó illesztés, míg a szaggatott vonalak a magas, illetve alacsony VPD-vel jellemezhető adatokra illesztett görbét jelölik. Az egyenlet a teljes adatsort jellemzi.



Ezen kívül világosan kirajzolódik, hogy a VPD-től való függés jóval változékonyabb a magas torony esetén, mint a gyep esetén. Ezt valószínűleg az okozza, hogy a mérés során a forrásterület markánsan eltérő felszíntípusokat érint, és adott esetben a csupasz talaj mérlegét is mérheti (pl. őszi búza aratása után a felszántott parcella beleesik a forrásterületbe), vagy éppen egy produktív kukoricatábla CO<sub>2</sub> forgalmát detektálta a mérőrendszer.

Ugyancsak származtattam az éjszakai NEE függését a hőmérséklettől (Haszpra et al., 2005). Az évek során a fluxus-particionáló eljárást többször is módosítottam. Jelenleg az adatok rendelkezésre állásától függően időben aggregált NEE-PPFD, illetve éjszakai NEE-hőmérséklet függvényeket származtattok, ami napi szinten áll rendelkezésre. Az illesztett függvények teszik lehetővé a nagy pontosságú GPP/Reco becslést órás szinten (Reichstein et al., 2005).

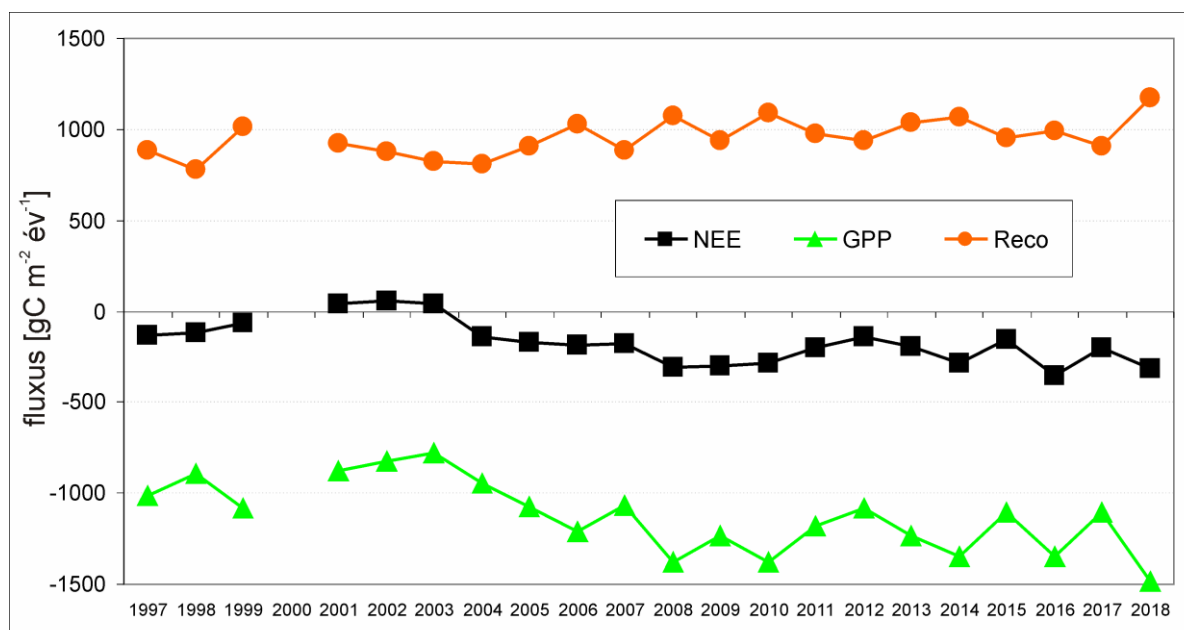
Az órás fluxusadatok integrálásával, és a hiányzó adatok pótlásával állítottam elő a napi szintű adatsort a 82 m magasságban üzemelő rendszer adatai alapján, a meteorológiai mérések felhasználásával. Napi léptékben a nyugvó időszakban az NEE tipikusan  $1 \text{ gC m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$  körül alakult. A vegetációs időszakban a napi NEE összeg  $-2 - -4 \text{ gC m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$ , de ennél alacsonyabb értékek is előfordultak. Az 1997-2018 időszakra vonatkozó átlagos NEE  $-0,467 \text{ gC m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$ , az átlagos GPP  $3,085 \text{ gC m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$ , míg az átlagos Reco  $2,618 \text{ gC m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$ . A 3.10. ábrán mutatom be az 1997-2018 időszakra vonatkozó eredményeket (Barcza et al., 2020).



3.10. ábra. A hiányzó adatok pótlásával számított napi NEE, GPP és Reco az 1997-2018. időszakban. Az NEE fekete, a Reco barackszínű, míg a GPP szürke színnel van ábrázolva. A könnyű érthetőség kedvéért a GPP -1-szeresét ábrázoltam. A negatív NEE szénfelvételt jelent a légkör szempontjából.

Az ábra alapján jól kirajzolódik az NEE éves dinamikája, amit logikusan követ a GPP és Reco alakulása. Az NEE esetén bizonyos években felismerhető az őszi vetésű gabona tavaszi felfutása, amit egy kevésbé negatív NEE után egy erősebb CO<sub>2</sub> nyeléssel jellemezhető időszak követ, ami valószínűleg a tavaszi vetésű gabonák intenzív növekedését jellemzi.

A 3.11. ábra mutatja be a származtatott szénáramok éves összegeit az 1997-2018 időszakra vonatkozóan. Figyelemre méltó a 2001-2003-as időszak, amelynek során a kialakult szárazság miatt az NEE éves összege pozitív volt, vagyis nettó CO<sub>2</sub> kibocsátó volt a rendszer a légkör szempontjából (a teljes szénmérleg kapcsán lásd a későbbi NBP becslést). A fennmaradó években nettó szénfelvevő volt a rendszer.

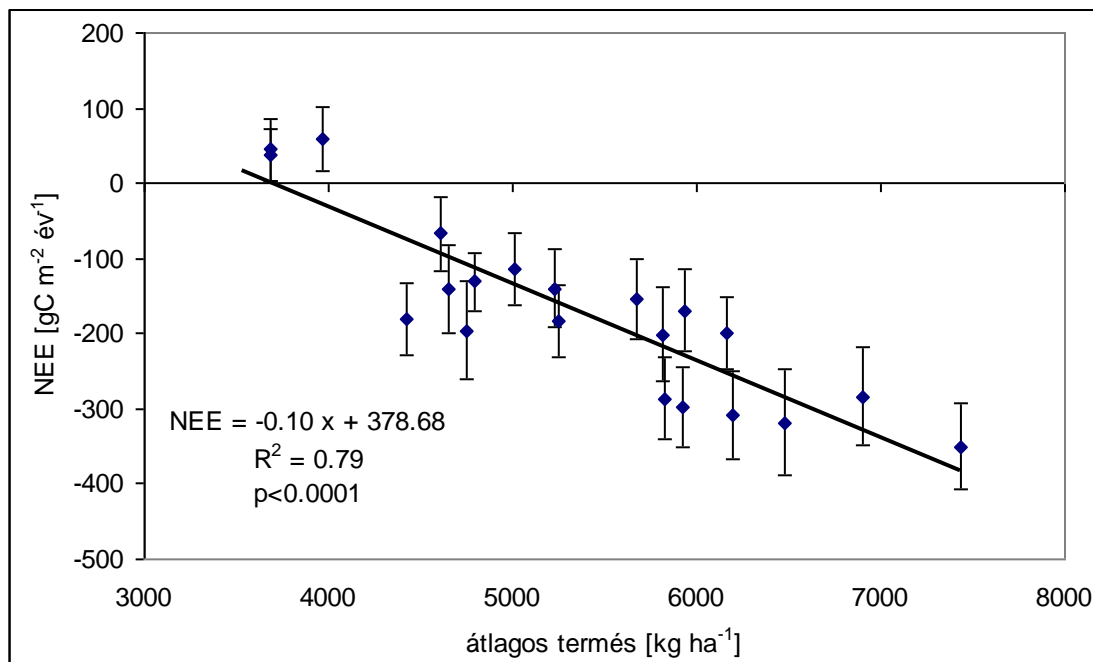


3.11. ábra. Az NEE, GPP és Reco éves összegei az 1997-2018 időszakban. A GPP éves összege a könnyű értelmezhetőség kedvéért negatív előjellel van ábrázolva.

Az NEE, GPP és Reco éves összegei tendenciózus változásokat mutatnak. A mérés első 10 évében (1997-2007; 2000-ben nem volt mérés) az NEE, GPP and Reco átlaga rendre  $-85 \text{ gC m}^{-2} \text{ év}^{-1}$ ,  $977 \text{ gC m}^{-2} \text{ év}^{-1}$  és  $893 \text{ gC m}^{-2} \text{ év}^{-1}$  volt. Az utolsó 10 vizsgált évben (2009-2018) az NEE  $-243 \text{ gC m}^{-2} \text{ év}^{-1}$ , a GPP  $1250 \text{ gC m}^{-2} \text{ év}^{-1}$ , míg a Reco  $1008 \text{ gC m}^{-2} \text{ év}^{-1}$  volt. Szignifikáns trend azonosítható az adatokban mind az NEE, mind a GPP, mind a Reco esetén. Az NEE negatívabb lett az évek során (ami erősebb felvételt jelent), és mind a GPP mind a Reco szignifikánsan nőtt. Az NEE a GPP és a Reco érzékeny eredője, és az adatok rámutattak, hogy mivel a GPP növekedés rátája kb. kétszerese a Reco növekedésének, ezért tudott az NEE abszolút értelemben növekedni. A megfigyelt változások mögött valószínűleg az éghajlatváltozás és az agrotechnika fejlődése állhat. Az éghajlatváltozás kapcsán nem csak

a hőmérséklet emelkedése illetve a csapadékviszonyok átalakulása áll, hanem az emelkedő légköri CO<sub>2</sub> szint stimuláló hatása is (CO<sub>2</sub> trágyázás). Az agrotechnika kapcsán az országos szinten növekvő műtrágyahasználat, illetve a hatékonyabb növényvédelem is közrejátszhat a megfigyelt változásokban (Barcza et al., 2020).

A magas torony alapú mérések térbeli általánosíthatósága kapcsán vizsgáltam az éves szénáramok kapcsolatát a megyei szintű termésátlag statisztikákkal. A legerősebb kapcsolatot a Vas megyére vonatkozó átlagolt termésátlag adatok és az NEE között találtam (búza és kukorica termésmennyiségének az átlagát származtattam a Központi Statisztikai Hivatal publikus adatai alapján<sup>3,4</sup>). A 3.12. ábra alapján látható, hogy a termésmennyiség időbeli változékonysága kb. 80%-át magyarázza az NEE megfigyelt változékonyságának. A magas magyarázott variancia arra enged következtetni, hogy a mérések térbeli reprezentativitása (ami azt jelenti, hogy a mérés mekkora területről ad általánosítható információt) igen nagy, és legalább Vas megye régiójára általánosítható (1651 km<sup>2</sup>). Országos szinten az átlagolt termésátlagok évek közötti változékonysága 40%-át magyarázza a megfigyelt NEE variabilitásnak, ami még mindig igen magas érték.



3.12. ábra. A Vas megyére vonatkozó átlagos őszi búza és kukorica termés, illetve a származtatott éves NEE összegek kapcsolata (a termésadatok forrása a Központi Statisztikai Hivatal). Az éves NEE összegek bizonytalanságát is feltüntettem az ábrán (részletek kapcsán lásd Barcza et al., 2020).

<sup>3</sup> [https://www.ksh.hu/stadat\\_files/mez/hu/mez0071.html](https://www.ksh.hu/stadat_files/mez/hu/mez0071.html)

<sup>4</sup> [https://www.ksh.hu/stadat\\_files/mez/hu/mez0072.html](https://www.ksh.hu/stadat_files/mez/hu/mez0072.html)

A hegyhátsági mérésekkel kapcsolatos kutatómunkám kezdeti éveiben a légkör szempontjából vizsgáltam a hegyhátsági vegyes mezőgazdasági terület szénmérlegét. A teljes kép felvázolásához (konkrétan az NECB és az NBP becsléséhez) további információra van szükség, mivel a mérés a függőleges irányú fluxusokat méri (lásd 2.1. ábra), de nem ad információt a laterális szénmozgásról. Tekintve, hogy egy túlnyomórészt mezőgazdasági terület szénmérlegét méri a HU-He1 rendszer, kísérletet tettem a szántóföldekről időről időre elszállított szénmennyiség becslésére (bevételi oldalt nem számítottam). Mivel a fentiek értelmében magas torony alapú mérés reprezentativitása igen nagy (3.12. ábra), ezért lehetőség nyílik a megyei szintű termésátlagok használatára a nettó biom produkció (NBP) vonatkozásában. A számításhoz az ún. Harvest Index módszert használtam, aminek révén a termésmennyiség alapján az NPP származtatható (a módszertan kapcsán részletesebb leírás található a Barcza et al., 2010; 2020 anyagokban). A mezőgazdasági melléktermék kezelésre (a levágott szár, illetve levél helyben hagyása aratás után, avagy elszállítása) vonatkozó feltételezés alapján, a fent közölt növényfajta-specifikus forrásterület arány figyelembe vételével számítottam az adott évre vonatkozó elszállított szén mennyiséget. Az eredményeket a 3.3. táblázatban mutatom be.

A vizsgált időszakban a négyzetméterenként átlagosan elszállított szén mennyisége  $201 \text{ gC m}^{-2}$  volt. A táblázat legfontosabb adata az NBP, ami tulajdonképpen a rendszer teljes szénmérlegét adja meg, figyelembe véve mind a függőleges, mint az oldalirányú szénáramokat. A 21 éves átlagos NBP  $-30 \text{ gC m}^{-2} \text{ év}^{-1}$  volt, ami azt jelzi, hogy a terület szénvesztő volt a vizsgált időszakban. Fontos megemlíteni, hogy a vizsgált időszak első 10 évében az NBP  $-91 \text{ gC m}^{-2} \text{ év}^{-1}$  volt, míg az utolsó 10 évben  $19 \text{ gC m}^{-2} \text{ év}^{-1}$ . Ez a növekedés a növekvő termésátlagokkal magyarázható, ami növekvő teljes növényi produkciót (NPP) is jelent természetesen. A 2001-2003 időszakban, amikor már maga az NEE is eleve pozitív volt (3.11. ábra), a 3 évre átlagolt NBP  $-191 \text{ gC m}^{-2} \text{ év}^{-1}$  volt, ami egy jelentős szénvesztés. Az eredmények jelzik, hogy az aszály jelentősen befolyásolhatja az ökológiai rendszerek szénmérlegét. Más szavakkal, a sok év alatt megvalósuló lassú szénmegkötést az extrém események rövid idő alatt lenullázhatják (Ciais et al., 2005). Ez a rendszerek sérülékenységét jelzi az éghajlat-szén ciklus visszacsatolás vonatkozásában.

3.3. táblázat. A hegyhátsági magas torony alapú mérések, illetve a Központi Statisztikai Hivatal adatai alapján származtatott búza és kukorica NPP adatok, laterális szénfluxus értékek, illetve a teljes szénmérleg eredmények az 1997-2018 időszakra.

	őszi búza termés [kg hektár <sup>-1</sup> ]	kukorica termés [kg hektár <sup>-1</sup> ]	őszi búza NPP [gC m <sup>-2</sup> év <sup>-1</sup> ]	kukorica NPP [gC m <sup>-2</sup> év <sup>-1</sup> ]	elszállí- tott szén a búzát termő parcellák- ról [gC m <sup>-2</sup> év <sup>-1</sup> ]	elszállí- tott szén a kukoricát termő parcellák- ról [gC m <sup>-2</sup> év <sup>-1</sup> ]	footprint- tel súlyozott elszállí- tott szén (búza) [gC m <sup>-2</sup> év <sup>-1</sup> ]	footprint- tel súlyozott elszállí- tott szén (kukori- ca) [gC m <sup>-2</sup> év <sup>-1</sup> ]	teljes elszállí- tott szén [gC m <sup>-2</sup> év <sup>-1</sup> ]	NBP [gC m <sup>-2</sup> év <sup>-1</sup> ]
<b>1997</b>	3710	5870	309	749	225	244	-	-	183	<b>-52</b>
<b>1998</b>	3820	6200	321	812	233	258	-	-	191	<b>-76</b>
<b>1999</b>	3550	5660	293	711	214	236	-	-	177	<b>-110</b>
<b>2000</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>2001</b>	3930	3430	333	370	241	143	102	46	148	<b>-187</b>
<b>2002</b>	3490	4450	287	513	210	185	65	79	144	<b>-202</b>
<b>2003</b>	2840	4540	224	526	167	189	38	103	141	<b>-185</b>
<b>2004</b>	4390	6070	384	787	274	253	90	98	187	<b>-48</b>
<b>2005</b>	4070	7790	348	1173	250	324	88	133	221	<b>-51</b>
<b>2006</b>	4170	6330	359	838	258	264	141	54	194	<b>-10</b>
<b>2007</b>	4220	4630	364	540	261	193	113	56	168	<b>13</b>
<b>2008</b>	4800	7590	432	1121	304	316	101	121	221	<b>88</b>
<b>2009</b>	4500	7340	396	1060	282	306	125	88	213	<b>85</b>
<b>2010</b>	4600	7060	408	994	289	294	82	139	221	<b>65</b>
<b>2011</b>	4490	7150	395	1015	281	298	54	166	219	<b>-19</b>
<b>2012</b>	3990	5310	339	650	245	221	79	93	171	<b>-30</b>
<b>2013</b>	4590	4910	407	584	289	205	127	68	195	<b>0</b>
<b>2014</b>	5120	8690	471	1433	329	362	174	67	241	<b>42</b>
<b>2015</b>	5240	6110	486	795	339	254	179	59	238	<b>-85</b>
<b>2016</b>	6060	8800	596	1469	406	367	213	86	299	<b>52</b>
<b>2017</b>	5330	7000	498	980	346	292	202	44	246	<b>-47</b>
<b>2018</b>	5080	7870	466	1194	326	328	139	54	193	<b>125</b>

A Barcza et al. (2020) tanulmányban további elemzések is találhatóak. Konkrét egyenleteket származtattam a napi fluxusadatok bizonytalanságának számszerűsítésére az ún. hasonló napok módszere alapján. Statisztikai módszert dolgoztam ki az éves NEE adatok vizsgálatára. Itt felhasználtam a már említett kritikus időszak elemzés módszertanát, amit Kern Anikóval fejlesztettünk ki, és új tudományos eredményként tartunk számon. A módszer segítségével egyszerű statisztikai modelleket konstruáltam, amelyek esetén a meghajtó meteorológia illetve környezeti adatsort havi szinten származtattam, és parciális korreláció elemzést végeztem az éves NEP összegekkel. A szignifikáns kapcsolatok kiválasztásával határoztam meg a lineáris modell prediktorait. Ezután végeztem el a model illesztését figyelembe véve a származtatott éves NEP összegek bizonytalanságát. A 3.4. táblázatban a konstruált modellek egyenletét mutatom be.

3.4. táblázat. A konstruált többváltozós lineáris modellek egyenletei az éves NEP összegek becslésére a kritikus időszak elemzés alapján. Szisztematikus hibát (bias) és a lineáris korrelációs együttható négyzetét ( $R^2$ ) származtattam a modell jóságának bemutatására.

modell száma (#), időszak	A modellezett NEP ( $NEP_s$ ) egyenlete	bias [gC m <sup>-2</sup> év <sup>-1</sup> ]	R <sup>2</sup>
#1. 1997-2018	$NEP_s = 165.2 + 45.46 \times \max T4 + 31.07 \times \max T12 - 0.12 \times \text{prec}5 - 0.528 \times \text{VPD}4 + 1.284 \times \text{rad}4 + 829.8 \times \text{ERASWC}2\_2$	-5.28	0.64
#2. 2001-2018	$NEP_s = 169.3 + 47.6 \times \max T4 + 25.4 \times \max T12 - 0.46 \times \text{prec}5 - 0.71 \times \text{VPD}4 + 1.34 \times \text{rad}4 + 2761.1 \times \text{ERASWC}2\_2 + 2796.7 \times \text{NDVI}_{789}$	-2.85	0.86
#3. 2002-2018	$NEP_s = 196.8 + 26.9 \times \max T4 + 2.82 \times \max T12 + 0.35 \times \text{prec}5 - 0.544 \times \text{VPD}4 + 1.71 \times \text{rad}4 + 1466.8 \times \text{SWC}_{2,9}$	0.58	0.89

maxT4 az átlagos áprilisi maximumhőmérséklet anomáliája (°C), maxT12 az átlagos decemberi maximumhőmérséklet anomáliája (°C), prec5 a májusi havi csapadékösszeg anomáliája (mm), VPD4 az áprilisi átlagos telítési hiány anomáliája (Pa), rad4 az áprilisi átlagos nappali globálsugárzás anomáliája ( $W m^{-2}$ ), ERASWC2\_2 az ERA5 reanalízis adatbázis alapján származtatott 7-28 cm-es talajrétegre vonatkozó talajnedvesség februári anomáliája ( $m^3 m^{-3}$ ), NDVI<sub>789</sub> a július-augusztus-szeptember időszak átlagos műholdas vegetációs index adatsorának az anomáliája (mértékegység nélküli szám), SWC2-9 a hegyhátsági gyepes mérőhelyen mért átlagos talajnedvesség anomáliája a február-szeptember időszakra vonatkozóan ( $m^3 m^{-3}$ ). A származtatott koefficiensek esetén a mértékegység gC m<sup>-2</sup> év<sup>-1</sup> osztva az adott prediktor mértékegységével

Az egyenletek alapján egyrészt látható, hogy az áprilisi meteorológiai állapotjelzők alapvetően befolyásolják az éves NEP összeget, de emellett megjelenik a májusi csapadék is, illetve a decemberi maximumhőmérséklet. A talajnedvesség esetén az ERA5 alapú adatok valószínűleg kevésbé reprezentatívak, mint a helyben mért értékek, emiatt a 3. egyenlet alkalmazása tűnik reálisnak. A talajnedvesség szerepét egyértelműen jelzi, hogy a február-szeptember időszakban végig meghatározó szerepet kap az átlagtól való eltérés (3. egyenlet).

A lineáris modell együtthatói is értékes információt hordoznak. Például az 1. illetve 3. modell alapján látható, hogy 1 °C pozitív hőmérsékleti anomália áprilisban 27-45 gC m<sup>-2</sup> év<sup>-1</sup>-vel növeli meg az éves NEP összeget. Ezt elsősorban a mezőgazdasági haszonnövények tavaszi intenzív fejlődésével lehet magyarázni, ami kihat a növények későbbi állapotára, fejlettségi szintjére illetve asszimiláló képességére is. Ehhez hasonlóan értelmezhető a többi együttható is. Érdekes megemlíteni, hogy az áprilisi VPD anomália is meghatározó a szénmérleg szempontjából. 100 Pa pozitív VPD anomália (ne feledjük, hogy a VPD a légköri szárazság mérőszáma) 53-54 gC m<sup>-2</sup> év<sup>-1</sup> csökkenést okoz az éves NEP összegben. Mivel a légköri szárazság befolyásolja a sztómák nyitottságát, ami kihat az asszimilációra, a kapott eredmény könnyen értelmezhető. Mindenesetre a VPD meghatározó szerepe nincs a köztudatban, de a fenti eredmények alapján értelmet nyer a hatása.

A modellek segítségével vizsgáltam a 2001-2003-as, pozitív NEE-vel jellemzett extrém időszakot a meteorológiai változók alapján (lásd 3.11. ábra). A vizsgálatok rámutattak arra, hogy az áprilisi meteorológiai paraméterek (maximum hőmérséklet, VPD, sugárzás) anomáliája, illetve a talajnedvesség anomáliája együttesen okozta az NEE előjelváltását (pozitív NEE, negatív NEP). 2002 és 2003 némiképp eltért egymástól abban az értelemben,

hogy míg a hűvösebb április és a kevesebb április besugárzás negatívan befolyásolta az éves NEP összeget mindkét évben, addig 2002-ben a VPD negatív anomáliája enyhítette az NEP csökkenést, de 2003-ban már nem. A talajnedvesség negatív anomáliája mindkét évben nagy mértékben csökkentette az éves NEP összeget (2002-ben  $140 \text{ gC m}^{-2} \text{ év}^{-1}$ , míg 2003-ban  $126 \text{ gC m}^{-2} \text{ év}^{-1}$  negatív NEP anomália).

Az általánosan elfogadott álláspont szerint a 2003-as, európai léptékben is súlyos gondokat okozó szénmérleg anomália okozója a hőséggel társult szárazság volt (Ciais et al., 2005). A fent bemutatott eredmények árnyalják a kialakult képet. A fő következtetésem, hogy (legalábbis a szántóföldi növénytermesztés vonatkozásában) nem kizárólag a hóhullámmal együtt járó nyári szárazság okozta a pozitív NEE-t. Az elemzés rámutat, hogy a meteorológiai változók komplex, és nem triviális módon hatnak az ökológiai rendszerek szénmérlegére, de alapos módszertani fejlesztésekkel ezek a hatások kimutathatók.

