

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Földrajz- és Földtudományi Intézet

Meteorológiai Tanszék

Mikrometeorológiai mérési programok (2015–2021) egységes adatbázisának kiépítése

DIPLOMAMUNKA



Készítette:

Tordai Ágoston Vilmos

Meteorológus mesterszak,

Időjárás-előrejelző specializáció

Témavezető:

Dr. Weidinger Tamás

ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2022

NYILATKOZAT

Név: Tordai Ágoston Vilmos

ELTE Természettudományi Kar, szak: Meteorológus mesterszak

NEPTUN azonosító: H0URXX

Diplomamunka címe:

Mikrometeorológiai mérési programok (2015-2021) egységes adatbázisának kiépítése

A **diplomamunka** szerzőjeként fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem, hogy a dolgozatom önálló szellemi alkotásom, abban a hivatkozások és idézések standard szabályait következetesen alkalmaztam, mások által írt részeket a megfelelő idézés nélkül nem használtam fel.

Budapest, 2022.04.30.



a hallgató aláírása

TARTALOMJEGYZÉK

1. BEVEZETÉS	3
2. A METEOROLÓGIAI ADATOK MINŐSÉGBIZTOSÍTÁSÁNAK MÓDSZERTANA.....	5
2.1 ALAPVETŐ FOGALMAK	6
2.2 A MAGAS ADATMINŐSÉG BIZTOSÍTÁSÁNAK ÁLTALÁNOS KÖVETELMÉNYEI.....	7
2.3 MIŐSÉG-ELLENŐRZÉSI TECHNIKÁK ÉS ELJÁRÁSOK	14
2.4 MINŐSÉGBIZTOSÍTÁS SZEREPE A MÉRÉSEK KIVITELEZÉSÉNEK KÜLÖNBÖZŐ FÁZISAIBAN	17
2.5 MIKROMETEOROLÓGIAI MÉRÉSEK MINŐSÉGBIZTOSÍTÁSA.....	20
2.6 METAADATOK TÍPUSAI, DOKUMENTÁCIÓJUK	28
2.7 METEOROLÓGIÁBAN ALKALMAZOTT ADATFORMÁTUMOK.....	31
3. ADATBÁZISBA RENDEZETT MIKROMETEOROLÓGIAI MÉRÉSEK	34
3.1 AZ ADATFELDOLGOZÁS MÓDSZERE, KIALAKÍTOTT EGYSÉGES ADATSZERKEZET	35
3.1 FELDOLGOZOTT MÉRÉSI KAMPÁNYOK, ADATSOROK	42
3.2 MÉRÉSI KAMPÁNYOK CÉLJAI, MŰSZEREZETTSÉGÜK	43
3.2.1 PABLS'15	43
3.2.2 2016 – ATACAMA EXPEDÍCIÓ (Ojos del Salado)	47
3.2.3 2016 – Városi és külvárosi határreteg-mérések, Szeged.....	49
3.2.4 Mikroklímátikai mérési kampány a Gellért-fürdő alagútrendszerében (Gellért- táró)	52
3.2.5 2018–2020 – Kísérleti agromikrometeorológiai mérések Jakabszálláson és Villányban.....	57
3.2.6 2017 – Mikroklíma mérések a Szemlő-hegyi- és a Molnár János barlangokban	61
3.2.7 2017 –2018, Agromikrometeorológiai mérések Zágrábi szőlőállományban ..	62
3.2.8 2018-2021 – Köd mikrofizikai kutatási program, Siójut és Pestszentlőrinc ...	65
3.3 EREDMÉNYEK – ESETTANULMÁNYOK	68
4. ÖSSZEFOGLALÁS	73
6. IRODALOMJEGYZÉK	75
7. FÜGGELÉK	82

1. Bevezetés

A modern meteorológia interdiszciplináris megközelítésen alapul; a különböző mérések megfigyelések során keletkező adatokat tárolni és rendszerezni kell, elő- illetve utófeldolgozásra van szükség a felhasználói igényeknek megfelelően. E feladatok fejlett informatikai infrastruktúrát és eljárásokat igényelnek. A készülő adatbázisok szerkezetének kialakítása, rendezése, elérhetővé tétele mind informatikai mind meteorológiai szempontból nélkülözhetetlen feladat. Az ilyen szempontok figyelembevételével kialakított adatbázisok a további adatfeldolgozás előfeltételei. Az elkészült, nyers adatokból álló adatbázisokon ezután alapvető fontosságú az adatok minőség-ellenőrzése (quality assesment), mely történhet automatizált (pl. matematikai statisztikai eljárások, gépi algoritmusok) és manuális (pl. vizuális analitikai módszerek) eljárásokkal, illetve ezek kombinációjaként. A minőségbiztosítási folyamat a mérés teljes időtartamát végig kíséri; a tervezéstől az utófeldolgozásig; minden lépésről részletes dokumentáció kell, hogy készüljön. A meteorológiai adatok minőségbiztosításának részletes nemzetközi irodalma áll rendelkezésre, melyre e dolgozat is épít (pl.: Meek, 1994; Zahumenský, 2004; Estévez et al., 2011; Campbell et al., 2013; WMO, 2021) A mikrometeorológiai terepi (expedíciós) mérések során sokféle, változó tartalmú és hosszúságú adat keletkezik, melyek kezelése a szinoptikus állomások adatsoraihoz képest eltérő technikát, illetve követelményeket igényel. Figyelembe kell venni, hogy sokszor több, egymástól különálló adatforrás (különböző műszerezettségű mérőplatformok, rádiószondák, kis költségű, „olcsó” (low-cost) szenzorok, háttéradatok stb.) együttes alkalmazása szükséges; ezeket egységes módon kell kezelni, rendezni. Az adatok utófeldolgozása során ismerni kell az adott mérési program során felhasznált mérőeszközöket, azok működési elvét, főbb paramétereit, korlátjaikat, jellemző viselkedésüket, valamint pillanatnyi állapotukat, és a kalibrációra vonatkozó adataikat. Ezeket a háttér-információkat (metaadatok) – többek között – a többi mérési adathoz csatolva rögzíteni szükséges.

Dolgozatomban áttekintem a meteorológiai mérések során alkalmazott minőségbiztosítási folyamatot nemzetközi szakirodalmi példák alapján. Foglalkozom a mikrometeorológia ágazat-specifikus minőségbiztosítási igényeivel, annak módszereivel – különös tekintettel az adatok utófeldolgozására. Vizsgálom a már megvalósult, illetve jelenleg folyó projektek

példáján az expedíciós mérések során rögzített metaadatok struktúráját, különböző gyakorlatokat.