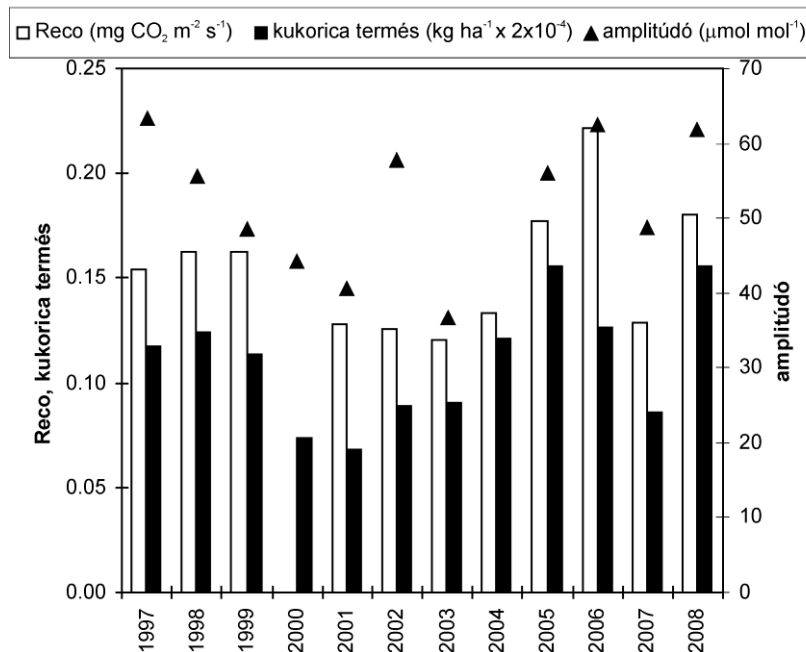
A magas torony alapú EK adatokat több szakcikk készítése során is felhasználtuk. Itt azokat a tanulmányokat említem meg, amelyek készítése során meghatározó szerepem volt.

Volt doktoranduszom, Gelybó Györgyi munkája során műholdas, adat-orientált modellt adaptált (a fent említett MO17 GPP modellt) a hegyhátsági régióra illetve Magyarországra, és végeztük el a modell validációját Hegyhátsál térségére a forrásterület vizsgálat és az EK adatok kombinálásával (Gelybó et al., 2013). Elvégeztük az 500 m felbontású GPP adatok leskálázását 250 m-re (ami a legjobb MODIS felbontás), és különböző szintű összehasonlításokat végeztünk a mérési adatokkal. Az eredmények rámutattak, hogy a modell alulbecsülte a megfigyelt GPP-t, különösen az átlagos csapadékmennyiséggel jellemezhető években. Az általunk készített modellváltozatok számszerű vizsgálata rámutatott, hogy a számított hibastatisztikák közül a lineáris korrelációs együttható négyzete (vagyis a magyarázott variancia) nem hasznos a modell jószág értékelésében, szemben a vizsgált egyéb hibastatisztikákkal (szisztematikus hiba, modelling efficiency, index of agreement, átlagos négyzetes hiba négyzetgyöke). Ugyancsak rámutattunk a MOD17 modell továbbfejlesztésének lehetőségére is, ami kapcsán a talajnedvesség figyelembevételét javasoltuk.

Haszpra László kollégámmal számos közös tanulmányunk épült a hegyhátsági mérésekre (nem csak az EK mérésekre, hanem a profilmérésekre, repülőgépes mérésekre, illetve gázkromatográfia alapú mérésekre is; Vermeulen et al., 2007). Ezek közül itt hármat említek meg, amelyek megszületésében meghatározó szerepem volt, és részben az EK mérések általam származtatott eredményeire épültek. A tanulmányok jól demonstrálják a

kutatómunka szerteágazó jellegét, és rámutatnak az ugyanazon a helyen végzett nagy pontosságú koncentrációmérések és fluxusmérések kombinálásának lehetőségeire, és az ilyen jellegű mérőrendszerek alapvető előnyeire.

A Haszpra és Barcza (2010) tanulmányban a Hegyhátsáli profilrendszer 15 éves adatsorát elemezte Haszpra László kollégám. Az eredmény megerősítette a korábban már feltárt hasonlóságot a globális CO<sub>2</sub> háttérkoncentráció és a helyi mérések közt. A szakcikk újdonságtartalma az, hogy a rövidebb távú koncentráció (pontosabban keverési arány) változásokat a helyi klimatikus hatások okozzák, aminek a hatása az EK adatokban is kimutatható. A 3.13. ábra szemlélteti az átlagos napi CO<sub>2</sub> amplitúdó (a maximum és minimum különbsége adott napon) és az EK alapú Reco összefüggését a vizsgált időszakra vonatkozóan.



3.13. ábra. Összefüggés az átlagos éjszakai Reco és az átlagos napi CO<sub>2</sub> amplitúdó közt (utóbbi a maximum és minimum különbsége adott napon) a július-augusztusi időszakban Hegyhátsálon. A Vas megyére vonatkozó kukorica termésátlag is fel van tüntetve az ábrán skálázással.

A kukorica termésmennyisége egyfajta proxy-ként értelmezhető, ami a Reco-val összefügg. Az ábra jól demonstrálja a napi CO<sub>2</sub> koncentráció alakulását befolyásoló helyi hatásokat ( $R=0,67$ ,  $p<0,05$ ), és jelzi. A Haszpra és Barcza (2010) tanulmányban van még egy fontos megállapítás, ami véleményem szerint nem kapott kellő visszhangot, pedig releváns kérdést feszeget. Korábban már ismert volt, hogy van egy jól felismert fáziseltérés a felszíni CO<sub>2</sub>

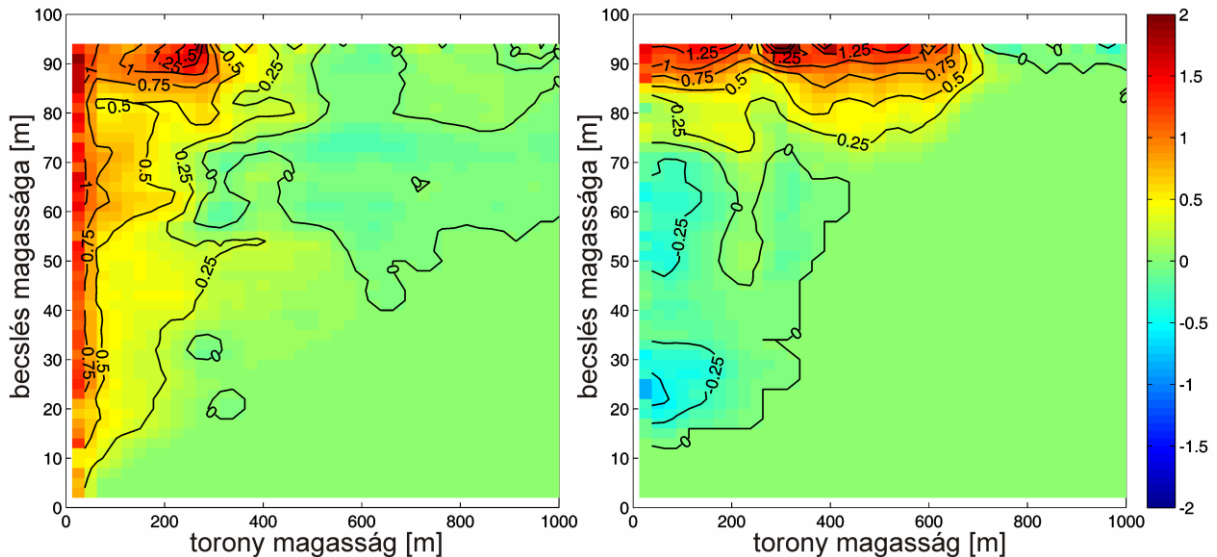


áramok, és a nagytérségű (hemiszférikus) CO<sub>2</sub> hárrétkoncentráció alakulása között (Davis et al., 2003; Bakwin et al., 2004; utóbbi szakcikk használta és bemutatta az általam származtatott hegyhátsági EK eredményeket is). A korábbi vizsgálatok arra a következtetésre jutottak, hogy horizontális vagy vertikális advekciónak lehet felelős a tapasztalt fáziseltérésért, de a vizsgálat nem zárult megnyugtató válasszal. A Haszpra és Barcza (2010) tanulmány megmutatta, hogy a téli napforduló után a besugárzás növekedésével a konvektív határ réteg magassága gyorsan növekszik januártól kezdődően, és ezzel lehetővé válik a szabad troposzférikus, CO<sub>2</sub>-ban szegényebb levegő bekeveredése a határ rétegbe, ami a felszínközeli CO<sub>2</sub> koncentrációban is jelentkezik. Ennek következtében a felszínközeli CO<sub>2</sub> koncentráció már azelőtt elkezd csökkenni, mielőtt a vegetáció nagy térbeli skálán szén-dioxid nyelő lenne.

A Haszpra et al. (2015) tanulmányban Európai Unió 6. keretprogramja által finanszírozott CARBOEUROPE-IP projekt keretén belül végrehajtott repülőgépes CO<sub>2</sub> profil mérések eredményeit dolgoztuk fel. Az alapkonceptió a fent említett légköri inverz modellek gyakorlati alkalmazásához kapcsolódik. Az inverz modellek használatához nagy pontosságú légköri CO<sub>2</sub> koncentráció adatok szükségesek, lehetőleg olyan magasságból, hogy a felszíni hatások hatása a lehetőségekhez képest minimális legyen. Ez a fajta mérés sajnos csak nagy nehézségek árán valósítható meg, és általában igen költséges (ballon alapú mérések, repülőgépes mérések, stb.). Még a hegyvidéki állomások méréseit is befolyásolja a felszín és a határ réteg napi alakulása, így módszertani szempontból lényegében minden földfelszíni mérés problematikus.

Egy lehetséges megoldása a problémának az ún. virtuális magas torony (virtual tall tower, VTT) koncepció, ami Ken Davis nevéhez fűződik (Davis, 2005). A VTT lényege, hogy konvektív határ rétegre vonatkozó hasonlósági elmélet alapján becsüli a légköri nyomgázok koncentrációjának az eloszlását. A VTT módszer alkalmazásához szükség van a felszíni áramokra, amit az EK mérések biztosítanak. A Haszpra et al. (2015) tanulmány egyik fő eredménye, hogy a VTT módszer alkalmazása javít a becslés pontosságán, főképp a nyári hónapokban (3.14. ábra).

A mérésekkel kapcsolatos munkám bemutatásának lezárásaként megemlíteném a Haszpra et al. (2018) szakcikk, aminek a létrejöttében meghatározó szerepem volt. Hegyhátsálon 2015. július 1 óta működik egy Los Gatos Model 913-0014 gyors válaszidejű N<sub>2</sub>O/CO/H<sub>2</sub>O gázanalizátor 82 m magasságban. A beszívócső úgy lett kialakítva, hogy a módosított EK rendszer alkalmas a dinitrogén-oxid turbulens áramának a származtatására, a létező rendszert kiegészítve (a szónikus anemométer közös a két EK rendszerben).

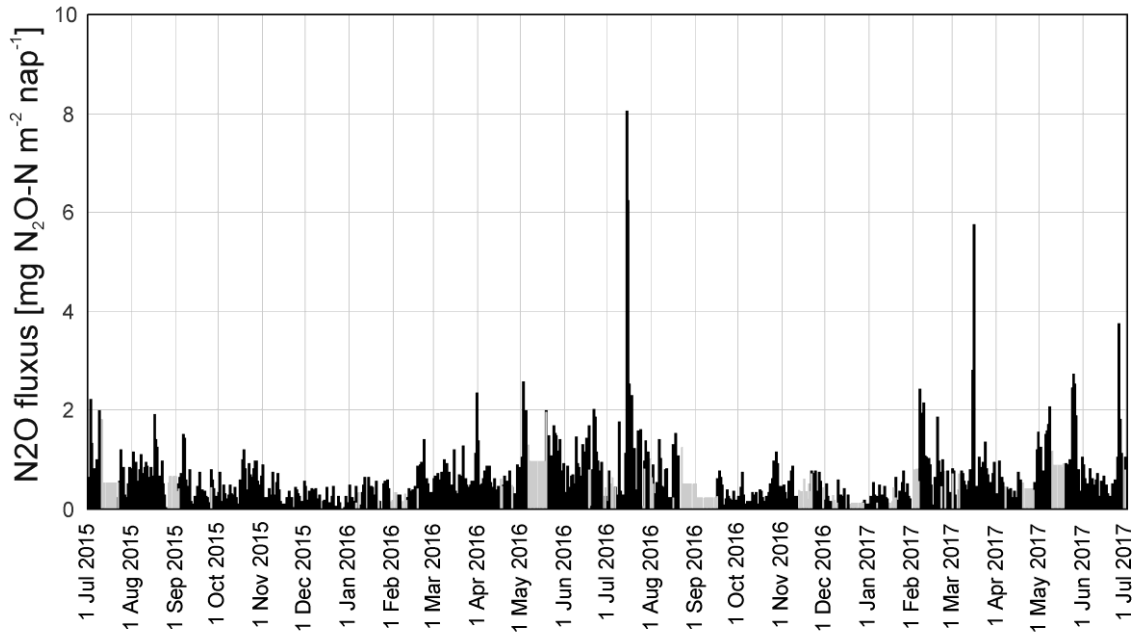


3.14. ábra. A VTT módszer alkalmazása és alkalmazása nélkül kapott légköri CO<sub>2</sub> koncentráció értékek különbsége (ppm) a rendelkezésre álló hipotetikus toronymagasság és a becslés magasság függvényében. A hipotetikus torony magasságához kapcsolódó koncentrációt a toronymérések illetve a repülőgépes mérések biztosították. A pozitív érték azt jelzi, hogy a VTT módszer alkalmazása javított a becslésen. Bal oldali ábra: nyári adatok. Jobb oldali ábra: téli adatok.

A turbulens áramok származtatását én végeztem, beleértve a minőségbiztosítást, a bizonytalanság származtatását, és a soklépéses adatfeldolgozást (lásd módszerek). A további minőségbiztosítást részben Haszpra László, részben Hidy Dóra végezte el. A napi szinten integrált eredményeket a 3.14. ábra mutatja be a 2015. július – 2017 júniusi időszakra (a mérés azóta is zajlik, de az eredményeket még nem publikáltuk). A két éves időszak alatt a teljes N<sub>2</sub>O emisszió  $441 \pm 195$  mg N<sub>2</sub>O-N m<sup>-2</sup> volt. A mérések jelenleg is zajlanak, és megfelelően hosszú mérési adatsor birtokában további publikáció megírását tervezzük.

A 3.15. ábra alapján jól felismerhető, hogy az N<sub>2</sub>O emisszióknak határozott éves menete van, és kiugró értékekkel jellemezhető a folyamat. A kiugró értékek valószínűleg kapcsolatban vannak a műtrágya vagy szerves trágya alkalmazásával, illetve a nagyobb csapadékeseményekkel. Az eredmények magyarázata további kutatómunkát igényel.

A hegyhátsági, immár dupla EK mérés a dolgozat írásának pillanatában is üzemel, és nyújt értékes információt a hegyhátsági régió üvegházhatású gáz mérlegéről.



3.15. ábra. N<sub>2</sub>O fluxusadatok nitrogén egyenértékben kifejezve Hegyhátsálon a 82 m magasan működő EK rendszer alapján. A fekete oszlopok a mért napi összegeket reprezentálják, míg a szürke oszlopok a kipótolt napi összegek.

### 3.3. Összegzés és önálló tudományos eredmények

#### 3.3.1. Munkamegosztás

Mivel a tudományos kutatómunka alapvetően kollaboratív jellegű, sok esetben egy szakcikk megszületésekor nem derül ki egyértelműen az egyes szerzők hozzájárulása, illetve konkrétan az elvégzett munka. Az utóbbi években szerencsére megjelent egy nemzetközi tendencia, ami azt jelenti, hogy egy szakcikk megjelenésekor a szerzők explicit leírják, hogy ki mivel járult hozzá a szakcikk megjelenéséhez (Author Contributions). Sok korábbi szakcikk esetén ennek felderítésére nincs mód, ezért a saját tudományos eredményeim összegzése és tézisszerű felsorolása előtt fontosnak tartom konkrétan leírni a saját hozzájárulást, illetve mások szerepét az itt bemutatott eredményekben.

A hegyhátsági eddy kovariancia mérések műszerezettségének fenntartását alapvetően Haszpra László végzi, aki az üvegházhatású gázokkal foglalkozó monitoring jellegű mérések hazai úttörője. Az évek során én is bekapcsolódtam a mérőállomás fenntartásába. Közreműködtem a műszerek karbantartásában, az informatikai rendszer üzemeltetésében, az adatgyűjtő szoftverek megírásában, az új beszerzések intézésében, a gázkromatográfia alapú

mérés kialakításába és az Internet alapú távelérés biztosításában. Az Európai Unió projekt keretében részt vettem az adatok közel valós idejű feldolgozásában és közlésében a projektek felé. A HU-He2 rendszer esetén az adatgyűjtő szoftver megtervezésében is részt vettem. Ily módon Haszpra Lászlóval a munkánk az évek során összekapcsolódott, és a hegyhátsági mérőtorony az Országos Meteorológiai Szolgálat és az Eötvös Loránd Tudományegyetem együttműködésében üzemelt (később az ATOMKI is csatlakozott az állomás fenntartásához).

Haszpra László főként az üvegházhatású gázok légköri koncentrációját származtatja és vizsgálja, míg jómagam a felszín-légkör kicserélődést számszerűsítem, és az eredményeket értelmezem. Ez azt jelenti, hogy az eddy kovariancia márórendszerhez kapcsolódó adatgyűjtő szoftver által regisztrált nagy mennyiségű nyers adat feldolgozása és értelmezése teljes egészében az én munkám. Kivétel ez alól a dinitrogén-oxid fluxusmérés, ahol az eddy kovariancia alapú származtatott fluxusok minőségellenőrzését Hidy Dóra és Haszpra László végezte el.

Bár a Hegyhátsál vonatkozású kutatási irányok nagyon jól különválaszthatók, az évek során időnként átfedés is volt a munkák közt Haszpra Lászlóval (koncentrációmérés versus fluxusmérés). A PhD megszerzése óta eltelt években Haszpra Lászlóval együttműködve részt vettem több olyan projektben (AEROCARB, CHIOTTO, CARBOEUROPE-IP, GHG-Europe, GEOMON, IMECC), ami a hegyhátsági mérőállomáshoz kapcsolódik, de elsősorban az üvegházhatású gázok légköri koncentrációját vizsgálta. Ezen projekteken belül meghatározó szerepem volt a repülőgépes mérési adatok értelmezésében, illetve az egyéb üvegházhatású gázok ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , kén-hexafluorid) gáz-kromatográfia alapú mérésében, illetve a mérési adatok feldolgozásában és minőségbiztosításában is. Részletek a megjelent publikációkban találhatóak (Haszpra et al., 2008; 2015; 2019; Haszpra, 2010). Érdekességképp említem meg, hogy jelenleg Haszpra Lászlóval egy olyan szakcikkben dolgozunk, ami az általam is használt footprint modellen alapul, tehát az eddy kovariancia mérésekhez kapcsolódik, de az antropogén emissziót vizsgálja. Ez is egy jó példa a kutatómunkával kapcsolatos átfedésekre.

Magyarországon a hegyhátsági, magas torony alapú volt az első monitoring jelleggel működő eddy kovariancia rendszer. Hegyhátsálon kívül monitoring jellegű eddy kovariancia mérés a Szent István Egyetem (SZIE) kezdeményezésére indult el más hazai helyszíneken. Bugacpusztán 2002-ben, majd a Mátrában lévő Szurdokpüspökin 2003-ban kezdődtek meg a mérések gyep felett, alacsony mérőtoronyok segítségével (Nagy et al., 2007; 2010). A kutatás kezdeti időszakában az adatfeldolgozás vonatkozásában én is bekapcsolódtam a Szent István Egyetemen zajló kutatásokba, részben mint Pintér Krisztina témavezetője, aki az általam

készített, IDL programozási nyelven megírt adatfeldolgozó szoftvert adaptálta a SZIE-n. A munkakapcsolat a SZIE-vel azóta is fennáll (a SZIE azóta már Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem – MATE – néven működik). A MATE Kartalon is üzemeltet egy eddy kovariancia állomást szántóföldi környezetben. Egy 2017-ben indult projekt kapcsán 2 újabb eddy kovariancia mérőhelyet hoztunk létre Martonvásár környezetében (Kajászón és Pettenden), amelyek az Agrártudományi Kutatóközpont, a MATE Agroökológiai Kutatócsoport és az ELTE közös fenntartásában üzemelnek, ugyancsak szántóföldi környezetben. Ez utóbbi állomások eredményei alapján még nem született publikáció, de a jövőben tervezzük az eredmények közzétételét.

A magas torony alapú mérések statisztikai elemzése kapcsán a bemutatott, kritikus időszak alapú vizsgálathoz kapcsolódó módszertani fejlesztéseket Kern Anikóval együtt végeztük. Ezt a módszert először a hazai országos, illetve megyei szintű termésátlagok kapcsán alkalmaztuk sikeresen (Kern et al., 2018). Megemlítendő az adatok kolinearitásával kapcsolatos módszertani megjegyzésünk is, amit a Kern et al. (2018) tanulmányban foglalmaztunk meg.

### 3.3.2. Tudományos eredmények és a vonatkozó publikációk

A fent bemutatott eredményeket az alábbi tézispontokban foglalom össze.

1. Egyedülálló, 23 éves adatsort származtattam a hegyhátsági magas torony alapú eddy kovariancia mérés alapján a talaj/növény rendszer szénmérlegének komponenseire a főképp szántóföldekre reprezentatív mérés alapján (ebből az első 21 év adatsora van bemutatva és publikálva). Az idősor világviszonylatban is egyedi, kevés hasonló magas torony alapú adatsor létezik. A 3 m magasságban üzemelő második eddy kovariancia mérés alapján 14 év adatsorát származtattam kaszált gyepre vonatkozóan (néhány év csonka, de modellezési célból kiválóan alkalmazható). N<sub>2</sub>O fluxus kapcsán jelenleg 5 és fél év adata áll rendelkezésre (2 év adata lett ebből publikálva). Ily módon összesen 42,5 állomás-év adatsorát származtattam a nyers eddy kovariancia adatokból munkásságom során. Az adatsor egy része publikusan elérhető a European Fluxes Database Cluster adatbázisában.

2. Megmutattam, hogy a magas torony alapú eddy kovariancia mérés térbeli reprezentativitása legalább megyei szintű (~1600 km<sup>2</sup>), így alkalmas általánosításra. A nagy reprezentativitás révén nyílt lehetőség a megyei szintű termésátlagok használatára a nettó biom produkció

(NBP) vonatkozásában, amihez szükség volt a horizontálisan elszállított szén mennyiségének a származtatására. A vizsgált időszakban az átlagosan elszállított szén mennyisége a hegyhátsági régióban  $201 \text{ gC/m}^2$  volt. A természetlag adatok és a hegyhátsági NEE mérések kombinálása új módszertani eredmény.

3. Becslést adtam a hegyhátsági régió szénmérlegének főbb komponenseire, köztük az NEE-re és az NBP-re is. A sok éves átlagos NEE  $-170 \text{ gC/m}^2/\text{év}$ , míg az NBP kb.  $-20 \text{ gC/m}^2/\text{év}$  volt a vizsgált 1997-2018 időszakban. Az adatsorban tendencia azonosítható, és úgy tűnik, a produktívabb években a NBP egyre inkább pozitívabb (szénmegkötés a talajban). Az eredmények azt sugallják, hogy a mezőgazdasági művelés nem feltétlenül jár a talaj szénkészletének lassú kimerülésével a változó éghajlat ellenére.

4. Módszertani fejlesztést végeztem az eddy kovariancia alapú mérések éves szénmérleg komponenseinek az elemzésére vonatkozóan. Kritikus időszak elemzés módszertan alapján konkrét időszakok konkrét környezeti változói alapján magyaráztam az eredmények évek közötti változékonyságát. A módszer segítségével bizonyos időszakok hozzájárulása becsülhető az összesített szénáramhoz (NEP). Egyszerű egyenletek formájában közöltem a vonatkozó statisztikai modellt. A módszertan alapján könnyen értelmezhető a 2001-2003-as időszak anomáliája, amikor az NEE a mérések szerint pozitív volt (nettó szén kibocsátó a horizontális szénáramok figyelembe vétele nélkül). Az eredmények alapján az áprilisi meteorológiai paraméterek (maximum hőmérséklet, VPD, sugárzás) anomáliája, illetve a talajnedvesség anomáliája együttesen okozta az NEE előjelváltását. Az eredmények szerint nem csak a hóhullámmal társult szárazság, hanem egyéb meteorológiai paraméterek is meghatározó szerepet játszottak a jelenség kialakulásában.

A mérések eredményeit több szakcikkben illetve könyvfejezetben is közzeltük, amelyek elkészítésében meghatározó szerepem volt (Barcza et al., 2003; Haszpra et al., 2005; Haszpra and Barcza, 2005; Barcza et al., 2009a; Haszpra and Barcza, 2010; Farkas et al., 2010; Nagy et al., 2010; Tóth et al., 2010; Haszpra et al., 2018; Barcza et al., 2020).

Az eddy kovariancia mérések eredményei alapján több olyan cikk is született, ahol felhasználták a hegyhátsági mérési eredményeket szintézis tanulmány részeként, vagy egy modell kalibrálására/validálására (Bakwin et al., 2004; Gilmanov et al., 2007, 2010; Hidy et al., 2007; Hidy et al., 2009; Yi et al., 2010; Hidy et al., 2012; Gelybó et al., 2013).

## 4. A szénmérleg modellezése Magyarországon és Európában

Sokéves mérési adatsor birtokában óhatatlanul megfogalmazódik az a kérdés, hogy mennyire reprezentatívak az adatok, vagyis hogy mennyire vonhatók le belőlük általános következtetések regionális vagy országos léptékben a talaj-növény rendszer CO<sub>2</sub> mérlegére vonatkozóan? Ugyancsak felmerül, hogy a változó környezeti feltételek mellett vajon módosulnak-e a jövőben a szénmérleg komponensei, illetve van-e lehetőség a teljes szénmérleg becslésére (ez utóbbi a vízszintes anyagáramot is figyelembe vevő mérleget jelenti)? Az ilyen típusú kérdések megválaszolására nyilvánvalóan a megfigyelések helyett más eszközök lehetnek a segítségünkre.

A növényzet szén-dioxid mérlegével kapcsolatos modellező munkába 2003-ban kezdtem bele. Hidy Dóra akkori meteorológus hallgató bevonásával történtek az első lépések, a Biome-BGC 4.1.1 biogeokémiai modell adaptálása révén (Running et al., 1993; Thornton, 1998). Az eredetileg az USA-ban kifejlesztett népszerű modell a vizsgált ökológiai rendszer teljes szén-, víz- és nitrogénforgalmát szimulálja, és ez alapján becsli a talaj-növény rendszer különböző alrendszereiben lévő szén és nitrogén mennyiségét, a tározók közti anyagáramokat, illetve a légkör és az ökológiai rendszer közötti anyagáramokat is.

A munkából három TDK dolgozat, illetve egy diplomamunka is született (Hidy, 2006), valamint társ-témavezetőként Hidy Dóra doktori kutatómunkáját is irányítottam, aminek része volt a modell alkalmazása és fejlesztése gyepekre vonatkozóan. A PhD fokozat megszerzése után is megmaradt a munkakapcsolat Hidy Dórával, így lehetővé vált a modell sok éven át tartó, és jelenleg is zajló fejlesztése és disszeminációja.

### 4.1. Módszertan

Kutatómunkám során elsősorban a Biome-BGC-t, illetve az általunk továbbfejlesztett változatát, a Biome-BGCMuSo-t használtam a talaj-növény rendszer folyamatainak számszerűsítésére. A korábban már említett Biome-BGC egy tipikus folyamat-orientált modell, amelyik a talaj-növény rendszer biogeokémiai folyamatait becsli, a jelenlegi tudásunknak megfelelően (Running and Hunt, 1993; Thornton, 1998; White et al., 2000; Churkina et al., 2003; 2009; 2010; Thornton et al., 2002; Thornton and Rosenbloom, 2005). Az általunk használt modellt Biome-BGC 4.1.1. MPI verzióként szoktuk megemlíteni, mivel Galina Churkina kolléganő módosította a modell forráskódját némiképp a hivatalos 4.1.1-hez

képest (Churkina et al., 2003; 2009; 2010). A modellt aktívan használták a CARBOEURPE-IP integrált projekt keretén belül (Schulze et al., 2009), emiatt a modell európai használata megalapozott volt a kezdetektől fogva.

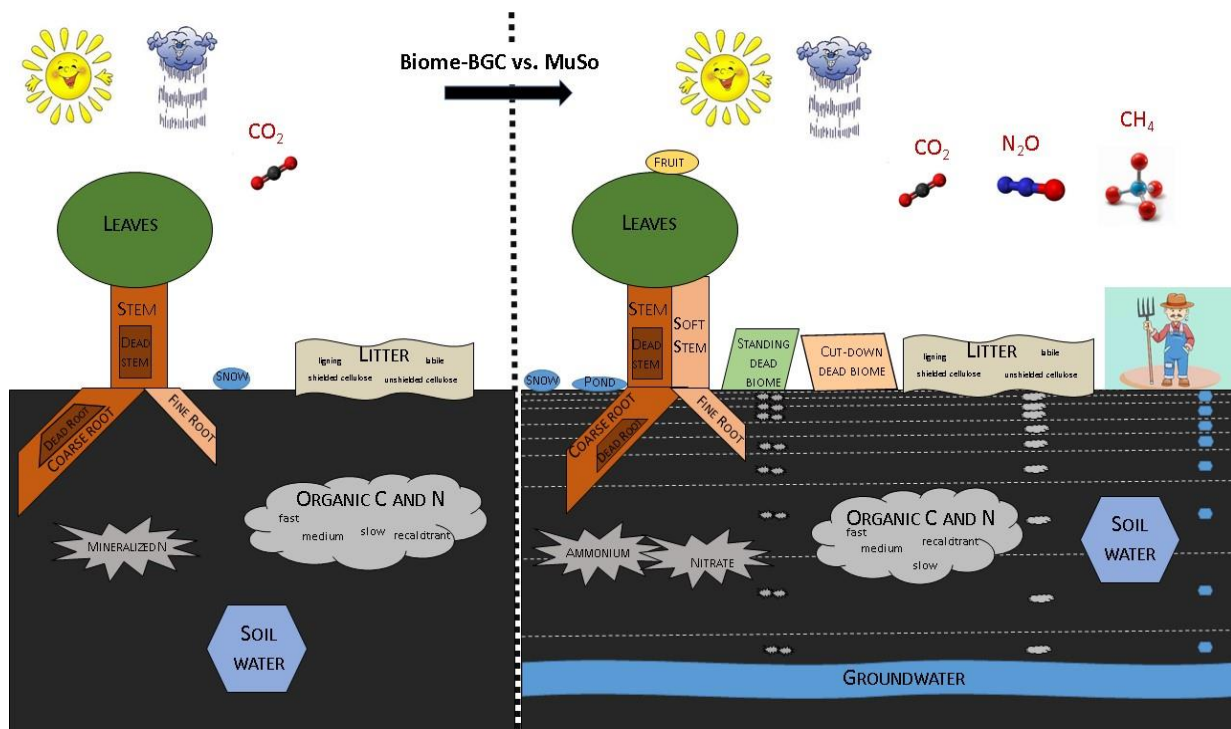
Az eredeti Biome-BGC modell az amerikai fejlesztők logikájának következtében alapvetően a természetes vegetáció szén-, víz- és nitrogénháztartásának szimulálására képes. Emiatt fejlesztői munkába kezdtünk, és módosításokat eszközöltünk annak érdekében, hogy a mezőgazdasági növények szén-dioxid mérlegéről is megbízható információkat kapjunk (Hidy et al., 2012), de az erdővel kapcsolatos fejlesztéseket is szem előtt tartottuk. A modellfejlesztés technikai részét (a konkrét programozást) Hidy Dóra végezte kezdettől fogva, és végzi a mai napig. A Biome-BGC amerikai fejlesztése a 4.2-es verzióval abbamaradt, valószínűleg emberi erőforrás problémák miatt. A hazai Biome-BGC csapat az eredeti modellt alapul véve egy új szálon folytatta a fejlesztéseket, megőrizve a Biome-BGC eredeti központi logikáját, de jelentős átalakításokat eszközöltünk. A módosított modellt Biome-BGCMuSo-nak neveztük el, és a verziószámozást újrakezdtük 1.0-tól kezdődően (2012-ben). Hosszú fejlesztői munka eredményeképpen jelenleg a Biome-BGCMuSo 6.2-es verzióján dolgozunk (2021. szeptemberi állapot). Alapvető fontosságúnak tartottam kezdettől fogva a modell részletes dokumentálását, és azt, hogy nyílt forráskódú, a tudományos közösség számára ingyen elérhető modellt alkossunk. A modellnek honlapot is készítettem és tartok karban az ELTE Meteorológiai Tanszék weboldala alatt, ahol részletes felhasználói kézikönyv is elérhető<sup>5</sup>. A 4.1. ábrán egy infografika segítségével mutatom be, hogy mennyiben tér el az eredeti Biome-BGC és a Biome-BGCMuSo a reprezentált folyamatok szempontjából. Az ábra alapján nyilvánvaló, hogy a számos újításnak köszönhetően a modellezett rendszer sokkal részletesebb leírására nyílt mód. Mindemellett ügyeltünk arra, hogy az eredeti modell jó tulajdonságait (könnyű használhatóság, rugalmas beállíthatóság) megőrizzük.

A modell felépítéséről részletes dokumentáció az eredeti Biome-BGC publikációkban található (Running and Hunt, 1993; Thornton, 1998; White et al., 2000; Churkina et al., 2003; 2009; 2010; Thornton and Rosenbloom, 2005). A hazai fejlesztésekről a Hidy et al. (2012) illetve a Hidy et al. (2016) közleményekben közzétettünk részletes leírást. A nem publikált fejlesztésekről információ található a mindenkori felhasználói kézikönyvben (Hidy et al., 2021).

---

<sup>5</sup> <http://nimbus.elte.hu/bbgc>





4.1. ábra. Az eredeti Biome-BGC és a Biome-BGCMuSo által reprezentált főbb folyamatok szemléltetése. A vasvillás gazda az emberi tevékenység hatásának számszerűsítését jelenti (vetés, aratás, kaszálás, fakitermelés stb.). Az ábrát Hidy Dóra készítette.

Jelen dolgozatban elsősorban a modell alkalmazására fókuszálok, de kiemelném, hogy meghatározó szerepem volt/van a modell fejlesztésében, tesztelésében, az algoritmusok készítésében, a felhasználókkal való kapcsolattartásban, a dokumentáció készítésében, és Hollós Roland doktoranduszommal az újabb szoftveres megoldások karbantartásában is részt veszek (pl. RBBGCMuso szoftvercsomag a GitHub-on).

## 4.2. Eredmények

A modell alkalmazása kapcsán két vonalon indultam el. Egyrészt használtam az eredeti Biome-BGC modellt, ami bizonyos elhanyagolások révén alkalmas az ökoszisztémák szénmérlegének modellezésére. Másrészt amikor a modell már elég fejlett állapotban volt (2010 után), alkalmaztam a Biome-BGCMuSo-t is különböző vizsgálatok kapcsán.

A modell alkalmazása során összegyűlt tapasztalatok segítségével vizsgálhatóvá vált, hogy az emberi beavatkozás elhanyagolása mekkora hibát okoz az eredeti Biome-BGC-vel végzett szimulációkban. A kérdés megválaszolásához fel tudtam használni a saját mérési

eredményeket, elsősorban Hegyhátsál vonatkozásában, de számos más eddy kovariancia állomás adatát is felhasználtam az évek során.

Fontos megemlíteni, hogy erdők vonatkozásában a mai napig reálisnak tartom az eredeti Biome-BGC alkalmazását, még akkor is, ha nagyon egyszerű talajnedvesség sémát használ. Gyepek, illetve szántóföldi növényzet esetén viszont nem gondolom hasznosnak az eredeti modellt ma más, a későbbiekben is tárgyalt észrevételek miatt.

#### 4.2.1. Eredmények – Biome-BGC

A modellezéssel kapcsolatos kutatások kezdeti fázisában kezdtem bele a Biome-BGC modell adaptálásába a hegyhátsáli vegyes mezőgazdasági terület hosszú távú szénháztartásának modellezése céljából. Az eredeti Biome-BGC a légyszárú növények közül gyepek szénháztartását képes szimulálni. Nincs felkészítve az emberi beavatkozástól erősen függő mezőgazdasági kultúrnövények szénháztartásának kezelésére. Emiatt munkám során a mezőgazdasági területeket egyfajta “szupergyep”-ként, vagyis trágyázott gyepeként kezeltem (Barcza et al., 2010). A modellkalibráció Monte-Carlo Maximum Likelihood módszer segítségével történt. A kalibráció után megfelelő pontossággal tudtam modellezni a hegyhátsáli vegyes mezőgazdasági terület szénmérlegét.

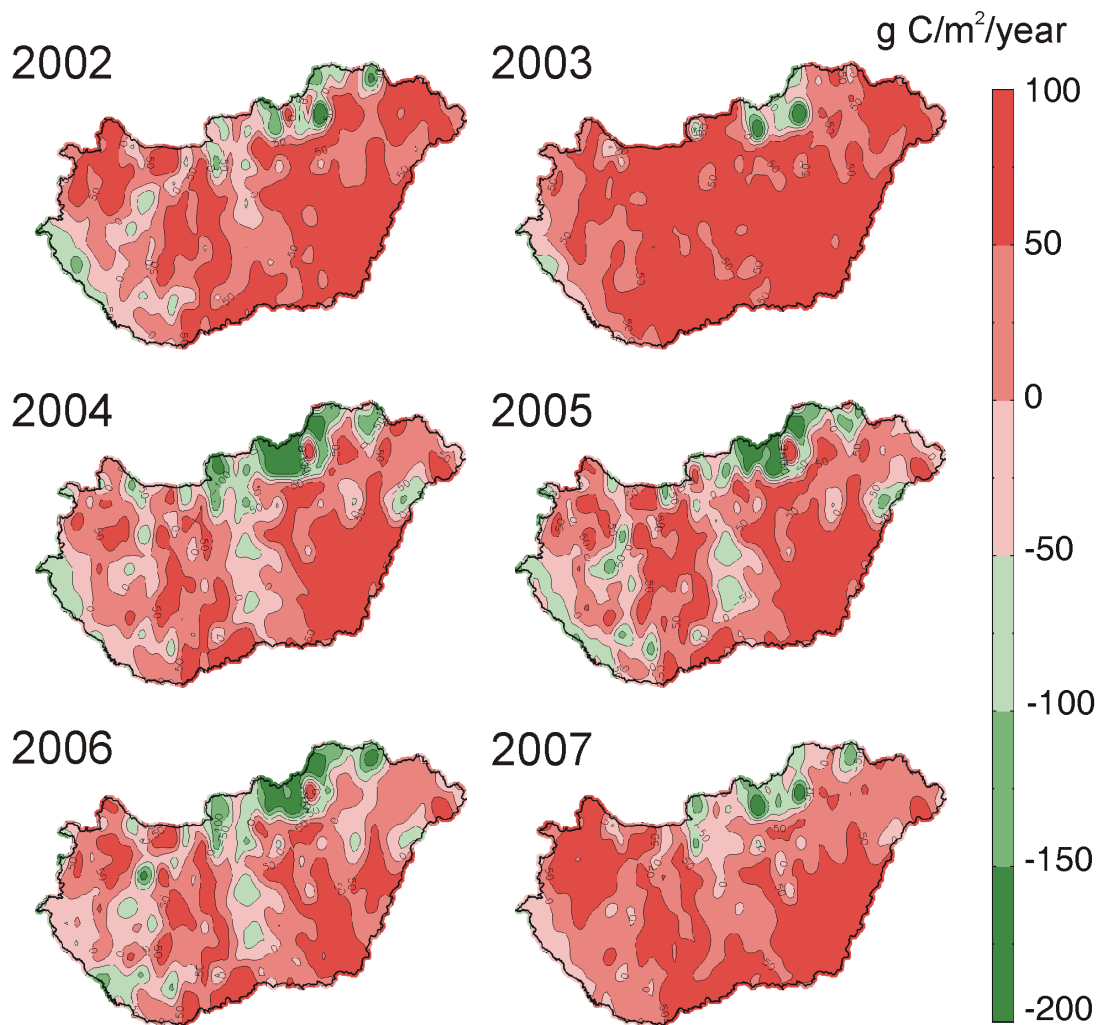
Mivel a 82 m magasságban működő eddy-kovariancia mérés egy nagyobb terület szénháztartásáról szolgáltat információt (Barcza et al., 2009a), ezért kézenfekvő a mérési eredmények kiterjesztése nagyobb térségre, vagy akár az egész ország területére. Mivel hazánkban igen változatos az éghajlat és a talajszerkezet (víztartó képesség, talajösszetétel), ezért a felskálázást célszerű olyan modell segítségével elvégezni, ami figyelembe tudja venni az eltérő meteorológiai és talajtani viszonyokat. A Biome-BGC modell alapfilozófiájánál fogva képes a fenti problémák kezelésére, ezért a nagyobb területek szénháztartását e modell segítségével kíséreltem meg leírni.

2009-ben jelent meg az a tanulmány, amelyben hazánkban elsőként próbáljuk megbecsülni az ország teljes bioszférikus szénmérlegét folyamat-orientált modell segítségével (Barcza et al., 2009b). A korábban említett CARBOEUROPE-IP projekt keretén belül több kutatócsoport is modellezi Európa (köztünk hazánk) szénmérlegét. A felhasznált modellek azonban viszonylag durva térbeli felbontásúak, és ezzel összefüggésben csak általános paraméterezést használnak (Janssens et al., 2005; Vetter et al., 2008; Gervois et al., 2008). Pontosabb eredmények eléréséhez szükség van a kisebb régiók helyi sajátosságainak figyelembevételére is. A tanulmányban pontosan azt a célt tűztük ki magunk elé, hogy a

rendelkezésre álló legpontosabb adatbázisok alapján, a hazai eddy kovariancia mérések figyelembevételével lehetőleg minél torzításmentesebb képet adjunk a bioszférikus szénmérlegről.

A munka során (amely egy GVOP pályázat keretein belül történt Horváth László koordinálásával) felhasználtuk az akkori MTA Talajtani és Agrokémiai Kutatóintézet (MTA TAKI), a Földmérési és Távérzékelési Intézet (FÖMI), illetve az Országos Meteorológiai Szolgálat korszerű adatbázisait (az MTA TAKI a közelmúltban történt átszervezés után ma már az Eötvös Loránd Kutatási Hálózat része, Agrártudományi Kutatóközpont Talajtani Intézet néven; a FÖMI ma Lechner Tudásközpont néven működik). A hiteles modellezés érdekében négy alapvető növényborítottság (PFT) kategóriát definiáltunk (gyepek, mezőgazdasági területek, lombhullató, illetve tűlevelű erdők), és ennek megfelelően négy különböző modellparaméterezést használtunk. Az eredmények rámutattak, hogy a modellezett szénáramok lényegesen eltérnek az egyes növénytípusok esetén, ezért elengedhetetlenül szükséges külön kezelni az egyes kategóriákat. A 4.2. ábrán Magyarország teljes bioszférikus CO<sub>2</sub> mérlegét láthatjuk a 2002-2007 időszakra (Barcza et al., 2009b, 6. ábra alapján).

A modellszámítások eredménye szerint a hazai bioszféra összességében nettó CO<sub>2</sub> kibocsátó: a 2002-2007-es időszakban évente átlagosan 8,7 millió tonna CO<sub>2</sub> a kibocsátás. Ez elsősorban az aktív művelés alatt álló mezőgazdasági területek hatásának tudható be. Érdeemes megemlíteni, hogy a teljes hazai, antropogén eredetű CO<sub>2</sub> kibocsátás 60,75 millió tonna volt ebben az időszakban (National Inventory Submission of Hungary, 2008). A tanulmányban rámutatunk arra, hogy a “szupergyep” megközelítés miatt a mezőgazdasági területek szénkibocsátása igen nagy valószínűséggel felülbecsült. Ez annak tudható be, hogy a valóságban az emberi beavatkozás hatására a learatott termény elszállítódik a földről, és a benne tárolt szén máshol kerül vissza a légkörbe. Az elszállítás miatt a CO<sub>2</sub> kibocsátás (respiráció) egy része nem a helyszínen valósul meg, így a respirációt a modell felülbecsli. A respiráció felülbecslése a bioszférikus szénmérleget a kibocsátás felé tolja el, és ez szisztematikus hibaát okoz a nagy területre való kiterjesztés során. Konklúziónk az volt, hogy további kutatásokra van szükség a hazai mezőgazdasági területek szénháztartása kapcsán (amik azóta megvalósultak; lásd lejjebb).

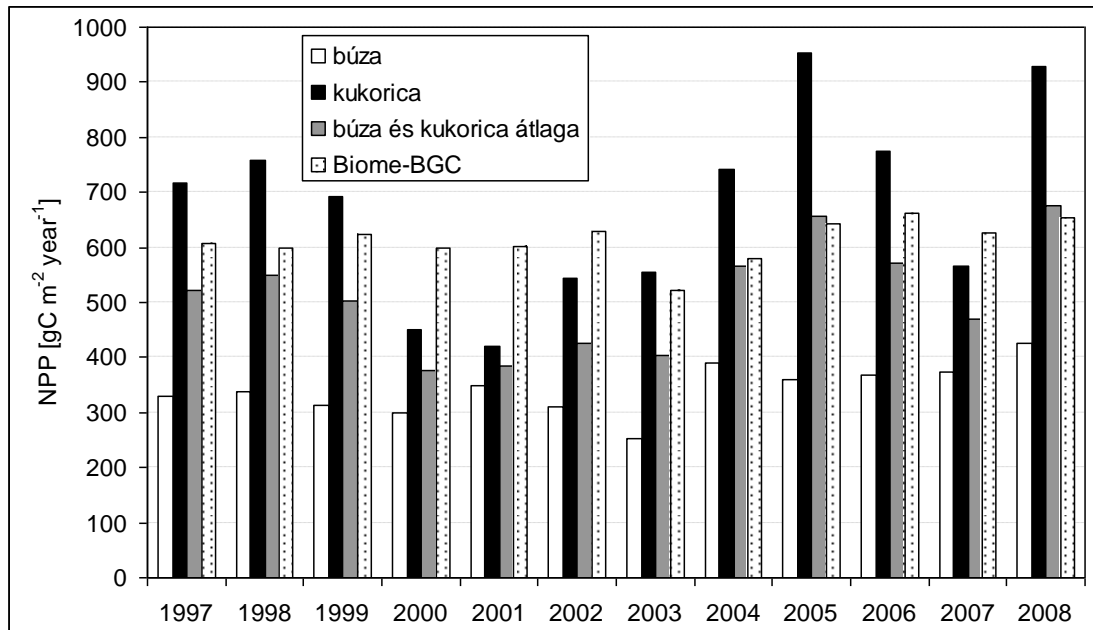


4.2. ábra. Magyarország becsült bioszférikus szénmérlege a 2002-2007 időszakban (NEE;  $\text{gC/m}^2/\text{év}$ ). A modellezett, növény-specifikus NEE értékek területileg súlyozva lettek figyelembe véve. A negatív érték szénfelvételt jelent.

2010-ben készült el az a könyv a Springer kiadó gondozásában, amely a magyarországi üvegházhatású gázokkal kapcsolatos kutatási eredményeket foglalta össze (Haszpra, 2010). A könyvben együtt használtuk az eredeti és a továbbfejlesztett Biome-BGC modellt különböző mérőhelyekre, illetve az egész országra vonatkozóan. A könyv több fejezetének írásában is részt vettem társszerzőként. Itt két fejezetet emelek ki, amelyek jól bemutatják a munkám irányát, és a problémákat, amelyre megoldást kínáltam.

A könyv 12. fejezetében (Grosz et al., 2010) mutatom be a “szupergyep” megközelítés továbbfejlesztését a hegyhátsági, magas torony alapú EK mérés adatai, illetve megyei szintű Központi Statisztikai Hivatal (KSH) termésátlag adatok alapján. A könyvfejezetben alternatív

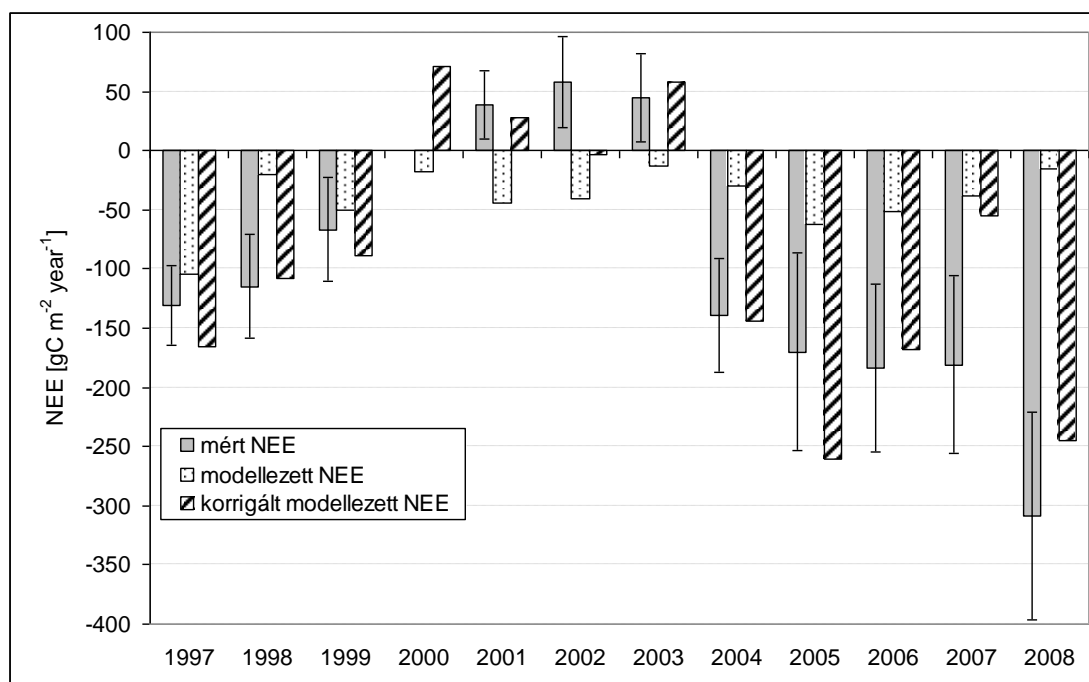
módon, az ún. “harvest index” (HI) módszerrel (Goudriaan et al., 2001) is becslöm a hegyhátsági térség NPP)-jét, ami a mezőgazdasági haszonnövények produktivitásának egyik mérőszáma. Az újabb keletű munka során újrakalibrált Biome-BGC modell eredményeit összevettem a HI módszer becsléseivel (4.3. ábra).



4.3. ábra. A “harvest index” módszerrel, illetve a Biome-BGC modellel becsült mezőgazdasági NPP Hegyhásál környezetében, az 1997-től 2008-ig terjedő időszakban

Az eredmények rámutattak, hogy a Biome-BGC modell jól közelíti az NPP-t hosszú időszak átlagában, viszont kevésbé képes leírni az NPP évek közötti változékonyságát. Az alapvetően eltérő módszerekkel meghatározott eredmények összhangja arra utal, hogy viszonylag pontosan tudjuk becsülni a szántóföldek NPP-jét.