A diplomamunka gyakorlati része az ELTE Meteorológiai Tanszék mikrometeorológiai mérésein alapul. Olyan mérési programokat mutatok be, amelyekben részt vettem. A dolgozathoz kapcsolódó munka főbb célkitűzései a következők:

- i) 2015-től rendelkezésre álló valamennyi mérési program nyers adatsorainak egységes struktúrába rendezése,
- ii) a mérési programokhoz kapcsolódó metaadatok (műszerezettség, adatok elérhetősége, minőségbiztosítási mutatók stb.) egységesítése és rögzítése,
- iii) egységes minőségbiztosítási eljárás adaptációja meglévő minták alapján (Campbell et al., 2013; Zahn et al., 2016; Faybishenko et al., 2022), alkalmazása az adatsorokra,
- iv) vizuális analitikai módszerek alkalmazhatóságának vizsgálata,
- v) a készülő adatbázis-rendszer alkalmazhatóságának illusztrációja esettanulmányok révén.

2. A meteorológiai adatok minőségbiztosításának módszertana

A meteorológiai mérésekből, megfigyelésekből származó adatok kezelése interdiszciplináris megközelítést igényel: a tisztán meteorológiai ismereteken túl szükségünk van méréstechnikai, számítástudományi és informatikai készségekre (1. ábra). Gondolhatunk a komplex mérőrendszerek és szenzorok működésének ismeretére, a keletkező adatok tárolására és kezelésére, továbbá az adatok feldolgozása során kapott fizikai eredmények értelmezésére. Amikor meteorológiai mérések, illetve mérési adatok minőségbiztosításáról beszélünk, egyszerre kell látnunk – és teljesítenünk – az egyes szakterületek által támasztott minőségbiztosítási követelményeket.

A következő alfejezetekben a meteorológiai adatok minőségbiztosításának elméleti és gyakorlati vonatkozásait tekintjük át – a legáltalánosabbtól indulva a konkrét mikrometeorológiai alkalmazásokig.



1. ábra – A meteorológiai kutatások, számítástudomány és mérés technika kölcsönös viszonya – minden tudományterületnek egyedi minőségbiztosítási követelményeivel, melyek „közös részét” keressük

2.1 Alapvető fogalmak

A minőségbiztosítás (quality assurance – QA) és a minőség-ellenőrzés (quality control – QC) folyamatai a meteorológiai adatok teljes életciklusának valamennyi szakaszában kulcsfontosságúak (WMO, 2021). Ahhoz, hogy e folyamatokról részleteiben értekezzünk, definiálnunk kell azokat, elsősorban a WMO által javasolt elvek mentén, másodsorban a különböző, ágazatspecifikus szakirodalom kiegészítéseivel.

Minőségbiztosítás (QA) alatt értjük azt a folyamatot, melynek célja kielégítő adatminőség fenntartása a vizsgált adatbázisban, ezáltal az adatfelhasználók biztosítása a felhasznált adat megbízhatóságáról és teljességéről. A minőségbiztosítási eljárások segítenek feltárni a szisztematikus hibákat a mérőrendszer telepítésétől kezdve egészen a keletkezett adatok utófeldolgozásáig. Ilyen hibák adódhatnak például állomások sztenderdtől eltérő elhelyezéséből, telepítéséből, helytelen mérési/megfigyelési eljárások használatából, a mérőeszközök és a kapcsolódó szoftverek hibáiból, karbantartási hiányosságokból, illetve az adatátviteli (kommunikációs) csatornák problémái által. E hibák feltárása, azonosítása, elhárítása és dokumentálása mind a minőségbiztosítási folyamat részét képezik.

A minőség-ellenőrzés fogalma magában foglalja mindazokat az eszközöket és technikákat, amelyek az adatok reprezentativitását vizsgálják; azaz, hogy a rögzített adat valóban a vizsgálni kívánt folyamat reprezentációja-e, illetve befolyásolták-e azt más, független tényezők. A minőség-ellenőrzés folyamata az adat tér- és időbeli reprezentativitását, konzisztenciáját vizsgálva biztosítja az adatsorban esetlegesen található hibák és inhomogenitások észlelését, illetve ezek lehetséges előfordulásának megjelölését. Az egyes adatpontok ilyenfajta megjelölésére nemzetközi források gyakran „flagging”-ként hivatkoznak (Mauder et al., 2013, Mauder és Foken, 2015).

A minőségbiztosítási- és minőség-ellenőrzési folyamatok együttesen minőség-menedzsment rendszert alkotnak. A Nemzetközi Szabványügyi Szervezet (ISO – International Organization for Standardization) 9000-es szabványcsaládjá írja le a (nemzeti meteorológiai szolgálatokra is) vonatkozó minőségügyi követelményeket. Részletesen tárgyalja a minőség-menedzsment rendszerek felépítését, folyamatait. Az ISO 9001 szabvány részletezi a minőség-menedzsment rendszerrel szemben támasztott követelményeket, melyek

teljesülése az akkreditáció, illetve a tanúsítvány-szerzés szükséges feltételeit írja le. Az ISO 9004 szabvány iránymutatásokat tartalmaz a minőségügyi rendszer folyamatos fejlesztéséhez, az ISO 19011 szabvány pedig a rendszer auditálásának kulcspontjait fogalmazza meg. Ezen felül az Nemzetközi Elektrotechnikai Bizottsággal közös ISO/IEC 17025 sztenderdje szabályozza a laboratóriumok, tesztelő intézmények akkreditációjához szükséges menedzsment és technikai követelményeket. Az ISO/IEC 20000 szabvány által megfogalmazott ajánlások az informatikai- és infokommunikációs rendszerek megbízhatóságának növelését, illetve minőségbiztosítását segítik. Végül, de nem utolsó sorban a WMO Minőség-menedzsment Keretrendszere (WMO Quality Management Framework [1- public.wmo.int]) általános minőségügyi ajánlásokat fogalmaz meg a nemzeti meteorológiai szolgálatok tapasztalatai alapján (WMO, 2017; WMO, 2018). A következő fejezetekben e szabványokra támaszkodva tekintjük át a meteorológiai mérésekre, majd a mikrometeorológiai expedíciókra vonatkozó és ajánlott minőségbiztosítási aspektusokat.

2.2 A magas adatminőség biztosításának általános követelményei

Az alapvető definíciókat követően vizsgáljuk meg, milyen átfogó alapfeltételei vannak a meteorológiai adatok minőségbiztosításának! Természetesen a meteorológián belül is az egyes ágazatok eltérő QA/QC irányelvekkel, követelményekkel rendelkezhetnek (például egy nemzeti meteorológiai szolgálat által üzemeltetett szinoptikus mérő- és megfigyelő-hálózatra vonatkozó kritériumok eltérnek az egyetemi kutatók által expedíciós céllal telepített mikrometeorológiai állomástól). Milyen faktorok befolyásolják az adatminőséget, illetve az azzal szemben támasztott követelményrendszert? A (WMO, 2018) alapján a következő négy tényező emelhető ki:

1. Felhasználói igények – mennyire képes az adott mérőrendszer teljesíteni az adat végfelhasználója által támasztott igényeket?
2. Funkcionális és technikai specifikációk – az alkalmazott eszközök működése és tulajdonságai nagymértékben meghatározzák az adat minőségét.
3. Választott műszerek – általánosságban elmondható, hogy a mérés céljának legmegfelelőbb műszerek alkalmazása kulcsfontosságú. Figyelembe kell venni a műszer mérési (szükséges) bizonytalanságát, a mérési tartományt és (a maximális) felbontást, melyeket a felhasználó igényei határoznak meg.