A modellezési munka legfontosabb célja az volt, hogy a Biome-BGC modell segítségével minél torzításmentesebb képet adjunk a régió szénmérlegéről. Tekintettel a modellstruktúra alapvető hibájára (miszerint nem képes kezelni az emberi beavatkozást), nem meglepő, hogy a modellezett fluxusok (GPP, Reco, NEE) szisztematikusan hibától terheltek (Grosz et al., 2010). Az újabb keletű eredmények megerősítették a korábbi tapasztalatokat, miszerint a modell túlbecsüli az NEE értékét a vegetációs időszakon kívül. Az NEE modellezésének pontosítása érdekében egy egyszerű hibakorrekción alkalmaztam a modellezett NEE adatokon, amely felhasználta a megyei szintű KSH termésátlagokat. A korrigált NEE adatsor megfelelően bizonyult az NEE közel torzításmentes leírására (4.4. ábra).



4.4. ábra. A 82 m magasságban mért, modellezett, illetve korrigált modellezett NEE éves összegei az 1997-től 2008-ig terjedő időszakban. A mért adatok bizonytalansága is látható az ábrán. 2000-ben technikai okokból nem volt mérés.

A korrekció sikeressége, és a Biome-BGC modell “szupergyep” megközelítésének eredményei alapján azt a következtetést vontam le, hogy a modell alkalmas arra, hogy pontosítsa a korábbi, országos léptékű eredményeket. Ha az emberi beavatkozás szénháztartásra gyakorolt hatását is számszerűsíteni tudjuk, akkor lehetőség nyílik arra, hogy ne csak az NEE-t, hanem a sokkal fontosabb NBP-t is becsülni tudjuk. Az NBP-t nagyon sok tényező befolyásolja, többek között a vízben oldódó szerves vagy szervetlen szénvegyületek kioldódása, a talajerózió, a talaj metán-kicserélődése, a tűz általi CO<sub>2</sub> kibocsátás stb., és – ami számunkra a legfontosabb – az emberi beavatkozás által okozott vízszintes anyagáram. Ilyen anyagáram pl. a vetés, a szerves trágya alkalmazása, az aratás során elszállított termény, illetve a mezőgazdasági melléktermékek (vagy más szóval tarlómaradvány) esetleges elszállítása. Mivel rendelkezünk információval a termésmennyiségről (KSH), illetve a tarlómaradvánnyal kapcsolatos Magyarországon szokásos eljárásról (Birkás Márta, személyes konzultáció), ezért megkísérelhetjük leírni a Hegyhátsági torony környezetében a horizontális szénáramot (a többi áramot első közelítésben elhanyagoljuk). Az NBP becslésének eredményeit az 4.1. táblázat közli (a részleteket lásd a Grosz et al., 2010 könyvfejezetben).

4.1. táblázat. Mért NEE, korrigált modell alapú NEE, horizontálisan elszállított szénmennyiség, illetve NBP Hegyhátsál környezetében a 2003-2008 időszakban. A mennyiségeket  $\text{gC m}^{-2} \text{év}^{-1}$  mértékegységben adom meg. A negatív NEE nettó szénfelvételt jelent a légkörből  $\text{CO}_2$  formájában. Ezzel szemben a negatív NBP szénvesztésre utal az ökológiai rendszer szintjén (Chapin et al., 2005). Az elszállított szén nettó veszteség a rendszer szempontjából.

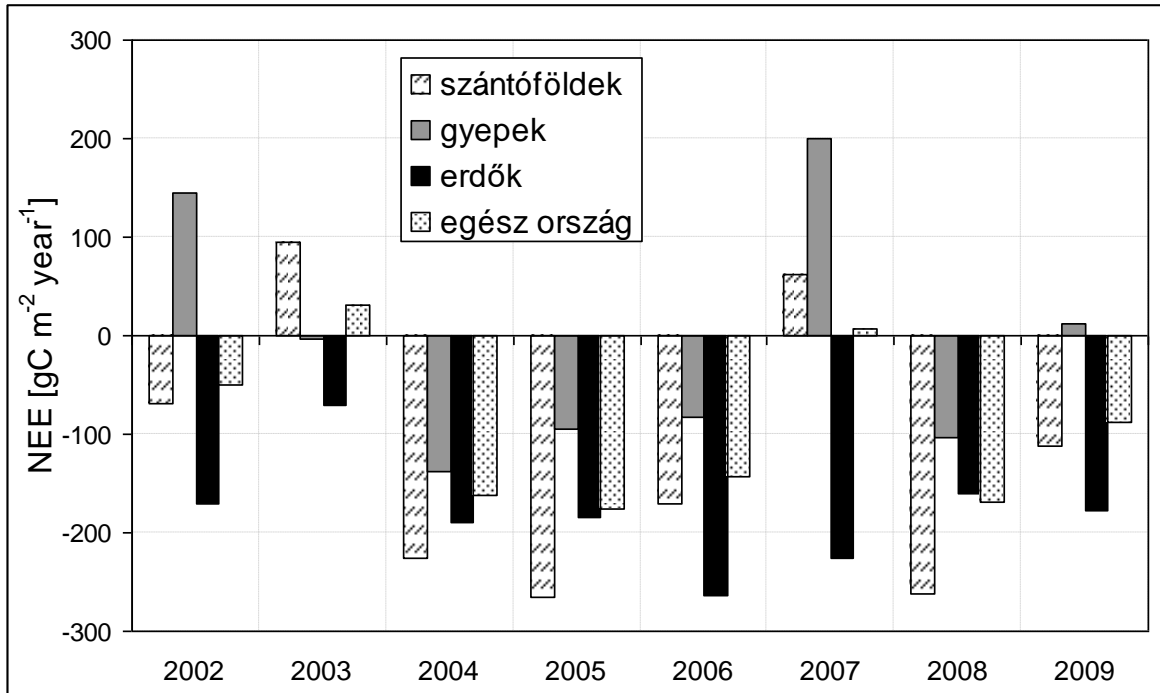
	2003	2004	2005	2006	2007	2008
mért NEE	44	-139	-170	-184	-181	-309
korrigált modell NEE	49	-142	-253	-165	-36	-250
elszállított szén (forrásterület szerint súlyozva)*	144	188	222	197	164	225
NBP a mért NEE alapján*	-189	-49	-53	-12	11	88
NBP a modell NEE alapján	-202	-44	38	-29	-114	24

\* A közölt értékek némiképp eltérnek a 3.3. táblázat eredményeitől, az eltérő módszertan használata miatt.

Az eredmények szerint a hegyhátsáli régió összességében általában szénvesztő, ami lágyszárú növények esetén azt jelenti, hogy a talajban tárolt szén mennyisége csökken. Érdekes módon az eredmények szerint előfordult olyan év, amikor növekedhetett a talajban tárolt szén mennyisége. Ez az eredmény rámutat arra, hogy az emberi beavatkozás hatására elképzelhető olyan földművelési mód, hogy a szántóföldek csökkenthessék a klímaváltozás esetleges hatásait a légköri  $\text{CO}_2$  megkötésén keresztül. Értelemszerűen nagyon komoly további kutatómunkára és tervezésre van szükség ahhoz, hogy ezt az eredményt alátámasszuk, és a művelési módok megváltoztatásával a szénmegkötés megvalósítását elindíthassuk.

A Springer kiadó gondozásában megjelent könyv 13-as fejezete (Barcza et al., 2010) összefoglalja és integrálja ismereteimet, amelyeket a több éves kutatómunka során gyűjtöttem össze. A hegyhátsáli mérési adatokra alapvetően épülő modellező munkám tette lehetővé, hogy átfogó képet próbáljak nyújtani Magyarország bioszférikus eredetű üvegházhatású gáz (ÜHG) mérlegéről. A könyvfejezet készítése során megpróbáltam összegyűjteni minél több információt, modelleredményt, statisztikai adatot ahhoz, hogy lehetőleg ne csak egyetlen becslésünk legyen az ország szén-dioxid és egyéb üvegházhatású gáz (dinitrogén-oxid és metán) mérlegének egyes tagjaira, és magára a mérlegére is. A munka során felhasználtam és javítottam a Biome-BGC modell alapján számított eredményeket is (Barcza et al., 2009b). A hazai szántóföldek szénmérlegének modellezéséhez a “szupergyep” megközelítést, illetve a korrigált modelleredményeket használtam fel. A hazai erdők szénmérlegének becslését is

elvégeztem. A 4.5. ábra mutatja be a Biome-BGC modell eredményeit a teljes országra vonatkozóan.



4.5. ábra. A Biome-BGC modell országos léptékű futtatásának eredményei a 2002-2009 időszakra vonatkozóan (NEE). Szántóföldek esetén a korrigált NEE kerül bemutatásra. A negatív NEE szénfelvételt jelent a légkörből.

Az ábra egyik legfontosabb tanulsága az, hogy az NEE igen nagy évek közötti változékonysággal bír, amit az uralkodó időjárás okoz. A vizsgált időszakban két olyan év is előfordult (2003 és 2007), amikor országos átlagban a bioszféra nettó szén-dioxid kibocsátó volt. Ezt elsősorban a 2003-as és 2007-es hőhullámok okozhatták, valamint az, hogy hazánk területének kb. a fele mezőgazdasági művelés alatt áll, és emiatt a szántóföldek szénmérlege alapvetően meghatározza a teljes szénmérleget. A hazai erdők is fontos szerepet játszanak a teljes szénmérlegben: az ország területének kb. ötödrészen elhelyezkedő erdők komoly szénfelvevő kapacitással rendelkeznek. A gyepek szerepe hasonlóan nagy, bár csupán az ország területének kb. 11%-át borítja legelő vagy kaszáló. A közölt eredmények az NEE-t írják le, azaz a légkörből egy év alatt felvett CO<sub>2</sub> mennyiségét. Az NBP becsléséhez információra van szükségünk az adott ökológiai rendszerből elszállított szén mennyiségéről is. Ennek becsléséhez KSH adatokat, illetve szakirodalmi adatokat használtam fel (Führer and Mátyás, 2005).



Az országos mérleg elkészítéséhez a Biome-BGC modell eredményei mellett felhasználtam több külföldi ökológiai modell eredményét is (ORCHIDEE-STICS, LPJmL, térben explicit erózió modell (Van Oost et al., 2009), Fuzzy logic modell, PASIM, valamint hazai kollégák eredményeit is figyelembe vettem (MOD17, DNDC).

4.2. táblázat. A szintézis munka során felhasznált modellek, adatbázisok és egyéb adatforrások. A becsült ŰHG mérleg komponensek, illetve az adatsorok térbeli és időbeli felbontása is meg van adva.

adatforrás/modell	modellezett/becsült komponens	térbeli felbontás	időbeli felbontás
Biome-BGC	NEE, GPP, $R_{\text{cco}}$ , NPP	$1/6^\circ \times 1/6^\circ$	2002-2009
DNDC	talaj $\text{N}_2\text{O}$ emisszió, $\text{CH}_4$ kicserélődés	$1/6^\circ \times 1/6^\circ$	2002-2004
LPJmL	NBP, NPP, NEE, laterális szénfluxus, tűz általi $\text{CO}_2$ emisszió	$0.5^\circ \times 0.5^\circ$	2002-2006
MOD17	GPP, NPP	1 km $\times$ 1 km	2000-2006
ORCHIDEE-STICS	NPP, NBP	$1^\circ \times 1^\circ$	1990-1999
térben explicit erózió modell	szén erózió, folyókban szállított szénfluxus	1 km $\times$ 1 km	1995-2005 átlag
Fuzzy logic modell	$\text{N}_2\text{O}$ emisszió	gyepek	1990-1999 átlag
KSH termésátlag adatok	NPP, laterális szénfluxus	NUTS 3 (megyei) szint	2000-2009
FAOSTAT TradeSTAT	C export/import	ország	2000-2007
AGROTOPO	talaj szénkészlet	100-500 m	~1980
DKSIS	talaj szénkészlet	25-100 m	1938-1953
Führer and Mátyás 2005	NPP, erdei biomasszában tárolt szén, fakitermelés	magyar erdők	2002
Janssens et al. 2005	NBP, szén egyenértékben kifejezett export/import	ország	1990s
Ciais et al. 2010b	$\text{N}_2\text{O}$ emisszió	szántóföldek	1990-1999
Vuichard et al. 2008 (PASIM modell)	$\text{N}_2\text{O}$ emisszió	$1^\circ \times 1^\circ$	1990-1999

A KHS adatain kívül felhasználtam a FAOSTAT TradeSTAT adatbázisát a külkereskedelem (export és import) okozta horizontális szénmozgás leírására. Az MTA Talajtani és Agrokémiai Kutatóintézete által készített AGROTOPO és KREYBIG adatbázisok segítségével becsültük a hazai talajokban rátolt szénmennyiséget is. A teljes felhasznált adatbázist a 4.2. táblázatban mutatom be.

Az eredményeket táblázatos formában közöltem a Barcza et al. (2010) könyvfejezetben külön szántóföldekre, erdőkre, gyepekre, illetve az egész országra vonatkozóan. A 4.3. táblázatban az egyes felszínborítottság kategóriák értékeinek a szintézisét mutatom be. Itt a könyvfejezetben származtatott legjobb becslések értékei láthatóak.

4.3. táblázat. Bioszférikus üvegházhatású gáz mérleg komponensek gyepekre, erdőkre és szántóföldekre vonatkozóan. A szénfluxusok (NEE, GPP, Reco, NPP, NBP, emberi beavatkozás hatására történő horizontális szénmozgás,) az egyes felszínborítás kategóriák teljes területére vonatkozó átlagok. A negatív NEE a légkörből történő szénfelvételt jelent, míg a negatív NBP szénvesztést jelent.

	<b>gyep</b>	<b>erdő</b>	<b>szántóföld</b>
NEE [gC m <sup>-2</sup> év <sup>-1</sup> ]	-8	-180	-118
GPP [gC m <sup>-2</sup> év <sup>-1</sup> ]	1314	1395	872
R <sub>eco</sub> [gC m <sup>-2</sup> év <sup>-1</sup> ]	1570	1389	757
NPP [gC m <sup>-2</sup> év <sup>-1</sup> ]	768	593	507
horizontális C szállítás [gC m <sup>-2</sup> év <sup>-1</sup> ]	28	105	193
NBP [gC m <sup>-2</sup> év <sup>-1</sup> ]	-20	110	-31
biomassza szénkészlet [kgC m <sup>-2</sup> ]	-	7,41	-
talaj szénkészlet [kgC m <sup>-2</sup> ]	12,7	10,57	13,47
N <sub>2</sub> O kibocsátás [gN <sub>2</sub> O m <sup>-2</sup> év <sup>-1</sup> ]	0,1195	0,0764	0,9679
CH <sub>4</sub> kicserélődés [gCH <sub>4</sub> m <sup>-2</sup> év <sup>-1</sup> ]	-0,057	-0,098	-0,1979
NGB [gC-eq m <sup>-2</sup> év <sup>-1</sup> ]	-9,8	104,2	-110,6

Mivel több adatforrást is felhasználtam, itt értelemszerűen nem zár a szénmérleg, vagyis pl. az NEP (= -NEE) és az elszállított szén különbsége nem adja ki pontosan az NBP értékét. Ugyancsak nem teljesül az NEE=GPP-Reco egyenlőség (az individuális adatforrások esetében természetesen zárt a mérleg). Mindenesetre a táblázat jól mutatja az egyes felszín típusok szénmérlege, illetve tágabb értelemben üvegházhatású gáz mérlege közötti eltéréseket. Az egy

négyzetméter felületre vonatkoztatott értékek az egyes kategóriák teljes országon belüli területével felskálázhatók országos szintre a Barcza et al. (2010) könyvfejezet 13.2 táblázata alapján.

4.4. táblázat. Bioszférikus üvegházhatású gáz mérleg komponensek Magyarország területére vonatkozóan. A táblázatban feltüntettem az egyes adatforrásokat. A szénfluxusok az ország teljes területére vonatkozó átlagok. A negatív NEE a légkörből történő szénfelvételt jelent. A negatív NBP szénvesztést jelent.

	Biome- BGC	MOD17	DNDC	LPJmL	FAO- STAT Trade- STAT	KSH termés + Führer and Mátyás (2005)	Janssens et al. (2005)	AGRO- TOPO	KREY- BIG
NEE [gC m <sup>-2</sup> év <sup>-1</sup> ]	-93,7			-137,1					
GPP [gC m <sup>-2</sup> év <sup>-1</sup> ]	872,2	811							
Reco [gC m <sup>-2</sup> év <sup>-1</sup> ]	813,0								
NPP [gC m <sup>-2</sup> év <sup>-1</sup> ]	511,5	424,9		572,9					
horizontális C szállítás [gC m <sup>-2</sup> év <sup>-1</sup> ]						117,3			
NBP [gC m <sup>-2</sup> év <sup>-1</sup> ]	6,7			0,14			-17,3		
talaj szénkészlet [kgC m <sup>-2</sup> ]								11,45	12,81
tüzek kibocsátása [gC m <sup>-2</sup> év <sup>-1</sup> ]				7,2					
kereskedelem [gC m <sup>-2</sup> év <sup>-1</sup> ]					13,03		10,09		
N <sub>2</sub> O kibocsátás [gN <sub>2</sub> O m <sup>-2</sup> év <sup>-1</sup> ]			0,5244						
CH <sub>4</sub> kicszerélődés [gCH <sub>4</sub> m <sup>-2</sup> év <sup>-1</sup> ]			-0,107						

A 4.4. táblázat mutatja be az eredmények szintézisét a teljes országra vonatkozóan. A számítások egyik legfontosabb eredménye, hogy szén-dioxid tekintetében a nettó mérleg nulla körüli, vagyis összességében a hazai ökológiai rendszerek nem kötnek meg szén-dioxidot a légkörből (NBP~0). Ennek oka, hogy az erdők szénmegkötését ellensúlyozza a

mezőgazdaságra jellemző (kisebb mértékű, de nagy területre jellemző) nettó szén-dioxid kibocsátás (Barcza et al., 2010).

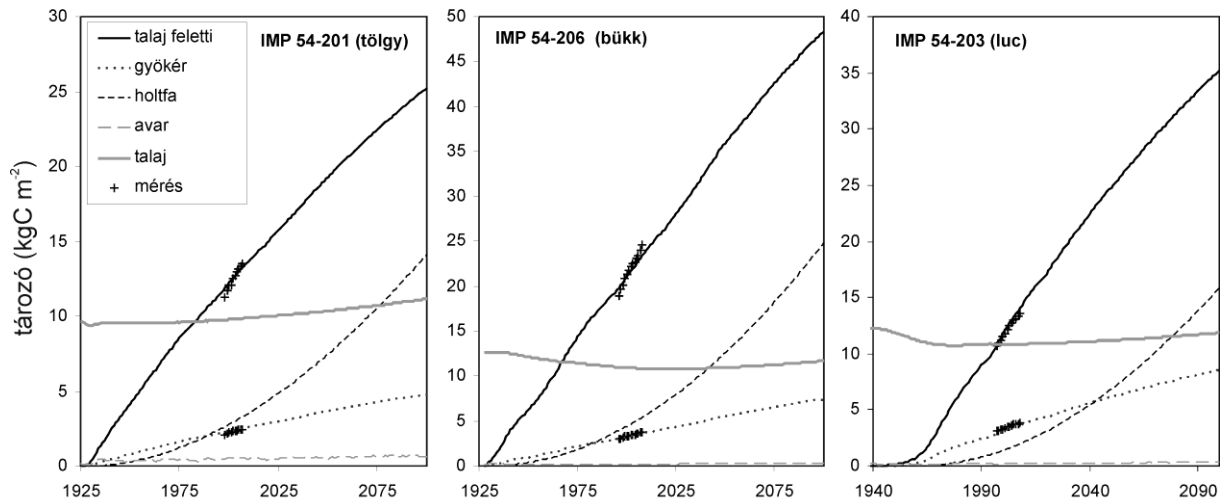
Ha az egyéb üvegházhatású gázokat is figyelembe vesszük, a teljes mérleg (NGB) negatív, vagyis – elsősorban a mezőgazdasági eredetű dinitrogén-oxid kibocsátás hatására – a hazai bioszféra valószínűleg nettó üvegházhatású gáz kibocsátó. Önmagában a műtrágyázás hatására bekövetkező dinitrogén-oxid kibocsátás 44,3 gC-ekvivalens/m<sup>2</sup>/év értékkel módosítja el a mérleget. A nettó bioszférikus üvegházgáz mérleg ily módon -40,5 gC-ekvivalens/m<sup>2</sup>/év (-13,8 Mt CO<sub>2</sub>-ekvivalens/év). A vizsgálat egyik érdekes eredménye, hogy a külkereskedelem összességében csökkenti a hazai üvegházhatású gáz emissziót (az exportált élelmiszer széntartalma máshol oxidálódik, és jut vissza a légkörbe).

Természetesen további vizsgálatokra van szükség ahhoz, hogy pontosíthassuk a hazai ÜHG mérleget. A Barcza et al. (2010) tanulmány hiánypótló anyagnak készült, és hitem szerint megfelelő alapot szolgáltat a további kutatások számára. A nemrég zárult NÖSZTÉP projektben a Biome-BGCMuSo jelenlegi változatát alkalmazva újabb országos léptékű szimulációkat végeztünk, amelyeket a tervezett NÖSZTÉP 2 projekt keretén belül szeretnénk folytatni és pontosítani. Mindkét esetben a Barcza et al. (2010) sarokszámai adják a referenciát, amelyhez hasonlíthatók az új eredmények.

A CECILIA nevű Európai Unió pályázat keretén belül indult el szlovák erdész kollégákkal egy együttműködés, ami az éghajlatváltozás közép-európai hatásaira koncentrált (a magyar partner az ELTE volt Bartholy Judit vezetésével). A közös munka keretén belül elsősorban erdészeti vonatkozású kutatásokat végeztünk, de gyepvel kapcsolatos munka is felmerült később a CarpathCC projekt keretén belül. Itt két közleményt mutatok be röviden, amelyek az együttműködés keretében jöttek létre, és amelyek megírásában meghatározó szerepem volt. Mindkét közlemény jellegzetességére, hogy különböző konkrét fajokra használtuk az eredeti Biome-BGC modellt, klímaprojekciókkal meghajtva (Hlásny et al., 2011; 2014).

A Hlásny et al. (2011) tanulmányban tölgy, bükk és lucfenyő erdők modellezésére fókuszáltunk, multimodell megközelítésben (ami itt a Biome-BGC modellt és a szlovák partner által használt empirikus SIBYLA modellt jelentette). Négy klímaprojekciót használtunk a modellek kapcsán a jövőbeli változások becsléséhez. Erdészeti megfigyelések alapján kalibráltuk a modellt, majd adott CO<sub>2</sub> szint és a nitrogén ülepedés projekció feltételezésével vizsgálatuk az éghajlatváltozás hatását az erdő növekedésére és szénmérlegére. Az 4.6. ábrán a Biome-BGC modell általam szimulált idősorai láthatók három

reprezentatív állomásra a megfigyelési adatok feltüntetésével. Az ábra alapján jól látható, hogy a modell megfelelően képes leírni a különböző fafajok növekedését a tarvágás időpontjától kezdődően. Az ábrából látható, hogy itt a fluxusok mellett nagy szerepet kapnak a tározók is, amik a légyszárúakkal szemben itt meghatározók a szénmérleg vonatkozásában.

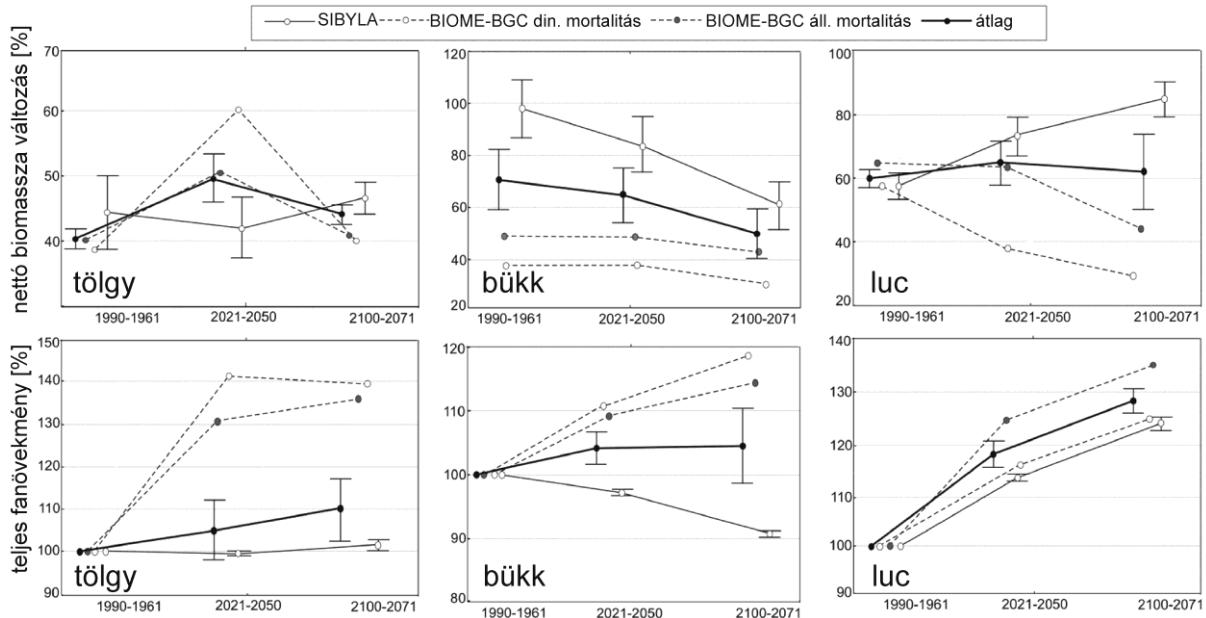


4.6. ábra. A Biome-BGC modell által szimulált, szlovákiai erdőkre vonatkozó szénmérleg komponensek tölgyre, bükkre, illetve lucra vonatkozóan. A megfigyelési adatokat + szimbólum jelzi. Az IMP az adott mérőhely azonosítóját jelenti.

Az 4.7. ábrán a tanulmány összefoglaló ábrája látható. Itt a SIBYLA modell eredményei, illetve a Biome-BGC modell kétfajta mortalitás-feltételezéssel futtatott eredményei lettek együtt ábrázolva. Az eredmények alapján azt a következtetést vontuk le, hogy a jelenlegi ökológiai optimum helyeket tekintve a tölgyesek produkciója a jövőben stabil maradhat vagy növekedhet, a lucosok produkciója növekedhet, míg a bükkösök esetén nagy bizonytalanság mellett csökkenés várható. A Hlásny et al. (2011) tanulmány egyik fő következtetése az volt, hogy a multimodell megközelítés egy fontos eszköz az éghajlatváltozással kapcsolatos hatásvizsgálatok vonatkozásában. A SIBYLA és a Biome-BGC eltérő eredményei alapján nyilvánvaló, hogy nem szabad egyetlen modellre alapozni döntéseket az erdőgazdálkodás vonatkozásában.

A közös munka kapcsán egy további publikáció született, amiben kizárólag lucfenyőre koncentráltunk, de módszertani újdonságokat vezettünk be (Hlásny et al., 2014). Az egyik fontos lépés az erdők mortalitására vonatkozó újabb modell bevezetése volt (1. ábra a hivatkozott tanulmányban). A korábbi cikkben használt állandó és dinamikus mortalitás mellett az ún. elliptikus mortalitást is bevezettük. Emellett a jövőben várható változások

bizonytalanságát is vizsgáltuk, amivel az ökológiai modell modellválasztásából, a klímamodellel választásból, illetve a mortalitás jellegének választásából fakadó bizonytalanság is számszerűsíthető.

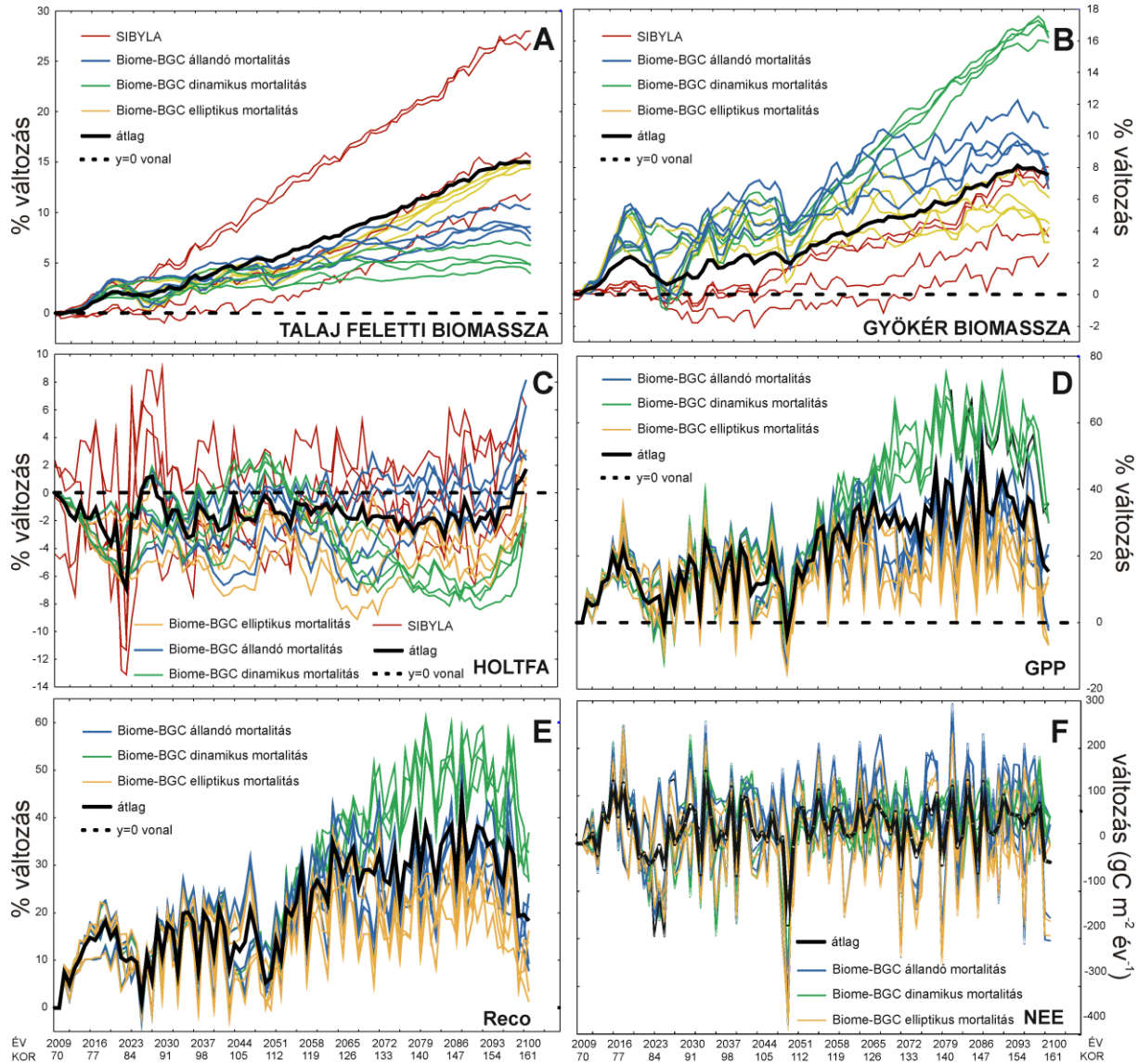


4.7. ábra. A teljes fanövekmény relatív értékei (jövőbeli állapot versus referencia időszak), illetve a nettó biomassza növekedés változása a Biome-BGC illetve a SIBYLA modellek alapján a vizsgált 30 éves időszakokra. A Biome-BGC esetén kétfajta mortalitás feltételezéssel dolgoztam (a részleteket lásd Hlásny et al., 2011). Az átlag a három szimuláció átlagát reprezentálja (legjobb becslés). A bizonytalanság leírja a klímamodellekből fakadó bizonytalanságot is.

A 4.8. ábra az eredmények összegzését mutatja be szemléletes módon. Az ábra alapján képet kapunk a modellezés bizonytalanságáról is. A bizonytalanság attributálása alapján megmutattuk, hogy a távoli jövőben (2071-2100) a bizonytalanság fő okozója a mortalitással kapcsolatos feltételezés választása. Ez rámutat a mortalitásra vonatkozó projekciók készítésének fontosságára.

Fontosnak tartom megjegyezni, hogy a regionális klímamodellel-sokaság használata során felmerült módszertani problémák miatt jutottam arra a következtetésre, hogy a hatásvizsgálatok támogatottsága Magyarországon nem megfelelő. Emiatt kezdtünk bele a kezdeményezésem alapján Dobor Laura doktoranduszommal a FORESEE adatbázis fejlesztésébe, ami elsősorban hatásvizsgálatok készítését hivatott támogatni egy tágabb közép-Európai térségben. A FORESEE konzisztens módon kombinálja a múltbeli megfigyeléseket és a jövőbeli, hibakorrigált klímaprojekciókat (Dobor et al., 2015; Kern et al., 2019). Jelenleg a FORESEE karbantartását és fejlesztését Kern Anikó fogja össze. A legutóbbi FORESEE

verzió a 4.0, ami a múltbeli megfigyelések mellett immár 28 hibakorrigált regionális klímamodell adatsort tartalmaz (köztük az RCP scenáriókat). A teljes FORESEE adatbázis publikusan elérhető az adatbázis honlapján.



4.8. ábra. Az éghajlatváltozás lehetséges hatása a széntározókra és a fluxusokra a Biome-BGC és a SIBYLA modell alapján lucfenyő esetén (szlovák kísérleti állomás). A változások a referenciához képesti változást jelentik a 4 klímamodellre (azonos színű vonalak) és a Biome-BGC esetén a háromféle mortalitásra. A változások százalékban vannak kifejezve, kivéve az NEE esetén.

A szlovák erdész kollégákkal való közös munka tapasztalatai alapján a hazai erdők szénmérlegét is nagyobb megbízhatósággal modellezhetjük. A szlovák kollégákkal az együttműködés jelenleg is zajlik, és egy cseh projekt keretén belül (EVA 4.0; Advanced research supporting the forestry and wood processing sector's adaptation to global change and

the 4th industrial revolution<sup>6</sup>) együtt dolgozunk a Biome-BGCMuSo új verziójával. A fő cél a leggyakoribb közép-európai fafajok parametrizációjának pontosítása, erdészeti és eddy kovariancia mérési adatok segítségével.

#### 4.2.2. Eredmények – Biome-BGCMuSo

A Biome-BGCMuSo-val kapcsolatos fejlesztések elméleti alapjait eddig két szakcikkben közöltük (Hidy et al., 2012; 2016), ahol mindkét cikk elkészítésében meghatározó szerepem volt. A munka azóta is folyamatos (jelenleg előkészítés alatt áll a 6.2-es verzió fejlesztéseit bemutató szakcikk).

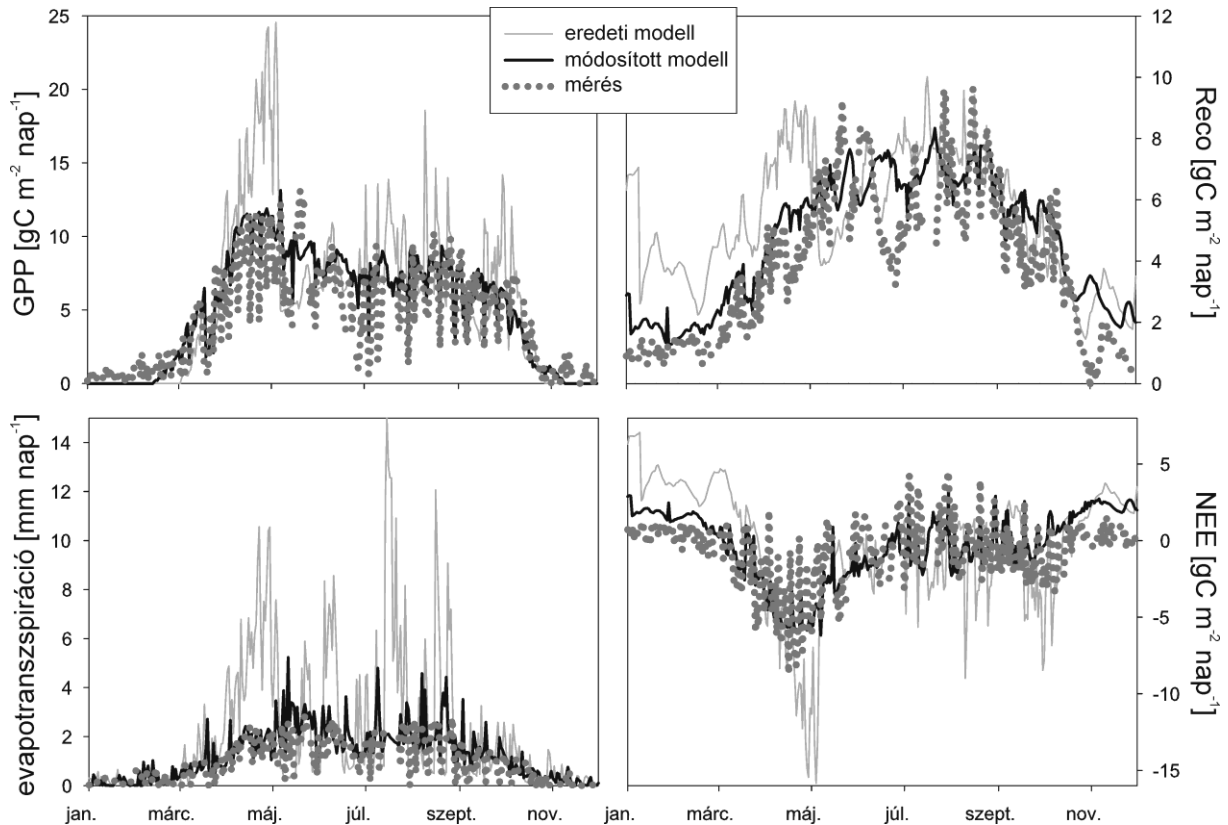
A 2012-ben megjelent szakcikkben (Hidy et al., 2012) elsősorban a gyepes alkalmazások során felmerült fejlesztésekre koncentráltunk. Felhasználtunk a hazai, gyepes felett működő EK mérések redményeit. Illusztrációképpen itt a Hidy et al. (2012) tanulmány egyik ábráját mutatom be, ami jól demonstrálja az eredeti modell kapcsán tapasztalt problémákat, és a módosított modell teljesítményét (4.9. ábra). Lehetővé vált a kaszálás és a legeltetés szimulálása, ahol az előbbi pl. a hegyhátsági HU-He2 kapcsán nem elhanyagolható szerepet játszik a szénmérlegben (Nagy et al., 2010), míg utóbbi a hazai Bugacpuszta mérőhelyre jellemző.

A Springer kiadó gondozásában megjelent könyv (Haszpra, 2010) kapcsán zajló kutatások rámutattak a Biome-BGC modell gyengeségére mezőgazdasági haszonnövények vonatkozásában (lásd feljebb; Grosz et al., 2010). Mivel hazánk területének legnagyobb részén szántóföldi művelés zajlik, ezért Hidy Dórával a mezőgazdasági rendszerek modellezésére kezdtünk fókuszálni. Ekkor vettük fel a kapcsolatot Fodor Nándorral (a korábbi MTA Mezőgazdasági Kutatóintézet; jelenleg Eötvös Loránd Kutatási Hálózat, Agrártudományi Kutatóközpont (ELKH ATK) munkatársa), aki a nevéhez köthető 4M modell (Fodor, 2012; Fodor et al., 2014; Dobor et al., 2016) fejlesztője és első számú felhasználója. A közös munka kezdetén Dobor Laura egykori doktoranduszunk használta a 4M-et a vetésidő jövőben várható alakulásának modellezése kapcsán (Dobor et al., 2016). A közös fejlesztői munka eredményeképpen született a Hidy et al. (2016) tanulmány, ami az újabb fejlesztéseket mutatta be részletesen, három esettanulmánnyal kiegészítve (erdős, gyepes, és szántóföldi szimuláció, EK állomások adatait felhasználva). A szakcikk a Biome-BGCMuSo 4.0 verzióját dokumentálta, ami egy mérföldkő volt a fejlesztések vonatkozásában.

---

<sup>6</sup> <https://eva.fld.czu.cz/en>





4.9. ábra. A modellfejlesztés hatásának szemléltetése a hegyhátsági gyepes mérőrendszer adatai alapján. Az ábrán az eredeti Biome-BGC modell eredményei, és a továbbfejlesztett modell eredményei láthatók, a mérési adatok feltüntetésével a 2008-as évre vonatkozóan (Hidy et al., 2012).

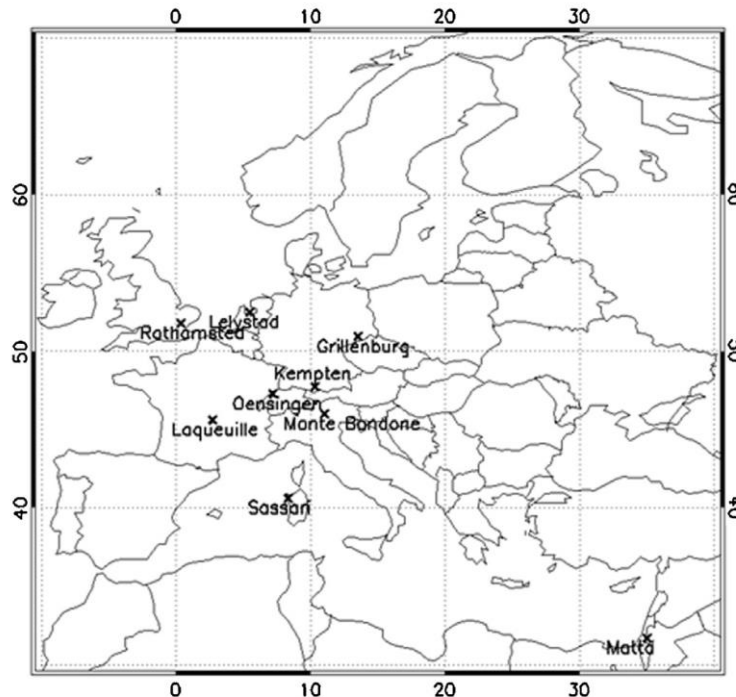
Számos további fejlesztést végeztünk a modell kapcsán az évek során, aminek a felvázolása túlmutat jelen munka keretein. Az említett szakcikkekben részletes dokumentáció olvasható az elméleti háttérrel, az újításokról, azok szükségességéről, illetve a modell honlapján részletes dokumentáció található, ami a modell használatához szükséges. A módosításokat leíró naplófájl is készítettünk a változások követhetőségéhez. A munka komplexitását jól szemlélteti, hogy pl. a Biome-BGCMuSo modell 6.1-es alfa verziójának kiadása előtt 34 béta verziót készítettünk, fordítottunk le és próbáltunk ki kollégáimmal<sup>7</sup>.

A JPI-FACCE MACSUR<sup>8</sup> nemzetközi projekt keretén belül Sándor Renátával (jelenleg ELKH ATK) illetve Lellei-Kovács Eszterrel (jelenleg ELKH Ökológiai Kutatóközpont) vettem részt egy nagyobb gyepmodell összehasonlító projektben, ahol a Biome-BGCMuSo akkori verzióját használtuk (2.2-es verzió; Sándor et al., 2016; 2017). A közös munkát Gianni Bellocchi kezdeményezte (French National Institute for Agriculture,

<sup>7</sup> <http://nimbus.elte.hu/~bzoli/public/OUTGOING/>

<sup>8</sup> <https://macsur.eu/>

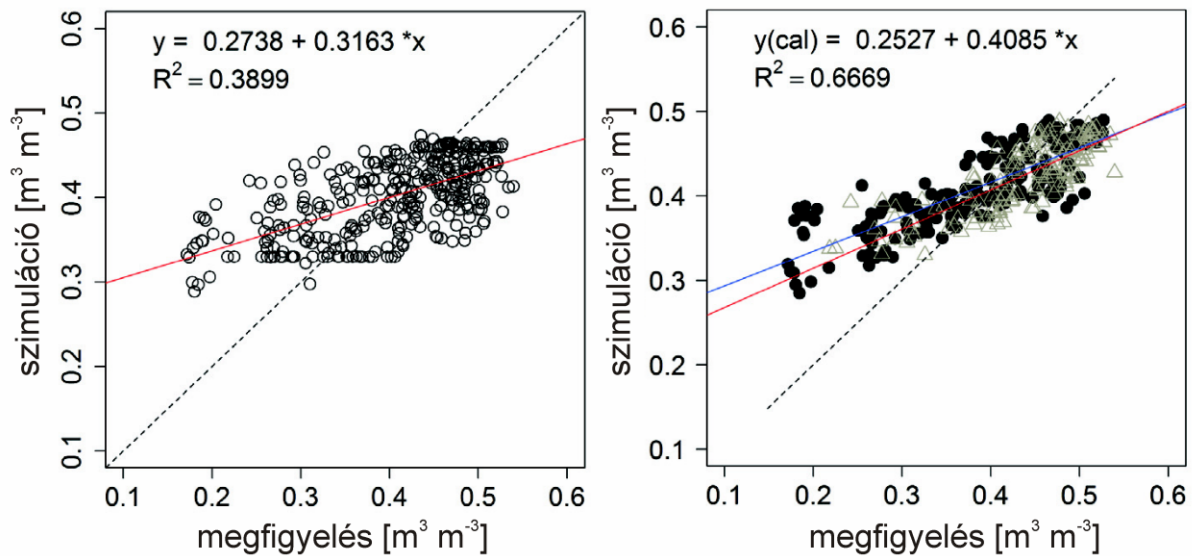
Food, and Environment (INRAE), Franciaország), aki a MACSUR projekt keretén belül a multimodell munkát koordinálta. A közös kutatás részeként a Biome-BGCMuSo-t több európai, illetve egy izraeli kísérleti állomásra alkalmaztuk (4.10. ábra), nyolc további modellező csoport bevonásával (a Biome-BGCMuSo mellett a projektben részt vett az AnnuGrow, PaSim, SPACSYS, EPIC, STICS, ARMOSA, CARAIB és LPJmL modell is).



4.10. ábra. A MACSUR gyepmodell összehasonlító projekt keretén belül vizsgált kísérleti állomások földrajzi elhelyezkedése. Az állomások egy része regisztrált FLUXNET mérőhely.

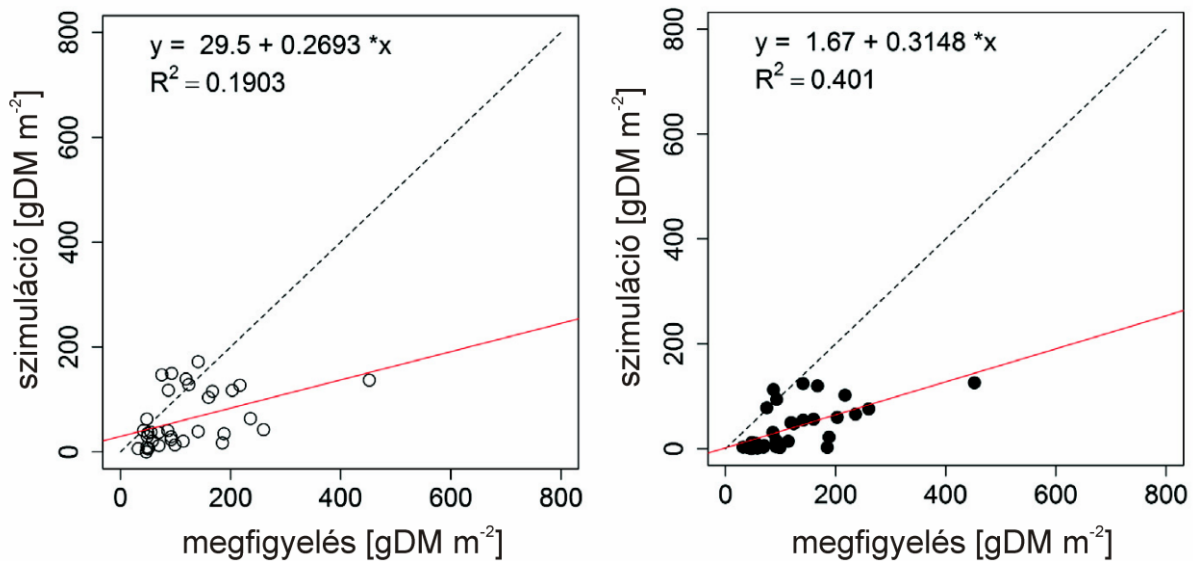
Gyepmodellek esetén legjobb tudomásunk szerint világviszonylatban mi voltunk az első olyan együttműködés, amelynek keretén belül több állomás mérési adatsora, illetve több modellezett változó esetén vizsgáltuk az egyedi modellek teljesítményét, illetve azt is elemeztük, hogy a modellek együttes használata (a multimodell medián a mi esetünkben) vajon jobb teljesítményt nyújt-e, mint az egyedi modellek. Két szakcikk született eddig az eredményekből (Sándor et al., 2016; 2017), illetve egy harmadik előkészítés alatt áll. Az első szakcikk (Sándor et al., 2016) egyfajta előtanulmány volt a későbbi cikkhez (Sándor et al., 2017), amelyben csak a PASIM és a Biome-BGCMuSo szimulációkkal foglalkoztunk. Itt a második anyagból ragadok ki eredményeket szemléltetésképpen, ahol mind a 9 modell eredményét bemutattuk és elemeztük. A teljes anyag igen komplex és informatív, amit jól jellemez, hogy extrém hosszú (140 oldalas!) kiegészítő anyagot tettünk közzé a cikkhez (Supplementary material).

A 4.11. ábrán egy illusztratív eredményt mutatok be a Sándor et al. (2017) tanulmányból a talajnedvesség vonatkozásában. Az ábra készítéséhez mind a 9 modell eredményeit felhasználtuk, és a multimodell medián hasznosságát hivatott szemléltetni. A tanulmányban megmutattuk, hogy SWC esetén a multimodell medián jobban teljesít az egyedi modelleknél, de összességében nem mondható jónak a talajnedvesség szimulálása. Ezt jól demonstrálja a 4.11. ábrán az SWC szimulációk kicsi amplitúdója (az adatok által lefedett tartomány), ami éles kontrasztban áll a megfigyelésekkel.



4.11. ábra. A modellezett talajnedvesség multimodell medián értékei heti időbeli felbontásban Oensingen eddy kovariancia állomáson. A bal oldalon a kalibrálatlan, míg jobb oldalon a kalibrált értékek vannak feltüntetve. Szembetűnő az SWC amplitúdó nem megfelelő reprezentáltsága.

A 4.12. ábrán a multimodell összehasonlítás egyik legfontosabb eredményét mutatom be a lekaszált biomassza vonatkozásában, az egyik legszárazabb klímájú kísérleti állomásra (Sassari, Szardínia). Bár a multimodell medián adta a legjobb becslést az állomásokon, az ábra szemlélteti, hogy a szimuláció minősége kifogásolható, és nyilvánvaló problémák jelentkeznek még a legkorszerűbbnek számító gyepmodellek esetén is. Az eredmények a további fejlesztések szükségességére is felhívták a figyelmet, pl. a talaj nedvességforgalma kapcsán. A szakcikk hozzáadott értéke az ún. 'residual' analízis volt, ami a modellek által meg nem magyarázott varianciát vizsgálja. A residual vizsgálat az ötletem nyomán került be a cikkbe.