4. Átvételi tesztek – bár a műszerek gyártói, illetve a kalibráló hatóságok a jelzett specifikációkat tanúsítják, előfordul, hogy az adott műszerek (pl. szállítási, tárolási stb. okokból kifolyólag) a tanúsított kritériumokat nem tudják teljesíteni. Amennyiben a műszerek akkreditált laboratóriumok általi kalibrációja nem kivitelezhető, a kalibrációs hibák számszerűsítése nagy nehézséget jelent. Ezért jó gyakorlat a mérőrendszer operatív környezetben történő tesztelése – még az adatgyűjtés kezdete előtt.

A (WMO, 2021) útmutatásai alapján megfogalmazható néhány általános érvényű minőségmenedzsment irányelv, amely a mérések/megfigyelések teljes élettartamára érvényes:

- A minőségbiztosítási eljárás az adatok teljes életciklusát le kell, hogy fedje: a mérőállomás(ok) tervezésétől kezdve az adatgyűjtésen- és utófeldolgozáson át, egészen az adatok archiválásáig.
- Minden alkalmazott módszer és eljárás dokumentálandó (a lehető legnagyobb részletességgel) a minőség és visszakövethetőség érdekében. A keletkező dokumentáció megőrzendő és csatolandó a mérési/megfigyelési adatokhoz (metaadat).
- Minden egyes adatelem esetén objektív minőségbiztosítási tesztek és folyamatok alkalmazása szükséges, melyek kimenetét szintén dokumentálni szükséges (data flagging).
- Az eredeti, módosítatlan adatsort – minőségétől függetlenül – meg kell őrizni.
- A minőségbiztosítást végző(k) visszajelzést kell, hogy adjanak a mérésekért felelős személyeknek mind az esetlegesen felmerülő hibákról, mind az adatminőségről.

A megfogalmazott általános irányelvek mentén haladva specifikálhatóak a kialakítandó mérőrendszerre vonatkozó irányelvek a magas adatminőség érdekében:

- Kompatibilis eszközök használata – adott mérőrendszeren belül nem szerencsés különböző specifikációjú mérőeszközök együttes alkalmazása. Nem ajánlott továbbá ugyanazon paraméter különböző mintavételezési időtartammal történő gyűjtése két külön eszköz által, de az eltérő árnyékolás használata sem.

- Követelményeknek történő megfelelés – a mérés helyszíne, valamint az alkalmazott mérőeszközök és technikák feleljenek meg a WMO (WMO, 2018), illetve az egyes szakterületek által támasztott minimumkövetelményeknek.
- Mérőrendszer elhelyezése – a mérőrendszer helyét úgy kell megválasztani, hogy a mért adatok a vizsgálni kívánt tér- és időskálát reprezentálják. Ezeket vagy az egyedi felhasználói igények, vagy – azok hiányában – a WMO irányelvei határozzák meg (WMO, 2017; WMO, 2018).
- Mérőrendszer tesztelése – az adatgyűjtők és a használt műszerek telepítés előtti tesztelése és kalibrálása a minőségbiztosítási folyamat szükséges eleme. E lépés biztosítja, hogy a használt eszközök az elvárt követelményeknek megfeleljenek. Az előzetes ellenőrzés kiterjed az alkalmazandó adatátviteli (kommunikációs) erőforrásokra is.
- Megfelelő képzettség – a megfigyelést/mérést végző, illetve a mérőrendszer tervezését, összeállítását, kivitelezését, ellenőrzését, illetve karbantartását végző személy(ek) megfelelő képzettséggel kell, hogy rendelkezzenek. Az adatminőség a technikai személyzet, illetve az adatfeldolgozást végző személyek tapasztalatainak is függvénye.
- Adatgyűjtés – az adatminőség nemcsak az alkalmazott mérőeszközök, hanem a mérésadatgyűjtő és az adatgyűjtési módszerek függvénye is. Lényeges, hogy a mérésadatgyűjtővel szemben is – a szenzorokhoz hasonlóan – egzakt minőségbiztosítási követelményeket támasszunk. Szintén kulcsfontosságú például a mintavételezési- és kiírási időintervallumok (frekvenciák), illetve a kiírandó paraméterek gondos megválasztása. Kulcsfontosságú továbbá, hogy a mérési adatok rögzítéséhez (és továbbításához) használt automata mérésadatgyűjtők legyenek alkalmasak arra, hogy a nyers adatokat kellően hosszú időintervallumra megőrizzék – meghibásodás esetén is. Az adatgyűjtőkre vonatkozó technikai követelményeket alapesetben az adott ország meteorológiai szolgálata, kutatási tevékenység során a szakirodalmi ajánlások (Zahumenský, 2004; WMO, 2021) határozzák meg.
- Adatfeldolgozás – különös figyelmet kell fordítani az adatok utófeldolgozására, hiszen az alkalmazott eljárások és számítások további hibák forrásai lehetnek. A szakirodalom (WMO, 2018) 5 különálló adatszintet különböztet meg:

- 0. szintű adatok (Level 0): Nyers adatok; az egyes mérőeszközök által kibocsájtott analóg vagy digitális elektromos jelek (pl. feszültség, ellenállás, digitális jel stb.), melyeket értelmezésükhöz és további használatukhoz konvertálni kell.
 - 1. szintű adat (Level I): A mérőeszközök által mért értékek megfelelő fizikai mértékegységekben kifejezve és georeferálva (megfelelő földrajzi koordinátákkal kifejezve).
 - 2. szintű adat (Level II): Meteorológiai állapothatározók értékei megfelelő mértékegységekben kifejezve (melyek származhatnak közvetlenül szenzorokból, vagy számíthatóak 1. szintű adatokból).
 - 3. szintű adat (Level III): Belsőleg konzisztens adatsorok (általában rácsponti adatok), melyek a 2. szintű adatokból származnak meghatározott inicializációs eljárásokkal.
 - 4. szintű adat (Level IV): Tematikus információ. Modellkimenetek, vagy alacsonyabb szintű adatok analíziséből származó eredmények.
- Valós idejű minőség-ellenőrzés – minél hamarabb feltárható a felmerülő hibák forrása, annál inkább biztosítható az adathiány minimalizálása, és a konzisztens adatminőség fenntartása. A korszerű mérőrendszerek támogatják a valós idejű kommunikációt, így mód van a lehetséges értékekre végzett tesztek elvégzése és nyomon követése (Campbell et al., 2013). Ezáltal megvalósítható a hirtelen felmerülő hibák korai felismerése és kezelése.
 - Teljesítmény-monitoring – a mérőeszközök hosszú távú degradációja folytán keletkező eltérések valós időben nem detektálhatók; kizárólag folyamatos ellenőrzés eredményeként mutathatók ki. E folyamat előrevetíti a rendszeres karbantartás iránti igényt is.
 - Rendszeres tesztelés és kalibráció – a mérőeszközök hardverelemeinek öregedése, az időjárásnak való kitettség hatással van a teljesítményükre, ezért elkerülhetetlen a rendszeres időközönként történő ellenőrzés (az ideális időköz a mérés célja határozza meg). Az ellenőrzés magában foglalja a mérőállomás(ok) személyes, terepi vizsgálatát is, melynek során dönteni kell az esetleges karbantartás, szenzorcsere szükségességéről. Meg kell győződni a mérőműszerek kalibrációjának állapotáról, biztosítani kell a rendszeres kalibrációt.