4.12. ábra. A modellezett biomassza szárazanyag tartalmában kifejezve (dry matter; DM) multimodell medián értékei heti időbeli felbontásban Sassari állomáson. A bal oldalon a kalibrálatlan, míg jobb oldalon a kalibrált értékek vannak feltüntetve.

A fentiek alapján a multimodell (vagy sokaság alapú) megközelítés alkalmazásához kapcsolódó munkám gyepes és erdők esetén már megjelent tanulmányokban követhető. Szántóföldi növénytermesztés kapcsán jelenleg áll kiértékelés alatt az a szimuláció sokaság, amit az AgMIP projekt keretén belül végeztünk Bruce Kimball (USDA, Agricultural Research Service) koordinálásával. Itt kukoricával kapcsolatos szimulációkat végeztünk egy komplex szimulációs munka során, ahol a fő vizsgált paraméter az evapotranszspiráció, de használtunk LAI, biomassza, és egyéb kiegészítő méréseket. Az eredmények alapján egy szakcikk előkészítés alatt áll.

A Biome-BGCMuSo modell fejlesztése több további hazai illetve nemzetközi együttműködés kialakításához is hozzájárult. Az egykori MTA ÖK (jelenlegi ELKH ÖK) munkatársaival egy közös EU projekt keretén belül (BioVeL) jött létre a Biome-BGC Projects Database & Management System (BBGCDB), ami egy fontos mérföldkő volt a modell használatának elterjesztésében. A BBGCDB egy web alapú környezet, ami a Biome-BGC és a Biome-BGCMuSo használatát teszi lehetővé programozói és más komolyabb informatikai tudás nélkül<sup>9</sup>. Mindösszesen egy Internet böngésző program segítségével lehetővé vált pl. a modell érzékenység-vizsgálata, vagy optimalizálása (Hardisty et al., 2016). A szimulációs környezet reprodukálhatósága is megvalósítható lett a BBGCDB segítségével. A BioVeL projekt hazai koordinátora Horváth Ferenc volt.

<sup>9</sup> <https://bbgcdb.agrar.mta.hu/>

Fodor Nándorral, illetve rajta keresztül az ATK-val a közös munka jelenleg is zajlik (Fodor et al., 2021), és ennek eredményeképpen a Biome-BGCMuSo az évek során kiegészült számos olyan folyamat reprezentálásával, amelyek a szén-, víz-, illetve nitrogénmérleg, és ezen keresztül az ŰHG mérleg pontosabb becslését teszik lehetővé. Felhasználtunk modulokat a Fodor Nándor által fejlesztett 4M modellből, amiben több olyan jól bevált séma is megjelent, ami segítheti a biogeokémiai modell szimulációinak javulását (pl. az ún. 'tipping bucket' talajnedvesség séma jelentősen javított a talajnedvesség-mérések hitelességén). A modell jelenleg crop (azaz termés) modellként is használható a 4M-hez köthető fejlesztéseknek köszönhetően. Jelen sorok írásának idején egy 2021-ben záruló GINOP projekt keretén belül készítettünk modellezési környezetet a Biome-BGCMuSo részére (AgroMo GUI), ami kiegészül a modell folyamatos javításával, fejlesztésével, tesztelésével, vagyis a modell-adat fúzió minél több elemének gyakorlati alkalmazásával.

A Biome-BGCMuSo kapcsán megemlítendő az RBBGCMuso szoftvercsomag<sup>10</sup>, ami R környezetben teszi lehetővé a Biome-BGCMuSo felhasználóbarát használatát. Az RBBGCMuso a BBGCDB továbbgondolása és kiegészítése, köztes tudású felhasználók részére (valamennyi programozói tudást igényel a használata). A fejlesztéseket itt alapvetően Hollós Roland jelenlegi doktoranduszom végzi. Én a dokumentációt tartom karban, illetve különböző felhasználóbarát ötletekkel támogatom a fejlesztéseket. Hosszú távú tervünk egy olyan nyílt forráskódú szoftver létrehozása, amivel a Biome-BGCMuSo új felhasználói néhány egyszerű, jól dokumentált lépés elvégzése után a Föld bármely pontjára tudnak szimulációt készíteni oly módon, hogy mind a talaj, mind a meteorológiai bemenő adatokat publikus adatbázisokból biztosítjuk, és az ökofiziológiai paraméterezést általánosított készlet alapján mi adjuk. A modell érzékenység-vizsgálata, optimalizálása, az eredmények vizualizálása mind a szoftvercsomag létező és működő komponensei.

A 4.13. ábrán mutatom be a Biome-BGCMuSo modellhez kapcsolódó komponenseket, amik jelenleg rendelkezésre állnak. Az AgroMo 1.0 szoftvercsomag létrehozása kiemelendő, mivel egy Integrált Modellrendszer (IM), ami hazánkban előzmény nélküli. Az IM-ben a FORESEE alapú klímaprojekciók ugyanúgy helyet kaptak, mint a különböző agrotechnikai forgatókönyvek, amiket az ELKH ATK hozott létre. Az IM segítségével valószínűségi becsléseket lehet adni a hazai mezőgazdasági termelés lehetséges jövőbeli alakulásáról oly módon, hogy egyszerre származtatjuk a termésmennyiséget

---

<sup>10</sup> <https://github.com/hollorol/RBBGCMuso>

(mezőgazdasági vonal), és az ÜHG mérleget (klímakutatás vonal). Ily módon nem csak a gazdasági vonatkozások vizsgálhatók, hanem a klímavédelem is szerepet kap.

The image displays the Biome-BGCMuSo website and its associated software interface. The website, titled "Biome-BGCMuSo univerzum", features a navigation menu, a "NEWS" section, and a "User's Guide for Biome-BGCMuSo 6.1" document. The "User's Guide" is authored by Dóra HDY<sup>1</sup>, Zoltán BARCZA<sup>2,3,4</sup>, Roland HOLLÓ<sup>3</sup>, Peter E. THORNTON<sup>1</sup>, Steven W. RUNNING<sup>3</sup>, and Nándor FODOR<sup>4</sup>. The software interface, "Biome-BGCMuSo Projects Database & Management System 5.0", includes a login section, a "Biome-BGCMuSo Projects Database & Management System 5.0" overview, and a "Biome-BGCMuSo Projects Database & Management System 5.0" menu. The interface also features a "Biome-BGCMuSo Projects Database & Management System 5.0" menu with options for "PARAMETER ANALYSIS", "INPUT REPORT", "STORYLINE CREATOR", "DATABASE MANAGER", and "HELP". The interface also includes a "LANGUAGES" section with flags for various countries.

4.13. ábra. A Biome-BGCMuSo modell köré kiépített komplex informatikai környezet szemléltetése. A rendelkezésre álló eszközök tulajdonképpen a modell-adat fúzió első hazai megvalósításaként is értelmezhetők.

### 4.3. Összegzés és önálló tudományos eredmények

#### 4.3.1. Munkamegosztás

Mivel a fent tárgyalt modellezés csapatmunka keretében zajlik, itt is fontosnak tartom leírni, hogy mi az én konkrét hozzájárulásom a megjelent publikációk kapcsán.

A modellfejlesztés kapcsán jelenleg úgy oszlik meg a munka a kollégáimmal, hogy Hidy Dóra implementálja a modellt (végzi a programozói munkát), fejleszti a modell algoritmusát, és végez ellenőrzéseket, valamint gyepes, erdős és mezőgazdasági területekre tesztfutásokat is készít. A felhasználói kézikönyvet Hidy Dórával együtt tartjuk karban. Fodor Nándor kollégámmal együtt támogatjuk a fejlesztést, oldunk meg felmerülő problémákat, javasoljuk új algoritmusok beépítését, és teszteljük az új modellverziókat. Hollós Roland doktoranduszom illetve Dobor Laura volt doktoranduszom használják a modellt, és jómagam is végzek szimulációkat különböző modellező munkák keretén belül. Hollós Roland az RBBGCMuso csomag első számú fejlesztője, és ő követi az újabb modellverziókat, illetve készít új eszközöket a modell-adat fúzió támogatására. Az optimalizáció illetve az érzékenység elemzés kapcsán javaslatokat tettem az algoritmus kiválasztására. Dobor Laura saját fejlesztésű “benchmark” környezetben teszteli a modellt, és tartja a kapcsolatot a szlovák kollégákkal, akik aktívan használják erdős ökoszisztémák modellezésére. Kristóf Erzsébet különböző kiegészítő eljárásokat készít a modell részére R környezetben.

A Biome-BGCMuSo szakcikk megírásában meghatározó szerepem volt. Hidy Dórával együtt terveztük meg a kéziratokat, és választottuk ki az esettanulmányok mérési helyeit. Együtt végeztük a modell paraméterezését, és alakítottuk ki a szakcikk végső felépítését.

Az említett JPI-FACCE MACSUR multimodell összehasonlító projekt keretén belül nem csak a Biome-BGCMuSo kalibrálását végeztem és a futtatásokat koordináltam (ez utóbbit Lellei-Kovács Eszter végezte), hanem a teljes adatsor kiértékelésében is aktívan részt vettem Gianni Bellocchival és Sándor Renátával. Meghatározó szerepem volt a kéziratok megírásában is.

A szlovák erdész kollégával közös publikációk kapcsán a Biome-BGC modell paraméterezését én végeztem, illetve készítettem el a futtatásokat. Meghatározó szerepem volt a kéziratok tervezésében és megírásában is.

Az AgroMo IM tervezője és megvalósítója Fodor Nándor és Hollós Roland. Mivel az AgroMo az RBBGMuso és a Biome-BGCMuSo szoftverre épül, és alapvetően magába foglalja a FORESEE adatbázist, így a vonatkozó munkáim itt is megjelennek. Ezen felül jelenleg a modell parametrizációjára vonatkozó munkával járulok hozzá közvetlenül az AgroMo-hoz.

#### 4.3.2. Tudományos eredmények és a vonatkozó publikációk

A fent bemutatott eredményeket az alábbi tézispontokban foglalom össze.

1. Kezdeményeztem a Biome-BGC biogeokémiai modell hazai adaptálását, emellett részt vettem és jelenleg is aktívan részt veszek a Biome-BGCMuSo modell fejlesztésében, ami a Biome-BGC egy továbbfejlesztett változata. A Biome-BGCMuSo ma már egy rugalmas és korszerű biogeokémiai modellnek számít, ami mezőgazdasági modellezés céljára is használható. A modell nyílt forráskódú közzététele és a szoftver támogatása is a közreműködéssel zajlik. A modell a <http://nimbus.elte.hu/bbgc> honlapon érhető el. A modell kapcsán számos szakcikk született, és több nemzetközi együttműködést is indukált, elősegítve ezzel a hazai kutatók beágyazódását a nemzetközi hálózatokba.

2. Erdős, gyepes, és szántóföldi ökoszisztémák esetén is részt vettem multimodell megközelítést alkalmazó együttműködésben a Biome-BGC illetve a Biome-BGCMuSo modell kapcsán. Tevékenységgemmel megalapoztam a hazai ensemble alapú biogeokémiai modellezést. Meghatározó kutatóként részt vettem a világviszonylatban is elsőnek számító gyepes multimodell összehasonlító projektben (FACCE MACSUR; itt a modell alkalmazásában, és az eredmények értékelésében is meghatározó szerepem volt).

3. Elsőként származtattam folyamatorientált biogeokémiai modell segítségével szénmérleg becslést a teljes Magyarországra vonatkozóan, több komponensre. Rámutattam a becslés pontatlanságára a mezőgazdasági területek kapcsán. Módszertani fejlesztést végeztem a mérleg pontosítására, ahol felhasználtam a hegyhátsági magas torony alapú mérések eredményeit is.



4. Széles körű adatgyűjtés és szintézis alapján becslést adtam a hazai gyepek, szántóföldek, erdők, valamint az egész ország teljes bioszférikus üvegházhatású gáz (ÜHG) mérlegére vonatkozóan. A közölt adatsor adja meg az első sarokpontot a nem IPCC módszert használó ÜHG mérleg becslések kapcsán az országra vonatkozóan. Az eredményeket  $1 \text{ m}^2$  felületre is származtattam a könnyű értelmezhetőség kedvéért. Ezen logika átvételét javaslom a hasonló kutatások kapcsán, elkerülendő a megatonnákban és gigagrammokban kifejezett, kevésbé értelmezhető eredményeket.

5. Az eddy kovariancia mérések feldolgozása és értelmezése révén, az eredmények modellezés központú alkalmazásával, illetve a Biome-BGCMuSo modell köré kialakított komplex informatikai környezet révén meghatározó szerepem van a légköri üvegházhatású gázokkal kapcsolatos modell-adat fúzió első hazai gyakorlati alkalmazásában. A modell-adat fúzió hozzájárul a becslések pontosításához, és a segítségével készített szimulációs eredmények a globális modellekkel ellentétben a hazai viszonyokat jobban tükrözik.

6. Kezdeményezésemmre jött létre a FORESEE, ami egy publikus klímaadatbázis az éghajlatváltozással összefüggő hatásvizsgálatok támogatására. A FORESEE Magyarországon egyedülálló módon ötvözi a megfigyeléseket és a hibakorrigált regionális klímamodell eredményeket. Kezdeményezésemmre csapadék frekvencia korrekciót is alkalmaztunk a projektált adatokon. A FORESEE folyamatos fejlesztés alatt áll, és közvetlenül képes kiszolgálni a Biome-BGC és Biome-BGCMuSo meteorológiai adatigényét.

A modellező munka eredményeit több szakcikkben illetve könyvfejezetben is közzétettük, amelyek elkészítésében meghatározó szerepem volt (Barcza et al., 2008; 2009b; 2010; Hidy et al., 2010, 2012, 2016; Dobor et al., 2015; Sándor et al., 2016; 2017; Hlásny et al., 2011, 2014, 2016).

Több olyan cikk is született, ahol felhasználták a modellező munkám eredményeit (Hardisty et al., 2016; Kern et al., 2018; Fodor et al., 2021, Ostrogović Sever et al., 2021; Salma et al., 2021).

## 5. Összefoglalás

A szénmérleg, illetve az üvegházhatású gázok felszíni mérlegének vizsgálata Magyarországon viszonylag új kutatási terület. Szerencsére az utóbbi években megnőtt a témakörben aktív kutatómunkát végzők száma. A munka interdiszciplináris jellege révén új kapcsolatokat tudtam kialakítani az évek során, így valamennyi betekintést nyertem az erdészet, az agrártudományok, illetve a gyepgazdálkodás tudományterületén alkalmazott módszerekbe és megválaszolando kérdésekbe.

A PhD óta eltelt években munkám során ötvöztem az eddy kovariancia mérésekkel kapcsolatos tapasztalataimat, és a modellezés során felmerült módszertani eljárásokat. A modell-adat fúzió ad egységes keretet kutatómunkámhoz.

Az eddy kovariancia mérésekből származó eredmények lényegében forradalmasították a szén ciklus vizsgálatát, mivel segítségével közvetlenül tudjuk nagy pontossággal számszerűsíteni a talaj-növény rendszer szénmérlegét, és tágabb értelemben az üvegházhatású gáz mérlegét. Ilyen jellegű eredményeket egyetlen más, jelenleg használt mérés technika sem képes nyújtani a kutatóközösség számára. Munkásságom során eddig 45,5 állomás-év eddy kovariancia alapú adatsorát származtattam, amivel hozzájárultam a szén ciklus kutatás fejlődéséhez, és a modellek validálásához és fejlesztéséhez.

Egyik fő tapasztalat, hogy minden felszíninforma működése sajátos, és kellően részletes vizsgálata tulajdonképpen egész embert igénylő feladat. Az utóbbi években lehetőségem volt részt venni egy GINOP projektben, ahol az egyik legfontosabb irányvonal a különböző tudományterületek integrálása volt (konkrétan az agrártudományok és a klímakutatás, illetve azon belül az üvegházhatású gázok vizsgálatának tudományterülete). A jövőben is szeretnék hűséges maradni ehhez a gondolkodásmóddhoz, ami remélhetőleg több társkutatómmal együtt megvalósított kutatásokat és szakcikkeket fog eredményezni.

A Biome-BGCMuSo modell nyílt forráskódú fejlesztése és ingyenes közzététele tükrözi gondolkodásmódomat a tudomány vonatkozásában: álláspontom szerint dolgozzunk olyan produktumokon, amik mások számára is hasznosak, és ezzel lehetőségeink keretén belül segítsük a tudományos élet előrehaladását. A Biome-BGCMuSo és a FORESEE két olyan mérföldkő a kutatói életpályámon, amiket büszkén vállalok. Ezzel példát is szeretnék mutatni doktoranduszaimnak és a következő generáció kutatóinak.

## Köszönetnyilvánítás

Köszönöm kollégáimnak, doktoranduszaimnak és hallgatóimnak a sok éves együttgondolkodást és a sok befektetett energiát. Kiemelten hálás vagyok Haszpra Lászlónak (mentoromnak), akinek alaposága, széles körű szakmai tudása iránymutató volt egész munkásságom számára. Köszönöm feleségemnek és gyermekeimnek a türelmet és a sok támogatást a nehéz időszakokban.

Köszönöm kollégáimnak a tapasztalatcserét, az együttgondolkodást, a közös munkát. A következőekben felsorolt hazai kutatóknak kiemelten köszönetet mondok a közös munkáért és az információ áramlásáért: Árendás Tamás, Bartholy Judit, Balázs Bori, Belényesi Márta, Birinyi, Edina, Bónis, Péter, Bottyán Emese, Cseresnyés Imre, Dávid Réka Ágnes, Dencső Márton, Dobor Laura, Farkas Csilla, Filep Tibor, Gelybó Györgyi, Hidy Dóra, Hollós Roland, Horváth Feren, Horváth László, Incze, Dóra, Ittész Péter, Ittész Dóra, Kern Anikó, Kis Anna, Koós Sándor, Kristóf Dániel, Kristóf Erzsébet, Kröel-Dulay Gyögy, Lellei-Kovács Eszter, Marton Tibor András, Mészáros Róbert, Nagy Zoltán, Pacskó Vivien, Pátkai Zsolt, Pásztor László, Pintér Krisztina, Pokovai Klára, Pongrácz Rita, Salma Imre, Sándor Renáta, Solymosi Norbert, Somogyi Zoltán, Szabó Tamás, Szalai Zoltán, Szilágyi István, Takács Tünde, Tóth Eszter, Varga Balázs, Zacháry Dóra, Fodor Nándor. Külföldi kollégák közül kiemelt hálával tartozom a következőknek: Galina Churkina, Alex Vermeulen, Gianni Bellocchi, Steve Running, Peter Thornton, Ken Davis, Hiroaki Kondo, Susumu Yamamoto, Nobuko Saigusa, Tomáš Hlásny, Hrvoje Marjanović, Philippe Ciais, Maša Zorana Ostrogović Sever, Narasinha Shurpali, Thomas Grünwald, Marcel van Oijen, Alex Hardisty, Shaoxiu Ma, Katarína Merganičová, Natascha Kljun, Marek Turčáni, Chuixiang Yi, Tagir Gilmanov, Bruce A. Kimball, Tuula Aalto.

## Irodalomjegyzék

Aubinet, M., Vesala, T., Papale, D., 2012. Eddy covariance: A practical guide to measurement and data analysis. Springer, Dordrecht.

Ács, F., Hantel, M., 1998. The Land-Surface Flux Model PROGSURF. *Global Planetary Change*, 19, 19–34.

Bakwin, P. S., Davis, K. J., Yi, C., Wofsy, S. C., Munger, J. W., Haszpra, L., Barcza, Z., 2004. Regional carbon dioxide fluxes from mixing ratio data. *Tellus B*, 56, 301-311.

Baldocchi, D. D., Falge, E., Gu, L., Olson, R., Hollinger, D., Running, S., Anthoni, P., Bernhofer, Ch., Davis, K., Fuentes, J., Goldstein, A., Katul, G., Law, B., Lee, X., Malhi, Y., Meyers, T., Munger, J. W., Oechel, W., Pilegaard, K., Schmid, H. P., Valentini, R., Verma, S., Vesala, T., Wilson, K., Wofsy, S., 2001. FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor and energy flux densities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82, 2415-2435.

Baldocchi, D.D., 2003. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global Change Biology*, 9, 479-492.

Baldocchi, D.D., 2008. ‘Breathing’ of the Terrestrial Biosphere: Lessons Learned from a Global Network of Carbon Dioxide Flux Measurement Systems. *Australian Journal of Botany*, 56, 1-26.

Baldocchi, D.D., 2020. How eddy covariance flux measurements have contributed to our understanding of Global Change Biology. *Global Change Biology*, 26, 242–260. doi:10.1111/gcb.14807

Balogh, J., Pintér, K., Fóti, S., Cserhalmi, D., Papp, M. and Nagy, Z., 2011. Dependence of soil respiration on soil moisture, clay content, soil organic matter, and CO<sub>2</sub> uptake in dry grasslands. *Soil Biology Biochemistry*, 43, 1006–1013, doi:10.1016/j.soilbio.2011.01.017

Barcza, Z., 2001. Long term atmosphere/biosphere exchange of CO<sub>2</sub> in Hungary. Ph.D. értekezés. Eötvös Loránd Tudományegyetem, Meteorológiai Tanszék, Budapest, 2001. <http://nimbus.elte.hu/~bzoli/thesis/>

Barcza, Z., Haszpra, L., Kondo, H., Saigusa, N., Yamamoto, S. and Bartholy, J., 2003. Carbon exchange of grass in Hungary. *Tellus* 55B, 187-196.

Barcza, Z., Haszpra, L., Hidy, D., Churkina, G., Horváth, L., 2008. Magyarország bioszférikus szén-dioxid mérlegének becslése. “Klíma-21 füzetek”, Klímaváltozás-Hatások-Válaszok, 52, 83-91.

Barcza, Z., Kern, A., Haszpra, L., Kljun, N., 2009a. Spatial representativeness of tall tower eddy covariance measurements using remote sensing and footprint analysis. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, 795-807. doi: 10.1016/j.agrformet.2008.10.021

Barcza, Z., Haszpra, L., Somogyi, Z., Hidy, D., Lovas, K., Churkina, G., Horváth, L., 2009b. Estimation of the biospheric carbon dioxide balance of Hungary using the BIOME-BGC model. *Időjárás – Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service* 113, 203-219.

Barcza, Z., Bondeau, A., Churkina, G., Ciais, Ph., Czóbel, Sz., Gelybó, Gy., Grosz, B., Haszpra, L., Hidy, D., Horváth, L., Machon, A., Pásztor, L., Somogyi, Z., Van Oost, K., 2010. Modeling of biosphere-atmosphere exchange of greenhouse gases — Model based biospheric greenhouse gas balance of Hungary. In: *Atmospheric Greenhouse Gases: The Hungarian Perspective* (Ed.: Haszpra, L.). Springer, Dordrecht - Heidelberg - London - New York, pp. 295-330. ISBN 978-90-481-9949-5, e-ISBN 978-90-481-9950-1, doi: 10.1007/978-90-481-9950-1

Barcza, Z., Kern, A., Davis, K.J., Haszpra, L., 2020. Analysis of the 21-years long carbon dioxide flux dataset from a Central European tall tower site. *Agricultural and Forest Meteorology*, 290, article 108027. doi:10.1016/j.agrformet.2020.108027

Bodesheim, P., Jung, M., Gans, F., Mahecha, M.D., Reichstein, M., 2018. Upscaled diurnal cycles of land-atmosphere fluxes: a new global half-hourly data product. *Earth System Science Data*, 10, 1327–1365. doi:10.5194/essd-10-1327-2018

Bonan, G.B., Levis, S., Kergoat, L., Oleson, K.W., 2002. Landscapes as patches of plant functional types: An integrating concept for climate and ecosystem models. *Global Biogeochemical Cycles*, 16, 1021, doi:10.1029/2000GB001360

Bonan, G., 2015. *Ecological Climatology: Concepts and Applications*. Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9781107339200

Bond-Lamberty, B., 2018. Data Sharing and Scientific Impact in Eddy Covariance Research. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 123, 1440–1443. doi:10.1002/2018JG004502

Cao, M., Prince, S. D., and Shugart, H. H., 2002. Increasing terrestrial carbon uptake from the 1980s to the 1990s with changes in climate and atmospheric CO<sub>2</sub>. *Global Biogeochemical Cycles* 16, 1069, doi:10.1029/2001GB001553.

Chapin, F. S., Woodwell, G. M., Randerson, J. T., Rastetter, E. B., Lovett, G. M., Baldocchi, D. D., Clark, D. A., Harmon, M. E., Schimel, D. S., Valentini, R., Wirth, C., Aber, J. D., Cole, J. J., Goulden, M. L., Harden, J. W., Heimann, M., Howarth, R. W., Matson, P. A., McGuire, A. D., Melillo, J. M., Mooney, H. A., Neff, J. C., Houghton, R. A., Pace, M. L., Ryan, M. G., Running, S. W., Sala, O. E., Schlesinger, W. H., Schulze, E.-D., 2005. Reconciling carbon-cycle concepts, terminology and methods. *Ecosystems*, 9, 1041-1050. doi: 10.1007/s10021-005-0105-7

Churkina, G., Tenhunen, J., Thornton, P., Falge, E. M., Elbers, J. A., Erhard, M., Grunwald, T., Kowalski, A. S. and Sprinz, D., 2003. Analyzing the Ecosystem Carbon Dynamics of Four European Coniferous Forests Using a Biogeochemistry Model. *Ecosystems*, 6, 168-184.