- Rendszeres karbantartás – a karbantartás jellege szerint háromféle lehet:
 1. Korrektív (javító) – meghibásodás esetén.
 2. Preventív (megelőző) – például tisztítás, mozgó részek olajozása a hosszabb élettartam érdekében.
 3. Adaptív – válasz a megváltozó igényekre, illetve az elavulásra.
- Metaadatok – részletes dokumentáció a mérésről, a mérőrendszerről és annak minden változásáról, mely az adatsorok mellé csatolandó, azokkal együtt rögzítendő. Mérőeszköz (szenzor) változása esetén az eredeti és az új szenzorokkal együtt, párhuzamos mérés kivitelezése szükséges az adatintegritás biztosítása érdekében. Mind az eredeti adatsorhoz, mind a párhuzamos mérésekhez kapcsolódó metaadatok megőrzendőek.

Az általános minőség-menedzsment ajánlásokat a WMO elsősorban nemzeti meteorológiai szolgálatok számára fogalmazta meg (WMO, 2017). A meteorológiai szolgálatok működésének részeire, illetve annak egészére minőségirányítási rendszert kell bevezetni, ami megfelel az ISO 9001 szabványnak. Magyarországon az Országos Meteorológiai Szolgálat az európai meteorológiai szolgálatok között elsőként vezette be valamennyi tevékenységi körére ezt a minőségirányítási rendszert [4 – met.hu]. Ez a rendszer 2002 óta folyamatosan működik, az ISO 9001:2015 szabvány által támasztott követelményeknek történő megfelelést az SGS United Kingdom Ltd. tanúsította. A szolgálaton belül a minőség-menedzsment feladatok az szolgálat elnöke által megbízott, önálló hatáskörrel rendelkező minőségirányítási vezetőhöz tartoznak. [4 – met.hu]. A szolgálat által megfogalmazott minőségügyi alapelvek alapján nagy jelentősége van a meteorológiai adatok minőségbiztosításának, mind az operatív, mind a kutatási tevékenység tekintetében. Az éghajlatváltozás kutatásához is használt magas-adatminőségi követelményeknek megfelelő, térben és időben reprezentatív adatsorok ellenőrzését MASH szoftver alkalmazásával végzik (Izsák és Szentimrey, 2019). A nagymennyiségű operatív földfelszíni mérési adat kezelésénél kulcsfontosságú a valós idejű adatellenőrzés folyamata, amely a meteorológia új résztudományaként is tekinthető (Horváth, 2019, Hermann et al., 2021).

Az általános irányelveket és ajánlásokat alapul véve megfogalmazhatók specifikus, kifejezetten mikrometeorológiai mérés technikához kapcsolódó minőségbiztosítási

követelmények is. Foken et al. (2004) munkájában egy olyan mikrometeorológiai minőségbiztosítási rendszert vázol, melynek a következő elemeket kell tartalmaznia:

i) *Végfelhasználói igények specifikációja*

A végfelhasználók számára (lehet döntéshozó, modellező, mérnök stb.) a mérési program alapvető információit rendelkezésre kell bocsájtani (pl. mérési pontosság, tér- és időbeli felbontás, mérőplatformok száma, felszín típusa, ...). Mérési programok tervezésénél különös figyelmet kell fordítani a megbízhatóság és megvalósíthatóság kérdésére.

ii) *Mérőrendszer (műszerezettség) specifikációja*

Egy adott mérési program műszerezettségét a személyi, pénzügyi és tudományos kényszerek határozzák meg. A méréstechnika és műszerek folyamatos fejlődésével az adatfeldolgozás sajátosságai is változnak, az új módszerek adaptálása során a feldolgozás folyamata is módosulhat. Egy-egy expedíciós mérés műszerezettségének pontos leírása elengedhetetlenül szükséges az eredmények reprodukálhatóságához, illetve más mérésekkel történő összehasonlító vizsgálatok kivitelezéséhez (jó példa látható a részletes dokumentációra a NOAA Chemical Studies Laboratory [2 – csl.noaa.gov], vagy akár a NOAA MADIS rendszer weboldalán is [3 – madis.ncep.noaa.gov]).

1. táblázat – Egyes meteorológiai állapothatározók WMO által javasolt minimum mérési pontossága (WMO, 2018 alapján)

<i>Állapothatározó</i>	<i>Elvárt minimum pontosság (napi értékek)</i>
Hőmérséklet (beleértve a maximum / minimum, száraz és nedves, illetve talajhőmérsékletet is)	$< \pm 0,5^{\circ}\text{C}$
Csapadékmennyiség	$\pm 1 \text{ mm}$
Napsütéses órák száma	10% (± 1 óra)
Párolgás	$\pm 1 \text{ mm}$
Relatív nedvesség (páratartalom)	$\pm 5\%$
Napsütéses időszak (fotoperiódus)	10% (± 1 óra)
Szélességesség	$\pm 0,5 \text{ m/s}$
Légnyomás	$\pm 0,1 \text{ hPa}$

A professzionális meteorológiai gyakorlatban használt műszerekkel szemben elvárható, hogy i) a WMO által javasolt minimális pontossági feltételeknek megfeleljenek (1. táblázat, WMO, 2018), ii) megbízható működésűek legyenek, iii) a műszerek állapota ellenőrizhető legyen, illetve iv) a műszerek kalibrációja kivitelezhető legyen. A nem professzionális célra készült műszerek adatsorainak minőségbiztosítása során e feltételek teljesülését külön vizsgálni kell (Karkouch et al., 2016).

iii) Mérőrendszer elhelyezkedésének leírása, mérési körülmények megfelelő megválasztása