Churkina, G., Brovkin, V., von Bloh, W., Trusilova, K., Jung, M., & Dentener, F., 2009. Synergy of rising nitrogen depositions and atmospheric CO<sub>2</sub> on land carbon uptake

moderately offsets global warming. *Global Biogeochemical Cycles*, 23, 1-12. doi:10.1029/2008GB003291

Churkina, G., Zaehle, S., Hughes, J., Viovy, N., Chen, Y., Jung, M., Heumann, B.W., Ramankutty, N., Heimann, M., Jones, C., 2010. Interactions between nitrogen deposition, land cover conversion, and climate change determine the contemporary carbon balance of Europe. *Biogeosciences*, 7, 2749-2764. doi:10.5194/bg-7-2749-2010

Ciais, P., Reichstein, M., Viovy, N., Granier, A., Ogee, J., Allard, V., Aubinet, M., Buchmann, N., Bernhofer, C., Carrara, A., Chevallier, F., De Noblet, N., Friend, A. D., Friedlingstein, P., Grunwald, T., Heinesch, B., Keronen, P., Knohl, A., Krinner, G., Loustau, D., Manca, G., Matteucci, G., Miglietta, F., Ourcival, J. M., Papale, D., Pilegaard, K., Rambal, S., Seufert, G., Soussana, J.F., Sanz, M.J., Schulze, E.D., Vesala, T., Valentini, R., 2005. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, 437, 529-533.

Ciais, P., Rayner, P., Chevallier, F., Bousquet, P., Logan, M., Peylin, P., Ramonet, M., 2010a. Atmospheric inversions for estimating CO<sub>2</sub> fluxes: methods and perspectives. *Climatic Change*, 103, 69–92. doi:10.1007/s10584-010-9909-3

Ciais, P., Wattenbach, M., Vuichard, N., Smith, P., Piao, S.L., Don, A., Luyssaert, S., Janssens, I., Bondeau, A., Dechow, R., Leip, A., Smith, P., Beer, C., van der Werf, G.R., Gervois, S., Van Oost, K., Tomelleri, E., Freibauer, A., Schulze, E.D., and CARBOEUROPE Synthesis Team., 2010b. The European carbon balance. Part 2: croplands. *Global Change Biology*, 16, 1409-1428. doi: 10.1111/j.1365-2486.2009.02055.x

Ciais, P., Sabine, G., Bala, L., Bopp, V., Brovkin, J., Canadell, A., Chhabra, R., DeFries, J., Galloway, M., Heimann, C., Jones, C., Le Quéré, R.B., Myneni, S., Piao and P. Thornton, 2013. Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Eds.: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. and Midgley, P.M.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Ciais, P., Dolman, A.J., Bombelli, A., Duren, R., Peregon, A., Rayner, P.J., Miller, C., Gobron, N., Kinderman, G., Marland, G., Gruber, N., Chevallier, F., Andres, R.J., Balsamo, G., Bopp, L., Bréon, F.-M., Broquet, G., Dargaville, R., Battin, T.J., Borges, A., Bovensmann, H., Buchwitz, M., Butler, J., Canadell, J.G., Cook, R.B., DeFries, R., Engelen, R., Gurney, K.R., Heinze, C., Heimann, M., Held, A., Henry, M., Law, B., Luyssaert, S., Miller, J., Moriyama, T., Moulin, C., Myneni, R.B., Nussli, C., Obersteiner, M., Ojima, D., Pan, Y., Paris, J.-D., Piao, S.L., Poulter, B., Plummer, S., Quegan, S., Raymond, P., Reichstein, M., Rivier, L., Sabine, C., Schimel, D., Tarasova, O., Valentini, R., Wang, R., van der Werf, G., Wickland, D., Williams, M., Zehner, C., 2014. Current systematic carbon-cycle observations and the need for implementing a policy-relevant carbon observing system. *Biogeosciences*, 11, 3547–3602. doi:10.5194/bg-11-3547-2014

Cox, P.M., 2019. Emergent Constraints on Climate-Carbon Cycle Feedbacks. *Current Climate Change Reports*, 5, 275–281. doi:10.1007/s40641-019-00141-y

Cracknell, A.P., 2001. The exciting and totally unanticipated success of the AVHRR in applications for which it was never intended. *Advances in Space Research*, 28, 233-240.

De Vries, W., Solberg, S., Dobbertin, M., Sterba, H., Laubhann, D., van Oijen, M., Evans, C., Gundersen, P., Kros, J., Wamelink, G.W.W., Reinds, G.J. and Sutton, M.A., 2009. The impact of nitrogen deposition on carbon sequestration by European forests and heathlands. *Forest Ecology and Management*, 258, 1814-1823.

Davis, K. J., Bakwin, P. S., Yi, C., Berger, B. W., Zhao, C., Teclaw, R. M., Isebrands, J. G., 2003. The annual cycles of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O exchange over a northern mixed forest as observed from a very tall tower. *Global Change Biology*, 9, 1278-1293.

Davis, K. J., 2005. Well-calibrated CO<sub>2</sub> mixing ratio measurements at flux towers: The virtual tall towers approach, 12th WMO/IAEA Meeting of Experts on Carbon Dioxide Concentration and Related Tracers Measurement Techniques, Toronto, Canada, 15–18. September 2003, WMO GAW Report no. 161, 101–108.

Dobor, L., Barcza, Z., Hlásny, T., Havasi, Á., Horváth, F., Ittész, P. and Bartholy, J., 2015. Bridging the gap between climate models and impact studies: the FORESEE Database. *Geoscience Data Journal*, 2, 1-11. doi:10.1002/gdj3.22

Dobor, L., Barcza, Z., Hlásny, T., Árendás, T., Spitzkó, T., Fodor, N., 2016. Crop planting date matters: Estimation methods and effect on future yields. *Agricultural and Forest Meteorology*, 223, 103–115. doi:10.1016/j.agrformet.2016.03.023

Falge, E., Baldocchi, D., Olson, R., Anthoni, P., Aubinet, M., Bernhofer, C., Burba, G., Ceulemans, R., Clement, R., Dolman, H., Granier, A., Gross, P., Grünwald, T., Hollinger, D., Jensen, N.-O., Katul, G., Keronen, P., Kowalski, A., Lai, C. T., Law, B. E., Meyers, T., Moncrie, J., Moors, E., Munger, J. W., Pilegaard, K., Rannik, Ü., Rebmann, C., Suyker, A., Tenhunen, J., Tu, K., Verma, S., Vesala, T., Wilson, K., Wofsy, S., 2001. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agricultural and Forest Meteorology* 107, 43-69.

Farkas, Cs., Alberti, G., Balogh, J., Barcza, Z., Birkás, M., Czóbel, Sz., Davis, K. J., Führer, E., Gelybó, Gy., Grosz, B., Kljun, N., Koós, S., Machon, A., Marjanović, H., Nagy Z., Peresotti, A., Pintér, K., Tóth, E., Horváth, L., 2010. Measurements and estimations of biosphere-atmosphere exchange of greenhouse gases — Methodologies. In: *Atmospheric Greenhouse Gases: The Hungarian Perspective* (Ed.: Haszpra, L.). Springer, Dordrecht - Heidelberg - London - New York, pp. 65-90. ISBN 978-90-481-9949-5, e-ISBN 978-90-481-9950-1, doi: 10.1007/978-90-481-9950-1

Fodor, N., 2012. 4Mx talaj-növény modell: alkalmazások, lehetőségek és kihívások. *Agrárinformatika*, 3, 50-60.

Fodor, N., Pásztor, L., Németh, T., 2014. Coupling the 4M crop model with national geo-databases for assessing the effects of climate change on agro-ecological characteristics of Hungary. *International Journal of Digital Earth*, 7, 391-410.

Fodor, N., Pásztor, L., Szabó, B., Laborczi, A., Pokovai, K., Hidy, D., Hollós, R., Kristóf, E., Kis, A., Dobor, L., Kern, A., Grünwald, T., Barcza, Z., 2021. Input database related

uncertainty of Biome-BGCMuSo agro-environmental model outputs. *International Journal of Digital Earth*, 14, 1582–1601. doi:10.1080/17538947.2021.1953161

Friedlingstein, P., Prentice, I.C., 2010. Carbon-climate feedbacks: A review of model and observation based estimates. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2, 251–257. doi:10.1016/j.cosust.2010.06.002

Friedlingstein, P., Meinshausen, M., Arora, V. K., Jones, C. D., Anav, A., Liddicoat, S. K., and Knutti, R., 2014. Uncertainties in CMIP5 Climate Projections due to Carbon Cycle Feedbacks. *Journal of Climate*, 27, 511-526. doi:10.1175/JCLI-D-12-00579.1

Friedlingstein, P., O’Sullivan, M., Jones, M.W., Andrew, R.M., Hauck, J., Olsen, A., Peters, G.P., Peters, W., Pongratz, J., Sitch, S., Le Quéré, C., Canadell, J.G., Ciais, P., Jackson, R.B., Alin, S., Aragão, L.E.O.C., Arneeth, A., Arora, V., Bates, N.R., Becker, M., Benoit-Cattin, A., Bittig, H.C., Bopp, L., Bultan, S., Chandra, N., Chevallier, F., Chini, L.P., Evans, W., Florentie, L., Forster, P.M., Gasser, T., Gehlen, M., Gilfillan, D., Gkritzalis, T., Gregor, L., Gruber, N., Harris, I., Hartung, K., Haverd, V., Houghton, R.A., Ilyina, T., Jain, A.K., Joetzjer, E., Kadono, K., Kato, E., Kitidis, V., Korsbakken, J.I., Landschützer, P., Lefèvre, N., Lenton, A., Lienert, S., Liu, Z., Lombardozzi, D., Marland, G., Metzl, N., Munro, D.R., Nabel, J.E.M.S., Nakaoka, S.I., Niwa, Y., O’Brien, K., Ono, T., Palmer, P.I., Pierrot, D., Poulter, B., Resplandy, L., Robertson, E., Rödenbeck, C., Schwinger, J., Séférian, R., Skjelvan, I., Smith, A.J.P., Sutton, A.J., Tanhua, T., Tans, P.P., Tian, H., Tilbrook, B., Van Der Werf, G., Vuichard, N., Walker, A.P., Wanninkhof, R., Watson, A.J., Willis, D., Wiltshire, A.J., Yuan, W., Yue, X., Zaehle, S., 2020. Global Carbon Budget 2020. *Earth System Science Data*, 12, 3269–3340. doi:10.5194/essd-12-3269-2020

Führer, E., Mátyás, Cs., 2005. A klímaváltozás hatása a hazai erdők szénmegkötő képességére és stabilitására. *Magyar Tudomány*, 50, 837-841.

Geels, C., Gloor, M., Ciais, P., Bousquet, P., Peylin, P., Vermeulen, A. T., Dargaville, R., Aalto, T., Brandt, J., Christensen, J. H., Frohn, L. M., Haszpra, L., Karstens, U., Rdenbeck, C., Ramonet, M., Carboni, G., Santaguida, R., 2007. Comparing atmospheric transport models for future regional inversions over Europe - Part 1: mapping the CO<sub>2</sub> atmospheric signals. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7, 3461-3479.

Gelybó, Gy., Barcza, Z., Kern, A., Kljun, N., 2013. Effect of spatial heterogeneity on the validation of remote sensing based GPP estimations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 174-175, 43-53. doi: 10.1016/j.agrformet.2013.02.003

Gelybó, Gy., Barcza, Z., Dencső, M., Potyó, I., Kása, I., Horel, Á., Pokovai, K., Birkás, M., Kern, A., Hollós, R., Tóth, E., 2022. Effect of tillage and crop type on soil respiration in a long-term field experiment on chernozem soil under temperate climate. *Soil and Tillage Research*, 216, 105239. doi:10.1016/j.still.2021.105239

Gervois, S., Ciais, P., de Noblet-Ducoudré, N., Brisson, N., Vuichard, N. and Viovy, N., 2008. Carbon and water balance of European croplands throughout the 20th century. *Global Biogeochemical Cycles*, 22, GB2022, doi:10.1029/2007GB003018

Gilmanov, T.G., Soussana, J.F., Aires, L., Allard, V., Ammann, C., Balzarolo, M., Barcza, Z., Bernhofer, C., Campbell, C. L., Cernusca, A., Cescatti, A., Clifton-Brown, J., Dirks, B.O.M.,



Dore, S., Eugster, W., Fuhrer, J., Gimeno, C., Gruenwald, T., Haszpra, L., Hensen, A., Ibrom, A., Jacobs, A.F.G., Jones, M.B., Lanigan, G., Laurila, T., Lohila, A., Manca, G., Marcolla, B., Nagy, Z., Pilegaard, K., Pintér, K., Pio, C., Raschi, A., Rogiers, N., Sanz, M. J., Stefani, P., Sutton, M., Tuba, Z., Valentini, R., Williams, M.L., Wohlfahrt, G., 2007. Partitioning European grassland net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange into gross primary productivity and ecosystem respiration using light response function analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 121/1-2, 93-120. doi: doi:10.1016/j.agee.2006.12.008

Gilmanov, T.G., Aires, L., Barcza, Z., Baron, V.S., Belelli, L., Beringer, J., Billesbach, D., Bonal, D., Bradford, J., Ceschia, E., Cook, D., Corradi, C., Frank, A., Gianelle, D., Gimeno, C., Gruenwald, T., Guo, H., Hanan, N., Haszpra, L., Heilman, J., Jacobs, A., Jones, M.B., Johnson, D.A., Kiely, G., Li, S., Magliulo, V., Moors, E., Nagy, Z., Nasyrov, M., Owensby, C., Pinter, K., Pio, C., Reichstein, M., Sanz, M.J., Scott, R., Soussana, J.F., Stoy, P.C., Svejcar, T., Tuba, Z. and Zhou, G., 2010. Productivity, respiration, and light-response parameters of world grassland and agroecosystems derived from flux-tower measurements. *Rangeland Ecology and Management*, 63, 16-39. doi: 10.2111/REM-D-09-00072.1

Global Carbon Project, 2020. Carbon budget and trends 2020. Published on 11 December 2020, along with any other original peer-reviewed papers and data sources as appropriate. <http://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget>

Goudriaan, J., Groot, J. J. R., Uithol, P. W. J., 2001. Productivity of agro-ecosystems. In: *Terrestrial Global Productivity* (eds.: Roy, J., Saugier, B., Mooney, H. A.). Academic Press, San Diego.

Göckede, M., Rebmann, C., Foken, T., 2004. A combination of quality assessment tools for eddy covariance measurements with footprint modelling for the characterisation of complex sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 127, 175-188.

Göckede, M., Foken, T., Aubinet, M., Aurela, M., Banza, J., Bernhofer, C., Bonnefond, J. M., Brunet, Y., Carrara, A., Clement, R., Dellwik, E., Elbers, J., Eugster, W., Fuhrer, J., Granier, A., Grünwald, T., Heinesch, B., Janssens, I. A., Knohl, A., Koeble, R., Laurila, T., Longdoz, B., Manca, G., Marek, M., Markkanen, T., Mateus, J., Matteucci, G., Mauder, M., Migliavacca, M., Minerbi, S., Moncrieff, J., Montagnani, L., Moors, E., Ourcival, J.-M., Papale, D., Pereira, J., Pilegaard, K., Pita, G., Rambal, S., Rebmann, C., Rodrigues, A., Rotenberg, E., Sanz, M. J., Sedlak, P., Seufert, G., Siebicke, L., Soussana, J. F., Valentini, R., Vesala, T., Verbeeck, H., Yakir, D., 2008. Quality control of CarboEurope flux data – Part 1: Coupling footprint analyses with flux data quality assessment to evaluate sites in forest ecosystem. *Biogeosciences*, 5, 433-450.

Grosz, B., Gelybó, Gy., Churkina, G., Haszpra, L., Hidy, D., Horváth, L., Kern, A., Kljun, N., Machon, A., Pásztor, L., Barcza, Z., 2010. Modeling of biosphere-atmosphere exchange of greenhouse gases — Arable lands. In: *Atmospheric Greenhouse Gases: The Hungarian Perspective* (Ed.: Haszpra, L.). Springer, Dordrecht - Heidelberg - London - New York, pp. 263-293. ISBN 978-90-481-9949-5, e-ISBN 978-90-481-9950-1, doi: 10.1007/978-90-481-9950-1

Hardisty, A.R., Bacall, F., Beard, N., Balcázar-Vargas, M.-P., Balech, B., Barcza, Z., Bourlat, S.J., De Giovanni, R., de Jong, Y., De Leo, F., Dobor, L., Donvito, G., Fellows, D., Guerra, A.F., Ferreira, N., Fetyukova, Y., Fosso, B., Giddy, J., Goble, C., Güntsch, A., Haines, R.,

Ernst, V.H., Hettling, H., Hidy, D., Horváth, F., Ittész, D., Ittész, P., Jones, A., Kottmann, R., Kulawik, R., Leidenberger, S., Lyytikäinen-Saarenmaa, P., Mathew, C., Morrison, N., Nenadic, A., de la Hidalgo, A.N., Obst, M., Oostermeijer, G., Paymal, E., Pesole, G., Pinto, S., Poigné, A., Fernandez, F.Q., Santamaria, M., Saarenmaa, H., Sipos, G., Sylla, K.-H., Tähtinen, M., Vicario, S., Vos, R.A., Williams, A.R., Yilmaz, P., 2016. BioVeL: a virtual laboratory for data analysis and modelling in biodiversity science and ecology. *BMC Ecology*, 16, 49. doi:10.1186/s12898-016-0103-y.

Haszpra, L., 1999. Measurement of atmospheric carbon dioxide at a low elevation rural site in Central Europe. *Időjárás*, 103, 93-106.

Haszpra, L., 2005. Magyarországi felszíni és magas mérőtornyos légköri szén-dioxid mérések. MTA doktori értekezés, Budapest. pp. 125.

Haszpra, L., Barcza, Z., Bakwin, P. S., Berger, B. W., Davis, K. J., and Weidinger, T., 2001. Measuring system for the long-term monitoring of biosphere/atmosphere exchange of carbon dioxide. *Journal of Geophysical Research*, 106D, 3057-3070.

Haszpra, L. és Barcza, Z., 2005. A magyarországi légköri szén-dioxid mérések szerepe az éghajlati modellek megalapozásában. "Agro-21" füzetek, Klímaváltozás-Hatások-Válaszok. 38, 13-26.

Haszpra, L., Barcza, Z., Davis, K. J., Tarczay, K., 2005. Long-term tall tower carbon dioxide flux monitoring over an area of mixed vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 132, 58-77. doi:10.1016/j.agrformet.2005.07.002

Haszpra, L., Barcza, Z., Hidy, D., Szilágyi, I., Dlugokencky, E., Tans, P., 2008. Trends and temporal variations of major greenhouse gases at a rural site in Central Europe. *Atmospheric Environment* 42, 8707-8716. doi: 10.1016/j.atmosenv.2008.09.012

Haszpra, L., and Barcza, Z., 2010. Climate variability as reflected in a regional atmospheric CO<sub>2</sub> record. *Tellus B*, 62, 417-426. doi: 10.1111/j.1600-0889.2010.00505.x

Haszpra, L. (ed), 2010. *Atmospheric Greenhouse Gases: The Hungarian Perspective*. Springer, Dordrecht - Heidelberg - London - New York, pp 393. doi:10.1007/978-90-481-9950-1

Haszpra, L., Barcza, Z., Haszpra, T., Pátkai, Zs., and Davis, K. J., 2015. How well do tall-tower measurements characterize the CO<sub>2</sub> mole fraction distribution in the planetary boundary layer? *Atmospheric Measurement Techniques*, 8, 1657-1671, doi:10.5194/amt-8-1657-2015

Haszpra, L., Hidy, D., Taligás, T., Barcza, Z., 2018. First results of tall tower based nitrous oxide flux monitoring over an agricultural region in Central Europe. *Atmospheric Environment*, 176, 240–251. doi:10.1016/j.atmosenv.2017.12.035

Haszpra, L., Ferenczi, Z. Barcza, Z., 2019. Estimation of greenhouse gas emission factors based on observed covariance of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O and CO mole fractions. *Environmental Sciences Europe*, 31, 95. doi:10.1186/s12302-019-0277-y

Heinsch, F.A., Zhao, M., Running, S.W., Kimball, J.S., Neman, R.R., Davis, K.J., Bolstad, P.V., Cook, B.D., Desai, A.R., Ricciuto, D.M., Law, B.E., Oechel, W.C., Kwon, H., Luo, H., Wofsy, S.C., Dunn, A.L., Munger, J.W., Baldocchi, D.D., Xu, L., Hollinger, D.Y., Richardson, A.D., Stoy, P.C., Siqueira, M.B.S., Monson, R.K., Burns, S.P., Flanagan, L.B., 2006. Evaluation of Remote Sensing Based Terrestrial Productivity From MODIS Using Regional Tower Eddy Flux Network Observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44, 1908–1924. doi:10.1109/TGRS.2005.853936

Hidy, D., 2006. A BIOME-BGC modell alkalmazása fűállomány szénháztartásának szimulálására. Diplomamunka. ELTE Meteorológiai Tanszék. pp 51. Témavezető: dr. Barcza Zoltán, Dr. Haszpra László.

Hidy, D., Barcza, Z., Haszpra, L., Churkina, G., Trusilova, K., 2007. Parameter estimation for grassland carbon cycle using nonlinear inversion of Biome-BGC. *Cereal Research Communications*, 35, 453-456. doi: 10.1556/CRC.35.2007.2.72

Hidy, D., Haszpra, L., Barcza, Z., Vermeulen, A., Tuba, Z. and Nagy, Z., 2009. Modelling of carbon isotope discrimination by vegetation. *Photosynthetica* 47, 457-470. doi: 10.1007/s11099-009-0070-z

Hidy, D., Machon, A., Haszpra, L., Nagy, Z., Pintér, K., Churkina, G., Grosz, B., Horváth L., Barcza, Z., 2010. Modeling of biosphere-atmosphere exchange of greenhouse gases — Grasslands. In: *Atmospheric Greenhouse Gases: The Hungarian Perspective* (Ed.: Haszpra, L.). Springer, Dordrecht - Heidelberg - London - New York, pp. 229-251. ISBN 978-90-481-9949-5, e-ISBN 978-90-481-9950-1, doi: 10.1007/978-90-481-9950-1

Hidy, D., Barcza, Z., Haszpra, L., Churkina, G., Pintér, K., Nagy, Z., 2012. Development of the Biome-BGC model for simulation of managed herbaceous ecosystems. *Ecological Modelling*, 226, 99-119. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2011.11.008

Hidy, D., Barcza, Z., Marjanović, H., Ostrogović Sever, M. Z., Dobor, L., Gelybó, G., Fodor, N., Pintér, K., Churkina, G., Running, S., Thornton, P., Bellocchi, G., Haszpra, L., Horváth, F., Suyker, A., Nagy, Z., 2016. Terrestrial Ecosystem Process Model Biome-BGCMuSo v4.0: Summary of improvements and new modeling possibilities. *Geoscientific Model Development*, 9, 4405-4437. doi:10.5194/gmd-9-4405-2016

Hidy, D., Barcza, Z., Hollós, R., Thornton, P., Running, S.W., Fodor, N., 2021. User's Guide for Biome-BGC MuSo 6.1. [http://nimbus.elte.hu/bbgc/files/Manual\\_BBGC\\_MuSo\\_v6.1.pdf](http://nimbus.elte.hu/bbgc/files/Manual_BBGC_MuSo_v6.1.pdf)

Hlásny, T., Barcza, Z., Fabrika, M., Balázs, B., Churkina, G., Pajtík, J., Sedmák, R., Turčáni, M., 2011. Climate change impacts on growth and carbon balance of forests in Central Europe. *Climate Research*, 47, 219-246. doi:10.3354/cr01024

Hlásny, T., Barcza, Z., Barka, I., Merganičová, K., Sedmák, R., Kern, A., Pajtík, J., Balázs, B., Fabrika, M., Churkina, G., 2014. Future carbon cycle in mountain spruce forests of Central Europe: Modelling framework and ecological inferences. *Forest Ecology and Management*, 328, 55-68. doi:10.1016/j.foreco.2014.04.038

Hlásny, T., Trombik, J., Dobor, L., Barcza, Z., Barka, I., 2016. Future climate of the Carpathians: climate change hot-spots and implications for ecosystems. *Regional Environmental Change*, 16, 1495-1506. doi:10.1007/s10113-015-0890-2

Högberg, P., 2012. What is the quantitative relation between nitrogen deposition and forest carbon sequestration? *Global Change Biology*, 18, 1-2. doi: 10.1111/j.1365-2486.2011.02553.x

Huntzinger, D.N., Michalak, A.M., Schwalm, C., Ciais, P., King, A.W., Fang, Y., Schaefer, K., Wei, Y., Cook, R.B., Fisher, J.B., Hayes, D., Huang, M., Ito, A., Jain, A.K., Lei, H., Lu, C., Maignan, F., Mao, J., Parazoo, N., Peng, S., Poulter, B., Ricciuto, D., Shi, X., Tian, H., Wang, W., Zeng, N., Zhao, F., 2017. Uncertainty in the response of terrestrial carbon sink to environmental drivers undermines carbon-climate feedback predictions. *Scientific Reports*, 7, 4765.

IPCC, 1996. *Climate change 1995: The science of climate change. Contribution of working group I to the second assessment report of the intergovernmental panel on climate change* (Eds.: Houghton J.T., Meira Filho L.G., Callander B.A., Harris N., Kattenberg A., Maskell K.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY

IPCC, 2019. *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley (eds.)].

IPCC, 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press.

Janssens, I. A., Freibauer, A., Schlamadinger, B., Ceulemans, R., Ciais, P., Dolman, A. J., Heimann, H., Nabuurs, G.-J., Smith, P., Valentini, R. and Schulze, E.-D., 2005. The carbon budget of terrestrial ecosystems at country-scale - a European case study. *Biogeosciences*, 2, 15-26.