Számos (hagyományos) mérőállomás már meglévő tudományos berendezések környezetében került kialakításra – a mikrometeorológiai kritériumrendszer előtérbe helyezése helyett. Így minden mérési program esetén valamennyi mérési helyszín pontos dokumentációja, leírása elengedhetetlen az adatminőség biztosítása érdekében. Legideálisabb esetben (különös tekintettel a hosszú távú mérési programokra, toronymérésekre) a mérőrendszer telepítését megelőzően kísérleti mérés kivitelezése javasolt, mely során az gyűjtött adatok minősége ellenőrizhető.

iv) Szükséges kalibrációk definiálása, rendelkezésre állása

A megfelelő kalibráció biztosítja a különböző mérőrendszerek összehasonlíthatóságát. Bármely mérés pontosságát végső soron az alkalmazott kalibrációk pontossága és frekvenciája határozza meg. A legtöbb esetben a szükséges kalibrációk és ellenőrzési protokollok a szakirodalomban jól dokumentáltak (pl.: Goulden et al., 1996; Moncrieff et al., 1997; Aubinet et al., 2000).

v) A minőség-ellenőrzés meghatározása

A minőségbiztosítás leglényegesebb része a minőség-ellenőrzés, melyet legideálisabb valós időben, vagy rövid időeltolással végezni, hogy a műszerhibákból adódó adathiány a minimálisra csökkenjen.

vi) Az adatminőség értékelése

A minőség-ellenőrzéshez hasonló folyamat kiegészítve az adatminőség leírásával, mely lehetővé teszi a létrejövő adat összehasonlítását különböző időtartományok, illetve különböző mérőhelyek közt.

vii) *Korrekciók*

Ide értjük többek között a kalibrációk általi, a koordináta-rendszer megválasztásából adódó, a szenzorok méretéből és elhelyezkedéséből adódó korrekciókat. A legtöbb szükséges korrekció mikrometeorológiai szakirodalomban dokumentált (Moncrieff et al., 1997; Aubinet et al., 2000; Foken et al., 2004)

viii) *Visszajelzés az adat-felhasználó(k) részéről*

Egy mérési program során sok esetben az elkészülő adatbázis a végső produktum. Ugyanakkor a felhasználó által a mérési program kivitelezője felé adott visszajelzés segít az adatminőség további javításában, illetve későbbi, más programoknál tervezett változtatások konkretizálásában.

2.3 Minőség-ellenőrzési technikák és eljárások

Technikai szempontból ideális, ha egy mérőrendszer állapota közel valós időben követhető. Ezáltal ellenőrizhető, hogy i) a gyűjtött adatok az elvárásoknak megfelelőek, ii) az időbélyegzők helyesek, iii) a mért értékek reálisak. A valós idejű elérhetőség lehetővé teszi továbbá olyan automatizált, vagy részben automatizált minőségellenőrző eljárások implementációját, melyek meghibásodás, rendellenes működés, illetve feltételezhető hibák esetén a mérőrendszerért felelős személyt/személyeket értesítik. Ilyen módon a fennálló hiba a lehető leggyorsabban elhárítható, így a keletkező adathiány minimalizálható.

Szintén hasznos eljárás már az adatgyűjtés során az egyes adatpontokhoz történő (automatizált eljárásokkal) minőségjelző mezők (flagging) kapcsolása. E mezők tükrözik a keletkező adat valódiságába vetett bizalmat. Ez a megközelítés magában foglalja, hogy a bizonytalan/feltehetően hibás értékek nem kerülnek azonnal eltávolításra, hanem a nyers adatsorban tárolódnak – a kapcsolódó minőségjelzőkkel együtt. Az adatok utófeldolgozásánál (mely során a nyers adatsorokból különálló, ellenőrzött adatsorok jönnek létre előre meghatározott céllal) kerül sor ezen értékek felülvizsgálatára, illetve döntéshozatalra.

A fentiek alapján adódik, hogy a minőség-ellenőrzés folyamata lehet automatizált, részben automatizált, illetve manuális. Az automata mérésadatgyűjtő rendszerek lehetővé teszik sokféle (Shafer et al., 2000; Bagiorgas et al., 2007; Zahn et al. 2016) automatizált ellenőrző

eljárás beprogramozását a mintavételi- és kiírási frekvenciák függvényében, illetve az alkalmazott mérőeszközök mérési tartományainak ismeretében. Hasonló, de részletesebb eljárások az adatok elő- és utófeldolgozásánál is alkalmazhatók.

A modern adatgyűjtő rendszerek elterjedésével a manuális adatellenőrzés szerepe leginkább az utófeldolgozás során jelentős. Figyelembe kell azonban venni, hogy a kézi adatellenőrzés munkaigényes, bizonyos fokú szubjektivitást feltételez, illetve nagymértékben függ az ellenőrzést végző személy tapasztalatától.

A teljesen automatizált minőség-ellenőrzési eljárások során valamennyi adatpont vizsgálata megtörténik, majd ezekhez egy-egy minőségjelző érték (flag) kerül hozzárendelésre. Ez az adatfeldolgozás leggyorsabb módja, ugyanakkor gyakori, hogy az ilyen eljárások vagy túl sok feltételezhetően hibás értéket jelölnek meg (fals pozitív értékek), vagy túl keveset – az előre beállított szűrési paraméterek függvényében. Szintén probléma lehet, hogy egy-egy valódi extrémum is hibás értéknek kerülhet megjelölésre – különösen akkor, ha a mérés különböző szélsőségek kutatását szolgálja. Ezek függvényében az automatizált eljárások is fenntartásokkal kezelendők – különös tekintettel a K + F + I tevékenységek folyamán. Megemlítendő, hogy már Gandin (1988) cikkében olyan Komplex Minőség-ellenőrzési Rendszert (CQC – Complex Quality Control) vázol, mely a meteorológiai adatok automatizált ellenőrzését végzi. Módszerének alapja egy iterációs algoritmus, amit a 2. ábra szemléltet. A megközelítés lényege, hogy minden iterációs lépésben elkülönítjük a helyesnek ítélt és a feltehetően hibás adatokat az előre meghatározott CQC feltételek alapján, a mérés, illetve mérőeszköz függvényében. Ezután egy döntéshozatali algoritmust alkalmazunk, mely a feltehetően hibás értékekről dönt és azokat 4 lehetséges csoportba sorolja:

1. Elfogadott értékek – bekerülnek az ellenőrzött adatok közé.
2. Korrigált értékek – a szükséges korrekciók után bekerülnek az ellenőrzött adatok közé.
3. További feltételezhetően hibás értékek – a következő iterációban vizsgálandóak.
4. Hibás (menthetetlen adatok) – elvetésre kerülnek.

The diagram illustrates the iterative process of the CQC (Complex Quality Control) algorithm. It shows the progression from an initial state to a final state where only 'Helyes' (Correct) items remain. The process involves identifying 'Feltételezhető hibák' (Suspected defects) and applying the DMA (Decision Making Algorithm) to categorize them as 'Elfogadott' (Accepted), 'Korrigált' (Corrected), 'Feltételezhető hibák' (Suspected defects), or 'Javíthatatlan hibák' (Unrepairable defects).

Initial State:

- Helyes** (Correct)
- Feltételezhető hibák** (Suspected defects)

Döntéshozatali (DMA) algoritmus alkalmazása (Application of the Decision Making Algorithm)

Intermediate State (after 1st iteration):

- Elfogadott** (Accepted)
- Korrigált** (Corrected)
- Feltételezhető hibák** (Suspected defects)
- Javíthatatlan hibák** (Unrepairable defects)

Komplex minőségellenőrző eljárás (CQC) 1. iterációja után (After the 1st iteration of the CQC complex quality control procedure)

Intermediate State (after 2nd iteration):

- Helyes** (Correct)
- Feltételezhető hibák** (Suspected defects)

Komplex minőségellenőrző eljárás (CQC) 2. iterációjának kezdete (Start of the 2nd iteration of the CQC complex quality control procedure)

Final State (after 2nd iteration):

- Feltételezhető hibák** (Suspected defects)

DMA

Final State (after 2nd iteration):

- Helyes** (Correct)

Komplex minőségellenőrző eljárás (CQC) 2. iterációja után (After the 2nd iteration of the CQC complex quality control procedure)

A részben automatizált eljárások kompromisszumként tekinthetők a kézi és a teljesen automatizált módszerek között. Általában az adatsorok egy előre felállított kritériumrendszer szerint kerülnek ellenőrzésre, melynek eredményeképpen a feltételezhetően hibás értékek megjelölésre kerülnek. Ezután ezen értékeket képzett, minőségellenőrök vizsgálják meg manuális módszerekkel. Ilyen módszer lehet a tér- és időbeli konzisztencia vizsgálata érdekében a környező állomásokkal történő összehasonlítás (Feng et al., 2004), illetve a numerikus modellekkel és reanalízisekkel történő összevetés. Szintén sok esetben hasznos segítséget nyújthat a különböző távérzékelési eszközök alkalmazása (radar, műhold). (Bhattacharya et al., 2009; Urraca et al., 2017).

Fontos kiemelni, hogy a nagyfrekvenciájú adatok esetén (pl. perces, másodperces, vagy még kisebb időbeli felbontás) a minőség-ellenőrzés legrealisztikusabb módja az automatizált eljárások alkalmazása. Nem véletlen, hogy például az elterjedt, Eddy-kovariancia mérőrendszerek részét képező, modern szónikus anemométerek gyárilag támogatják az egyes adatpontok minőségügyi megjelölését már az adatgyűjtés folyamán (Mauder et al., 2013; Zahn et al., 2016). A 3. ábrán a Campbell Scientific cég CSAT3 Szónikus anemométeréből (Li-Cor EC150 CO₂/H₂O gázanalizátorral egybeépítve) származó tesztadatsor látható, a különböző minőségjelző flag-ekkel együtt. A mikrometeorológiai mérések minőségbiztosításával, valamint a fluxusmérések minőség-ellenőrzésével a 2.5 alfejezetben foglalkozom részletesebben.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	TIMESTAMP	RECORD	U _x	U _y	U _z	T _s	diag_sonic	CO ₂	H ₂ O	diag_irga	amb_tmpr	amb_press	CO ₂ _sig_strgrth	H ₂ O_sig_strgrth
1	"2019-11-15 15:16:24.6"	26639587	-1.6579	0.4026	-0.1952	13.4840	0	1.8179e+03	7.6221	790529	10.5206	99.8887	0.1135	0.1384
2	"2019-11-15 15:16:24.7"	26639588	-1.6302	0.1393	-0.3121	13.4471	0	1.8186e+03	7.6641	790529	10.5206	99.8887	0.1135	0.1384
3	"2019-11-15 15:16:24.8"	26639589	-1.8100	0.0340	-0.6878	13.5066	0	1.8160e+03	7.6907	790529	10.5205	99.8887	0.1135	0.1384
4	"2019-11-15 15:16:24.9"	26639590	-1.4696	0.4642	-0.5526	13.5461	0	1.8176e+03	7.6700	790529	10.5205	99.8897	0.1135	0.1384
5	"2019-11-15 15:16:25"	26639591	-0.5127	-0.2181	0.3542	13.4486	0	1.8186e+03	7.6359	790529	10.5205	99.8897	0.1135	0.1384
6	"2019-11-15 15:16:25.1"	26639592	-0.9797	0.3108	0.0998	13.5128	0	1.8193e+03	7.6275	790529	10.5205	99.8897	0.1135	0.1384
7	"2019-11-15 15:16:25.2"	26639593	-1.8266	0.5991	-0.6709	13.4612	0	1.8185e+03	7.6503	790529	10.5205	99.8897	0.1135	0.1384
8	"2019-11-15 15:16:25.3"	26639594	-1.7690	0.6961	-0.3824	13.5225	0	1.8173e+03	7.8903	790529	10.5205	99.8897	0.1135	0.1383
9	"2019-11-15 15:16:25.4"	26639595	-1.2273	-0.3977	0.2678	13.4672	0	1.8190e+03	7.4168	790529	10.5205	99.8897	0.1135	0.1385
10	"2019-11-15 15:16:25.5"	26639596	-1.0494	-0.1574	0.1546	13.4818	0	1.8187e+03	7.7566	790529	10.5205	99.8897	0.1135	0.1384
11	"2019-11-15 15:16:25.6"	26639597	-1.1505	-0.0553	-0.0697	13.4664	0	1.8168e+03	7.7110	790529	10.5205	99.8897	0.1135	0.1384
12	"2019-11-15 15:16:25.7"	26639598	-1.1259	-0.1684	-0.2390	13.4684	0	1.8189e+03	7.5203	790529	10.5205	99.8897	0.1135	0.1385
13	"2019-11-15 15:16:25.8"	26639599	-0.8699	-0.2020	0.0538	13.4875	0	1.8182e+03	7.8112	790529	10.5181	99.8897	0.1135	0.1383
14	"2019-11-15 15:16:25.9"	26639600	-1.2363	-0.3414	0.0811	13.5007	0	1.8187e+03	7.5867	790529	10.5181	99.8902	0.1135	0.1385
15	"2019-11-15 15:16:26"	26639601	-0.9585	0.2178	-0.4226	13.5147	0	1.8177e+03	7.5686	790529	10.5181	99.8902	0.1135	0.1385
16	"2019-11-15 15:16:26.1"	26639602	-0.6722	0.1301	-0.2879	13.4608	0	1.8181e+03	7.7780	790529	10.5181	99.8902	0.1135	0.1383
17	"2019-11-15 15:16:26.2"	26639603	-0.6662	0.0922	0.2902	13.4694	0	1.8186e+03	7.7106	790529	10.5181	99.8902	0.1135	0.1384
18	"2019-11-15 15:16:26.3"	26639604	-0.3323	-0.0691	0.6433	13.5001	0	1.8201e+03	7.6087	790529	10.5181	99.8902	0.1135	0.1384
19	"2019-11-15 15:16:26.4"	26639605	-0.6432	0.3045	0.2799	13.5012	0	1.8188e+03	7.5690	790529	10.5181	99.8902	0.1135	0.1384
20	"2019-11-15 15:16:26.5"	26639606	-0.7941	0.1878	0.4668	13.4295	0	1.8148e+03	7.5905	790529	10.5181	99.8902	0.1135	0.1384