Jung, M., Reichstein, M., Margolis, H.A., Cescatti, A., Richardson, A.D., Arain, M.A., Arneth, A., Bernhofer, C., Bonal, D., Chen, J., Gianelle, D., Gobron, N., Kiely, G., Kutsch, W., Lasslop, G., Law, B.E., Lindroth, A., Merbold, L., Montagnani, L., Moors, E.J., Papale, D., Sottocornola, M., Vaccari, F., Williams, C., 2011. Global patterns of land-atmosphere fluxes of carbon dioxide, latent heat, and sensible heat derived from eddy covariance, satellite, and meteorological observations. *Journal of Geophysical Research, Biogeosciences*, 116, G00J07. doi:10.1029/2010JG001566.

Jung, M., Schwalm, C., Migliavacca, M., Walther, S., Camps-Valls, G., Koirala, S., Anthoni, P., Besnard, S., Bodesheim, P., Carvalhais, N., Chevallier, F., Gans, F., Goll, D.S., Haverd, V., Köhler, P., Ichii, K., Jain, A.K., Liu, J., Lombardozzi, D., Nabel, J.E.M.S., Nelson, J.A., O'Sullivan, M., Pallandt, M., Papale, D., Peters, W., Pongratz, J., Rödenbeck, C., Sitch, S.,

Tramontana, G., Walker, A., Weber, U., Reichstein, M., 2020. Scaling carbon fluxes from eddy covariance sites to globe: synthesis and evaluation of the FLUXCOM approach. *Biogeosciences*, 17, 1343–1365. doi:10.5194/bg-17-1343-2020

Keenan, T.F., Carbone, M.S., Reichstein, M., Richardson, A.D., 2011. The model-data fusion pitfall: assuming certainty in an uncertain world. *Oecologia* 167, 587-597. doi:10.1007/s00442-011-2106-x

Kern, A., Marjanović, H., Dobor, L., Anić, M., Hlásny, T., Barcza, Z., 2017. Identification of Years with Extreme Vegetation State in Central Europe Based on Remote Sensing and Meteorological Data. *South-east European Forestry (SEEFOR)*, 8, 1-20. doi:10.15177/seefor.17-05

Kern, A., Barcza, Z., Marjanović, H., Árendás, T., Fodor, N., Bónis, P., Bognár, P., Lichtenberger, J., 2018. Statistical modelling of crop yield in Central Europe using climate data and remote sensing vegetation indices. *Agricultural and Forest Meteorology*, 260-261, 300-320. doi:10.1016/j.agrformet.2018.06.009

Kern, A., Dobor, L., Horváth, F., Hollós, R., Márta, G., Barcza, Z., 2019. FORESEE: egy publikus meteorológiai adatbázis a Kárpát-medence tágabb térségére (extended abstract). *Az elmélet és a gyakorlat találkozása a térinformatikában. Szerk.: Molnár Vanda Éva, ISBN: 978-963-318-054-9., Debrecen Egyetemi Kiadó, 2019. X. Térinformatikai Konferencia és Szakkiállítás. Debrecen, 2019. május 23-24. 131-138 p.*

Kljun, N., Calanca, P., Rotach, M. W., Schmid, H. P., 2004. A simple parameterisation for flux footprint predictions. *Boundary-Layer Meteorology*, 112, 503-523.

Knorr, W. and Kattge, J., 2005. Inversion of terrestrial ecosystem model parameter values against eddy covariance measurements by Monte Carlo sampling. *Global Change Biology*, 11, 1333–1351.

Kreybig, L., 1937. The survey, analytical and mapping method of the Hungarian Royal Institute of Geology (in Hungarian and German). *Magyar Királyi Földtani Intézet Évkönyve*, 31, 147-244.

Lacis, A.A., Schmidt, G.A., Rind, D., Ruedy, R.A., 2010. Atmospheric CO<sub>2</sub>: Principal control knob governing earth's temperature. *Science*, 330, 356–359. doi:10.1126/science.1190653

Leakey, A.D.B., Ainsworth, E.A, Bernacchi, C.J., Rogers, A., Long, S.P., Ort, D.R., 2009. Elevated CO<sub>2</sub> effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: six important lessons from FACE. *Journal of Experimental Botany*, 60, 2859-76. doi:10.1093/jxb/erp096

Lellei-Kovács, E., Botta-Dukát, Z., de Dato, G., Estiarte, M., Guidolotti, G., Kopittke, G.R., Kovács-Láng, E., Kröel-Dulay, G., Larsen, K.S., Peñuelas, J., Smith, A.R., Sowerby, A., Tietema, A., Schmidt, I.K., 2016. Temperature Dependence of Soil Respiration Modulated by Thresholds in Soil Water Availability Across European Shrubland Ecosystems. *Ecosystems*, 19, 1460–1477. doi:10.1007/s10021-016-0016-9

Lenton, T.M., Williamson, M.S., Edwards, N.R., Marsh, R., Price, A.R., Ridgwell, A.J., Shepherd, J.G., Cox, S.J., 2006. Millennial timescale carbon cycle and climate change in an

efficient Earth system model. *Climate Dynamics*, 26, 687–711. doi:10.1007/s00382-006-0109-9

Leuzinger, S., Luo, Y., Beier, C., Dieleman, W., Vicca, S., Körner, C., 2011. Do global change experiments overestimate impacts on terrestrial ecosystems? *Trends in Ecology and Evolution*, 26, 236–241. doi:10.1016/j.tree.2011.02.011

Magnani, F., Mencuccini, M., Borghetti, M., Berbigier, P., Berninger, F., Delzon, S., Grelle, A., Hari, P., Jarvis, P.G., Kolari, P., Kowalski, A.S., Lankreijer, H., Law, B.E., Lindroth, A., Loustau, D., Manca, G., Moncrieff, J.B., Rayment, M., Tedeschi, V., Valentini, R., Grace, J., 2007. The human footprint in the carbon cycle of temperate and boreal forests. *Nature* 447, 848-850.

Martre, P., Wallach, D., Asseng, S., Ewert, F., Jones, J.W., Rotter, R.P., Boote, K.J., Ruane, A.C., Thorburn, P.J., Cammarano, D., Hatfield, J.L., Rosenzweig, C., Aggarwal, P.K., Angulo, C., Basso, B., Bertuzzi, P., Biernath, C., Brisson, N., Challinor, A.J., Doltra, J., Gayler, S., Goldberg, R., Grant, R.F., Heng, L., Hooker, J., Hunt, L.A., Ingwersen, J., Izaurrealde, R.C., Kersebaum, K.C., Müller, C., Kumar, S.N., Nendel, C., O’leary, G., Olesen, J.E., Osborne, T.M., Palosuo, T., Priesack, E., Ripoche, D., Semenov, M.A., Shcherback, I., Steduto, P., Stöckle, C.O., Stratonovitch, P., Streck, T., Supit, I., Tao, F., Travasso, M., Waha, K., White, J.W., Wolf, J., 2015. Multimodel ensembles of wheat growth: many models are better than one. *Global Change Biology*, 21, 911-925. doi:10.1111/gcb.12768

Maslin, M., Austin, P., 2012. Climate models at their limit? *Nature*, 486, 183-184.

Mészáros E. (szerk.), 2021. Légkör-bioszféra kölcsönhatások. Akadémiai Kiadó, Budapest.

Millennium Ecosystem Assessment, 2005. *Ecosystems and Human Well-being: General Synthesis*. Island Press, Washington, DC

Nagy, Z., Pintér, K., Czóbel, Sz., Balogh, J., Horváth, L., Fóti, Sz., Barcza, Z., Weidinger, T., Csintalan, Zs., Dinh, N.Q., Grosz, B. and Tuba, Z., 2007. The carbon budget of semi-arid grassland in a wet and a dry year in Hungary. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 121/1-2, 21-29. doi:10.1016/j.agee.2006.12.003

Nagy, Z., Barcza, Z., Horváth, L., Balogh, J., Hagyó, A., Káposztás, N., Grosz, B., Machon, A., Pintér, K., 2010. Measurements and estimations of biosphere-atmosphere exchange of greenhouse gases — Grasslands. In: *Atmospheric Greenhouse Gases: The Hungarian Perspective* (Ed.: Haszpra, L.). Springer, Dordrecht - Heidelberg - London - New York, pp. 91-119. ISBN 978-90-481-9949-5, e-ISBN 978-90-481-9950-1, doi: 10.1007/978-90-481-9950-1

National Inventory Submission of Hungary, 2008. Inventory Year 1985-2006. Hungarian Meteorological Service, Budapest, Hungary. April 2008.  
[http://unfccc.int/national\\_reports/annex\\_i\\_ghg\\_inventories/national\\_inventories\\_submissions/items/4303.php](http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/4303.php)

Norby, R.J., Delucia, E.H., Gielen, B., Calfapietra, C., Giardina, C.P., King, J.S., Ledford, J., McCarthy, H.R., Moore, D.J.P., Ceulemans, R., De Angelis, P., Finzi, A.C., Karnosky, D.F., Kubiske, M.E., Lukac, M., Pregitzer, K.S., Scarascia-Mugnozza, G.E., Schlesinger, W.H.,

Oren, R., 2005. Forest response to elevated CO<sub>2</sub> is conserved across a broad range of productivity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102, 18052-18056. doi:10.1073/pnas.0509478102

Ostrogović Sever, M.Z.O., Barcza, Z., Hidy, D., Kern, A., Dimoski, D., Miko, S., Hasan, O., Grahovac, B., Marjanović, H., 2021. Evaluation of the Terrestrial Ecosystem Model Biome-BGCMuSo for Modelling Soil Organic Carbon under Different Land Uses. *Land*, 10, 968. doi:10.3390/land10090968

Papale, D., Valentini, R., 2003. A new assessment of European forests carbon exchanges by eddy fluxes and artificial neural network spatialization. *Global Change Biology*, 9, 525–535.

Pásztor, L., Szabó, J., Bakacsi, Zs., 2010. Digital processing and upgrading of legacy data collected during the 1:25 000 scale Kreybig soil survey. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*, 45, 127-136.

Piao, S., Sitch, S., Ciais, P., Friedlingstein, P., Peylin, P., Wang, X., Ahlström, A., Anav, A., Canadell, J.G., Cong, N., Huntingford, C., Jung, M., Levis, S., Levy, P.E., Li, J., Lin, X., Lomas, M.R., Lu, M., Luo, Y., Ma, Y., Myneni, R.B., Poulter, B., Sun, Z., Wang, T., Viogy, N., Zaehle, S. and Zeng, N., 2013. Evaluation of terrestrial carbon cycle models for their response to climate variability and to CO<sub>2</sub> trends. *Global Change Biology*, 19, 2117-2132. doi:10.1111/gcb.12187

Pintér, K., 2009. Fátlan természetes vegetáció szénmérlegének meghatározása eddy-kovariancia módszerrel éves skálán. PhD értekezés, Szent István Egyetem, Gödöllő, pp86.

Reichstein, M., Falge, E., Baldocchi, D., Papale, D., Aubinet, M., Berbigier, P., Bernhofer, C., Buchmann, N., Gilmanov, T., Granier, A., Grunwald, T., Havrankova, K., Ilvesniemi, H., Janous, D., Knohl, A., Laurila, T., Lohila, A., Loustau, D., Matteucci, G., Meyers, T., Miglietta, F., Ourcival, J., Pumpan, M., 2005. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. *Global Change Biology*, 11, 1424–1439. doi:10.1111/j.1365-2486.2005.001002.x

Running, S. W. and Coughlan, J. C., 1988. A general model of forest ecosystem processes for regional applications I. Hydrological balance, canopy gas exchange and primary production processes. *Ecological Modelling* 42, 125-154.

Running, S. W. and Gower, S. T., 1991. Forest-BGC, A general model of forest ecosystem processes for regional applications II. Dynamic carbon allocation and nitrogen budgets. *Tree Physiology*, 9, 147-160.

Running, S. W. and Hunt, E. R. J., 1993. Generalization of a forest ecosystem process model for other biomes, Biome-BGC, and an application for global-scale models. In: *Scaling physiological processes: leaf to globe* (Eds.: Ehleringer, J. R., Field, C. B.). San Diego (CA): Academic Press. pp. 141-158.

Running, S.W., Nemani, R.R., Heinsch, F.A., Zhao, M., Reeves, M., Hashimoto, H., 2004. A Continuous Satellite-Derived Measure of Global Terrestrial Primary Production. *Bioscience*, 54, 547–560. doi:10.1641/0006-3568(2004)054[0547:ACSMOG]2.0.CO;2

Salma, I., Thén, W., Aalto, P., Kerminen, V.-M., Kern, A., Barcza, Z., Petäjä, T., Kulmala, M., 2021. Influence of vegetation on occurrence and time distributions of regional new aerosol particle formation and growth. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21, 2861–2880. doi:10.5194/acp-21-2861-2021

Sándor, R., Barcza, Z., Hidy, D., Lellei-Kovács, E., Ma, S. and Bellocchi, G., 2016. Modelling of grassland fluxes in Europe: evaluation of two biogeochemical models. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 215, 1–19, doi:10.1016/j.agee.2015.09.001, 2016.

Sándor, R., Barcza, Z., Acutis, M., Doro, L., Hidy, D., Köchy, M., Minet, J., Lellei-Kovács, E., Ma, S., Perego, A., Rolinski, S., Ruget, F., Sanna, M., Seddaiu, G., Wu, L., Bellocchi, G., 2017. Multi-model simulation of soil temperature, soil water content and biomass in Euro-Mediterranean grasslands: Uncertainties and ensemble performance. *European Journal of Agronomy*, 88, 22–40. doi:10.1016/j.eja.2016.06.006

Schmid, H.P., 1994. Source areas for scalars and scalar fluxes. *Boundary-Layer Meteorology*, 67, 293-318.

Schmid, H.P., 1997. Experimental design for flux measurements: matching scales of observations and fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 87, 179-200.

Schmid, H. P., 2002. Footprint modeling for vegetation atmosphere exchange studies: A review and perspective. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113, 159-184.

Schulze, E. D., Luysaert, S., Ciais, P., Freibauer, A., Janssens, I. A., Soussana, J. F., Smith, P., Grace, J., Levin, I., Thiruchittampalam, B., Heimann, M., Dolman, A. J., Valentini, R., Bousquet, P., Peylin, P., Peters, W., Rödenbeck, C., Etiope, G., Vuichard, N., Wattenbach, M., Nabuurs, G. J., Poussi, Z., Nieschulze, J., Gash, J. H., CarboEurope Team, 2009. Importance of methane and nitrous oxide for Europe's terrestrial greenhouse-gas balance. *Nature Geoscience*, 2, 842-850. doi: 10.1038/ngeo686

Schwalm, C.R., Schaefer, K., Fisher, J.B., Huntzinger, D., Elshorbany, Y., Fang, Y., Hayes, D., Jafarov, E., Michalak, A.M., Piper, M., Stofferahn, E., Wang, K., Wei, Y., 2019. Divergence in land surface modeling: linking spread to structure. *Environmental Research Communications*, 1, 111004. doi:10.1088/2515-7620/ab4a8a

Shevliakova, E., Stouffer, R.J., Malyshev, S., Krasting, J.P., Hurtt, G.C., Pacala, S.W., 2013. Historical warming reduced due to enhanced land carbon uptake. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110, 16730-5. doi: 10.1073/pnas

Sitch, S., Friedlingstein, P., Gruber, N., Jones, S. D., Murray-Tortarolo, G., Ahlström, A., Doney, S. C., Graven, H., Heinze, C., Huntingford, C., Levis, S., Levy, P. E., Lomas, M., Poulter, B., Viovy, N., Zaehle, S., Zeng, N., Arneth, A., Bonan, G., Bopp, L., Canadell, J. G., Chevallier, F., Ciais, P., Ellis, R., Gloor, M., Peylin, P., Piao, S. L., Le Quéré, C., Smith, B., Zhu, Z., and Myneni, R., 2012. Recent trends and drivers of regional sources and sinks of carbon dioxide. *Biogeosciences*, 12, 653–679. doi:10.5194/bg-12-653-2015

Soden, B., Held, I., 2006. An Assessment of Climate Feedbacks in Coupled Ocean–Atmosphere Models. *Journal of Climate*, 19, 3354–3360.



Somogyi, Z., 2008. A hazai erdők üvegház hatású gáz leltára az IPCC módszertana szerint (Greenhouse gas inventory of forests in Hungary using the IPCC methodology). *Erdészeti Kutatások*, 92, 145-162.

Szabó, G., Pásztor, L., Heuvelink, G.B.M., 2021. Estimating soil organic carbon stock change at multiple scales using machine learning and multivariate geostatistics. *Geoderma*, 403, 115356. doi:10.1016/j.geoderma.2021.115356

Tanács, E., Belényesi, M., Lehoczki, R., Pataki, R., Petrik, O., Standovár, T., Pásztor, L., Laborczi, A., Szabó, G., Molnár, Zs., Bede-Fazekas, Á., Kisné Fodor, L., Varga, I., Zsembery, Z., Maucha, G., 2019. Országos, nagyfelbontású ökoszisztéma-alaptérkép: módszertan, validáció és felhasználási lehetőségek. *Természetvédelmi Közlemények*, 25, 34–58. doi:10.20332/tvk-jnatconserv.2019.25.34

Tans, P., 2009. An Accounting of the Observed Increase in Oceanic and Atmospheric CO<sub>2</sub> and the Outlook for the Future. *Oceanography*, 22, 26-35.

Terrer, C., Vicca, S., Hungate, B.A., Phillips, R.P., Prentice, I.C., 2016. Mycorrhizal association as a primary control of the CO<sub>2</sub> fertilization effect. *Science*, 353, 72-74. doi:10.1126/science.aaf4610

Thornton, P. E., 1998. Regional ecosystem simulation: Combining surface- and satellite-based observations to study linkages between terrestrial energy and mass budgets. The University of Montana, 1998.

Thornton, P.E., Law, B.E., Gholz, H.L., Clark, K.L., Falge, E., Ellsworth, D.S., Goldstein, A.H., Monson, R.K., Hollinger, D., Falk, M., Chen, J., Sparks, J.P., 2002. Modeling and measuring the effects of disturbance history and climate on carbon and water budgets in evergreen needleleaf forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113, 185-222.

Thornton, P. E. and Rosenbloom, N. A., 2005. Ecosystem model spin-up: Estimating steady state conditions in a coupled terrestrial carbon and nitrogen cycle model, *Ecological Modelling*, 189, 25–48, doi:10.1016/j.ecolmodel.2005.04.008, 2005.

Tóth, E., Barcza, Z., Birkás, M., Gelybó, Gy., Zsembeli, J., Bottlik, L., Davis, K. J., Haszpra, L., Kern, A., Kljun, N., Koós, S., Kovács, Gy., Stingli, A., Farkas, Cs., 2010: Measurements and estimations of biosphere-atmosphere exchange of greenhouse gases — Arable lands. In: *Atmospheric Greenhouse Gases: The Hungarian Perspective* (Ed.: Haszpra, L.). Springer, Dordrecht - Heidelberg - London - New York, pp. 157-197. ISBN 978-90-481-9949-5, e-ISBN 978-90-481-9950-1, doi: 10.1007/978-90-481-9950-1

Tuba, Z., Csintalan, Z., Sente, K., Nagy, Z., Fekete, G., Larcher, W., Lichtenthaler, H.K., 2008. Winter photosynthetic activity of twenty temperate semi-desert sand grassland species. *Journal of Plant Physiology*, 165, 1438–1454. doi:10.1016/j.jplph.2007.10.017

Van Oost, K., Cerdan, O., Quine, T. A., 2009. Accelerated sediment fluxes by water and tillage erosion on European agricultural land. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12, 1625-1634. doi: 10.1002/esp.1852

Vermeulen, A. (editor), Pieterse, G., Hensen, A., Schmidt, M., Ramonet, M., Messenger, C., Jourde-Heuil, L., Manning, A., Gloor, M., Jordan, A., Popa, E., Thompson, R., Kozlova, E., Moors, E., Elbers, J., Jans, W., ter Maat, H., Moncrieff, J., Conen, F., Haszpra, L., Barcza, Z., Szilágyi, I., Stefani, P., Miglietta, F., Lindroth, A., 2007. CHIOTTO Final Report. European Union Contract N° EVK2-CT-2002-00163. ECN Report, ECN-E-07-052.

Vetter, M. Churkina, G., Jung, M., Reichstein, M., Zaehle, S., Bondeau, A., Chen, Y., Ciais, P., Feser, F., Freibauer, A., Geyer, R., Jones, C., Papale, D., Tenhunen, J., Tomelleri, E., Trusilova, K., Viovy, N. and Heimann, M., 2008. Analyzing the causes and spatial pattern of the European 2003 carbon flux anomaly in Europe using seven models. *Biogeosciences*, 5, 561–583. doi:10.5194/bg-5-561-2008

Vuichard, N., Ciais, P., Viovy, N., Calanca, P., Soussana, J. F., 2007. Estimating the greenhouse gas fluxes of European grasslands with a process-based model: 2. Simulations at the continental level. *Global Biogeochem. Cycles*, 21, GB1005. doi: 10.1029/2005GB002612.

Wang, Y.-P., Trudinger, C. M., Enting, I. G., 2009. A review of applications of model–data fusion to studies of terrestrial carbon fluxes at different scales. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, 1829-1842. doi:10.1016/j.agrformet.2009.07.009

White, M.A., Thornton, P.E., Running, S.W., Nemani, R.R., 2000. Parameterization and sensitivity analysis of the BIOME-BGC terrestrial ecosystem model: net primary production controls. *Earth Interactions*, 4, 1-85.

Williams, M., Richardson, A. D., Reichstein, M., Stoy, P. C., Peylin, P., Verbeeck, H., Carvalhais, N., Jung, M., Hollinger, D. Y., Kattge, J., Leuning, R., Luo, Y., Tomelleri, E., Trudinger, C. and Wang, Y.-P., 2009. Improving land surface models with FLUXNET data. *Biogeosciences*, 6, 1341-1359. doi:10.5194/bg-6-1341-2009

Wu, X., Vuichard, N., Ciais, P., Viovy, N., De Noblet-Ducoudré, N., Wang, X., Magliulo, V., Wattenbach, M., Vitale, L., Di Tommasi, P., Moors, E.J., Jans, W., Elbers, J., Ceschia, E., Tallec, T., Bernhofer, C., Grünwald, T., Moureaux, C., Manise, T., Ligne, A., Cellier, P., Loubet, B., Larmanou, E., Ripoche, D., 2016. ORCHIDEE-CROP (v0), a new process-based agro-land surface model: Model description and evaluation over Europe. *Geoscientific Model Development*, 9, 857–873. doi:10.5194/gmd-9-857-2016

Vitousek, P.M., Mooney, H.A., Lubchenco, J., Melillo, J. M., 1997. Human domination of Earth's ecosystems. *Science* 277, 494-499.

Yi, C., Ricciuto, D., Li, R., Wolbeck, J., Xu, X., Nilsson, M., Aires, L., Albertson, J.D., Ammann, C., Arain, M.A., de Araujo, A.C., Aubinet, M., Aurela, M., Barcza, Z., Barr, A., Berbigier, P., Beringer, J., Bernhofer, C., Black, A.T., Bolstad, P.V., Bosveld, F.C., Broadmeadow, M.S.J., Buchmann, N., Burns, S.P., Cellier, P., Chen, J., Chen, J., Ciais, P., Clement, R., Cook, B.D., Curtis, P.S., Dail, D.B., Dellwik, E., Delpierre, N., Desai, A.R., Dore, S., Dragoni, D., Drake, B.G., Dufrene, E., Dunn, A., Elbers, J., Eugster, W., Falk, M., Feigenwinter, C., Flanagan, L.B., Foken, T., Frank, J., Fuhrer, J., Gianelle, D., Goldstein, A., Goulden, M., Granier, A., Grünwald, T., Gu, L., Guo, H., Hammerle, A., Han, S., Hanan, N.P., Haszpra, L., Heinesch, B., Helfter, C., Hendriks, D., Hutley, L.B., Ibrom, A., Jacobs, C., Johansson, T., Jongen, M., Katul, G., Kiely, G., Klumpp, K., Knohl, A., Kolb, T., Kutsch, W.L., Lafleu, P., Laurila, T., Leuning, R., Lindroth, A., Liu, H., Loubet, B., Manca, G.,

Marek, M., Margolis, H.A., Martin, T.A., Massman, W.J., Matamala, R., Matteucci, G., McCaughey, H., Merbold, L., Meyers, T., Migliavacca, M., Miglietta, F., Misson, L., Molder, M., Moncrieff, J., Monson, R.K., Montagnani, L., Montes-Helu, M., Moors, E., Moureaux, C., Mukelabai, M.M., Munger, J.W., Myklebust, M., Nagy, Z., Noormets, A., Oechel, W., Oren, R., Gpallardy, S., Tha Paw U, K., Pereira, J.S., Pilegaard, K., Pinter, K., Pio, C., Pita, G., Powell, T.L., Rambal, S., Randerson, J.T., Von Randow, C., Rebmann, C., Rinne, J., Rossi, F., Roulet, N., Ryel, R.J., Sagerfors, J., Saigusa, N., Sanz, M.J., Mugnozza, G.-S., Schmid, H.P., Seufert, G., Siqueira, M., Soussana, J.-F., Starr, G., Sutton, M.A., Tenhunen, J., Tuba, Z., Tuovinen, J.-P., Valentini, R., Vogel, C.S., Wang, J., Wang, S., Wang, W., Welp, L.R., Wen, X., Wharton, S., Wilkinson, M., Williams, C.A., Wohlfahrt, G., Yamamoto, S., Yu, G., Zampedri, R., Zhao, B., Zhao, X., 2010. Climate control of terrestrial carbon exchange across biomes and continents. *Environmental Research Letters*, 5, 034007. doi:10.1088/1748-9326/5/3/034007