3. ábra – CSAT3+EC150 szónikus anemométer nyers adatsorának részlete a 2019-2020. téli köd mikrofizikai mérések során. A jelölt oszlopok a műszer, illetve az adatgyűjtő rendszer (Campbell Scientific CR3000) által számított diagnosztikai változók, melyeket minden időlépcsőben rögzít. A mérés felbontása 10 Hz.

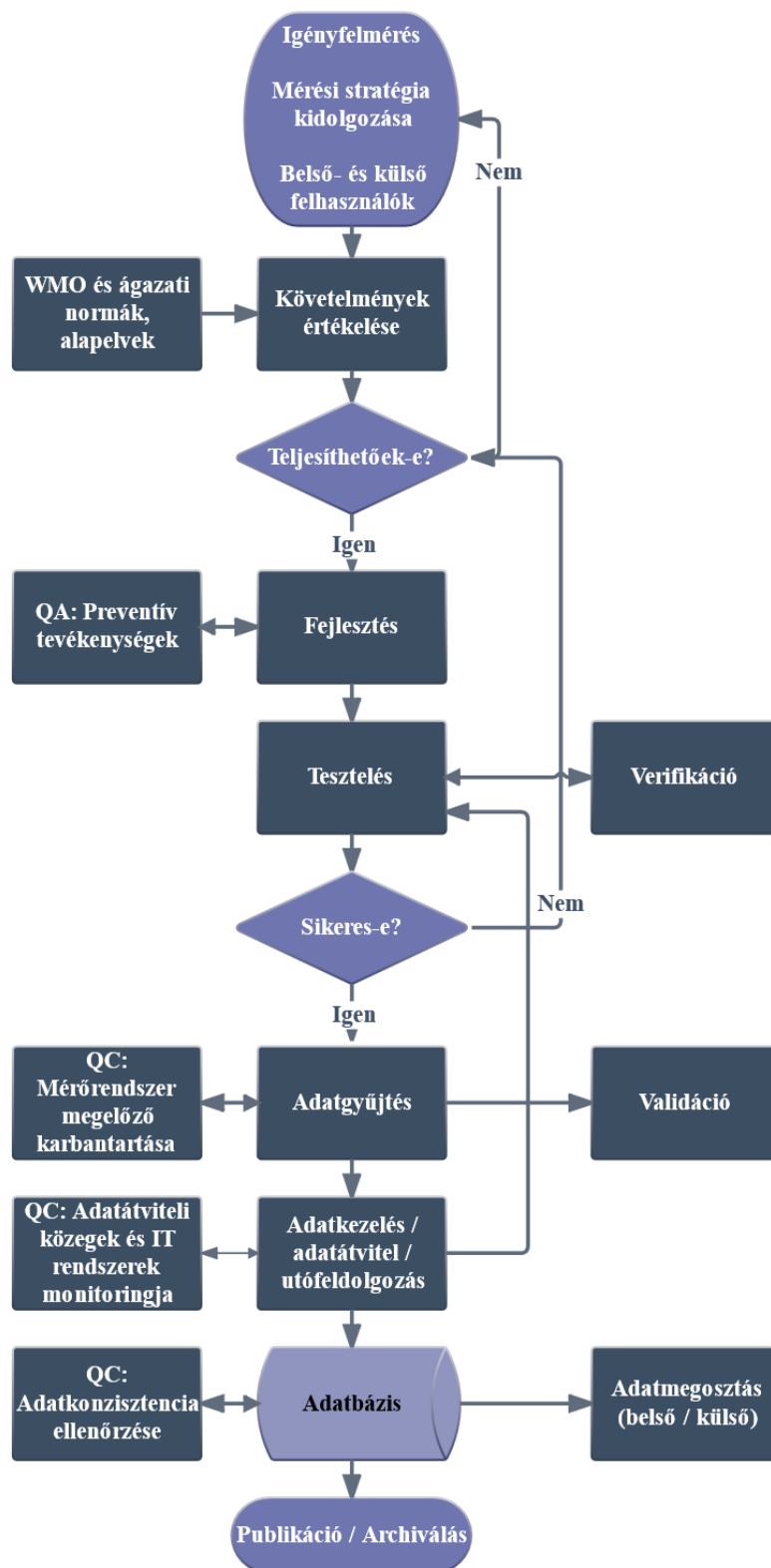
2.4 Minőségbiztosítás szerepe a mérések kivitelezésének különböző fázisaiban

A meteorológiai mérések kivitelezése általánosságban 5 szakaszra bontható:

1. Tervezés, előkészítés.
2. Mérőrendszer telepítése.
3. Adatgyűjtés.
4. Adatfeldolgozás / utófeldolgozás.
5. Publikáció / archiválás.

A mérések kivitelezésének valamennyi fázisban megjelenik a minőségbiztosítás, illetve a minőség-ellenőrzés kérdése. A 4. ábra szemlélteti e folyamatokat. A mérések tervezését

megelőzi az igényfelmérés, a mérési stratégia kidolgozása, illetve az egyeztetés a mérési program tervezett résztvevőivel. A mérési programra vonatkozó követelmények kidolgozása közösen történik meg. E követelmények alapjául a WMO útmutatása, a nemzeti meteorológiai szolgálat irányelvei, illetve az adott szakterület (pl. mikrometeorológia, klimatológia, agrometeorológia) szakirodalmából merített tapasztalat szolgál (Lee et al., 2004; Mateo et al., 2009; Aubinet et al., 2012; Foken et al., 2012a; WMO, 2012; Lacagnina et al., 2022). Amennyiben e követelmények a rendelkezésre álló erőforrások alapján teljesíthetők, megkezdődhet a fejlesztési fázis (ellenkező esetben a stratégia módosítása szükséges). A fejlesztési fázist minőségbiztosítási lépések kísérik. A kifejlesztett, beüzemelt mérőrendszert tesztelni kell, a teszteredményeket pedig verifikálni az előzetesen meghatározott követelményrendszer alapján. Sikeres tesztelés után kezdődhet az „operatív” adatgyűjtés. A tesztelési fázis sikertelensége esetén a mérés nem kezdődhet meg; a követelmények teljesíthetőségének újraértékelése szükséges. Az adatgyűjtés folyamatát folyamatos preventív karbantartás, illetve rendszerellenőrzés kíséri. A keletkező adatok ezután utófeldolgozáson esnek át; ez történhet a méréssel párhuzamosan is (ideálisan), illetve annak végeztével. Az utófeldolgozás során felmerülő minőségbiztosítási kérdésekkel részletesebben a következő alfejezetben foglalkozunk. Itt kiemelendő a feldolgozás alapjául szolgáló informatikai infrastruktúra felügyelete – az adatvesztés elkerülése érdekében. Az adatfeldolgozás eredménye a létrejövő adatbázis, mely tartalmazza a nyers, módosítatlan adatokat, az utófeldolgozott (ellenőrzött) adatokat, valamint az összes keletkező metaadatot. Az elkészült adatbázis konzisztencia-vizsgálaton esik át. A felszíni mérőállomásokra vonatkozó konzisztencia teszt jellege szerint lehető adatsoron belüli (például a hőmérséklet és harmatpont közötti kapcsolaton alapuló, napi extrémumok alkalmazásával), illetve adatsoron kívüli (például az egyes változók klimatológiai kontextusú vizsgálata az adott évszakra jellemző értékek alapján). Hasonló eljárások alkalmazhatók a vertikális szondázásokra is (WMO, 2018). Ezután megosztásra kerül a mérésben részt vevő partnerek között. Ebben a fázisban történhet meg a különálló részadatbázisok egységesítése is. Végül az elkészült adatbázis felhasználása, publikálása, illetve archiválása történik meg.



4. ábra – Meteorológiai mérések kivitelezésének folyamatai és annak minőségbiztosítási vonatkozásai (WMO,2018 alapján adaptálva expedíciós (egyedi) mérési programokra) QA = minőségbiztosítás, QC= minőség-ellenőrzés

2.5 Mikrometeorológiai mérések minőségbiztosítása

A korábbi fejezetekben általános, a meteorológia valamennyi területére érvényes minőségügyi alapelveket tekintettünk át. Vizsgáljuk meg részletesebben a mikrometeorológiai méréseket, e mérések adatfeldolgozását és az adatok minőségbiztosításának szakirodalmi vonatkozásait! Ebben az alfejezetben kiemelt hangsúlyt kap az ellenőrzött adatbázis kialakításának folyamata, mely az adatok utófeldolgozásának tekinthető.

A mikrometeorológiai tudományterülete tér- és időskála alapján a planetáris határréteg alsó ~5–10%-át adó felszínközeli rétegben zajló meteorológiai folyamatokkal foglalkozik (Foken és Nappo, 2008). Ez a réteg magában foglalja az emberi élet színterét és közvetlen környezetét; itt találhatók a légszennyező anyagok, illetve a vízgőz forrásai és nyelői. Nagyságrendi analízis alapján itt a Föld forgásából származó hatások (mint a Coriolis-hatás) másodlagos (Arya, 2001). A felszínközeli réteg energetikai szempontból is meghatározó; a napsugárzás először a talajfelszín melegíti, majd a hő turbulens transzporttal jut a magasabb rétegekbe. A felszíni sűrűlódás alapvetően befolyásolja a szélmező alakulását – így a cserefolyamatokat is a földfelszín és a szabadlégkör között (Arya, 2005). Egy általánosan elfogadott definíciót Glickman (2000) fogalmaz meg:

„A mikrometeorológia a meteorológia azon ága, mely a – közelítőleg – 1 km-nél kisebb és 1 napnál rövidebb tér- és időskálájú folyamatokkal (mikroskála), illetve azok megfigyelésével foglalkozik. A mikrometeorológiai folyamatok a felszíni sűrűlódás által meghatározott sekély rétegre korlátozódnak (kevésbé nagyobb jelenségek, mint például a konvektív termikék már nem képezik a mikrometeorológia tárgyát). Ennélfogva a mikrometeorológia tárgyát a planetáris határréteg legalsó rétege, a felszínközeli réteg alkotja. Lényeges témakörök a felszín-légkör cserefolyamatai (energia, nyomanyagok stb.). A mikroklimatológia a mikrometeorológiai folyamatok hosszú időre vett átlagait írja le, míg a mikrometeorológia elsősorban a fluktuációikban érdekelt.”

Méréstechnikai szempontból közelítve a mikrometeorológiai mérések tárgyát képezik:

- profilmérések,
- 3D határréteg struktúrák,
- felszíni energiamérleg komponenseire vonatkozó mérések,
- a szenzibilis és látens hőáramok meghatározását szolgáló technikák,
- sugárzásegyenleg komponenseire vonatkozó mérések,

- a talaj hőáram- és hőtárolás karakterisztikáinak meghatározása,
- a turbulens áramok meghatározása, a mikroskálájú turbulencia spektrumának vizsgálata,
- momentum, energia, nyomgázok, aeroszol részecskék transzportfolyamatai,

E folyamatok időskálája 0,0001 és 10 Hz, vagy annál nagyobb frekvenciák között mozog (Foken és Nappo, 2008), így a mérési eljárásoknak képesnek kell lenni e folyamatok, s így a fluktuációk követésére is. A mikrometeorológiai megfigyelések alapeszközei a mérőoszlopok, mérőtornyok, a kötött-ballonos, illetve kvadrokopteres vertikális szondázó eszközök, továbbá a távérzékelési eszközök (lidar, sodar, RASS, 3D határréteg „tomográfok”).

Látható, hogy a mikrometeorológiai kutatások során támasztott követelmények, így az alkalmazott műszerek és eljárások több ponton eltérnek a hagyományos, szinoptikus megfigyelő-hálózattól, melyet a mérések tervezése, kivitelezése, illetve az adatfeldolgozás során is figyelembe kell venni. Természetesen, vannak e két mérőrendszer között átmenetek, kapcsolatok. Gondoljunk csak az USA MESONET rendszerére (Shafer et al., 2000; Fiebrich és Crawford, 2001), vagy a tibeti fennsíkon kialakított mikrometeorológia mérőhálózatra (Ma et al., 2020).

A fentiekből következik, hogy a mikrometeorológiai mérőhálózatok esetén nem alkalmazhatók ugyanazok a minőségbiztosítási és minőség-ellenőrzési folyamatok, melyek a sztenderd meteorológiai mérésekre lettek kidolgozva (Meek and Hatfield, 1994; Zahumenský 2004; Estévez et al., 2011). Szükség van szakterület-specifikus irányelvekre. A következőkben a mikrometeorológiai mérések minőségbiztosításához kapcsolódó szakirodalmi példákat tekintünk át, különös figyelmet fordítva az adatok utófeldolgozására. Az adatfeldolgozás folyamata általánosságban négy különálló lépésre bontható (Tordai, 2020):

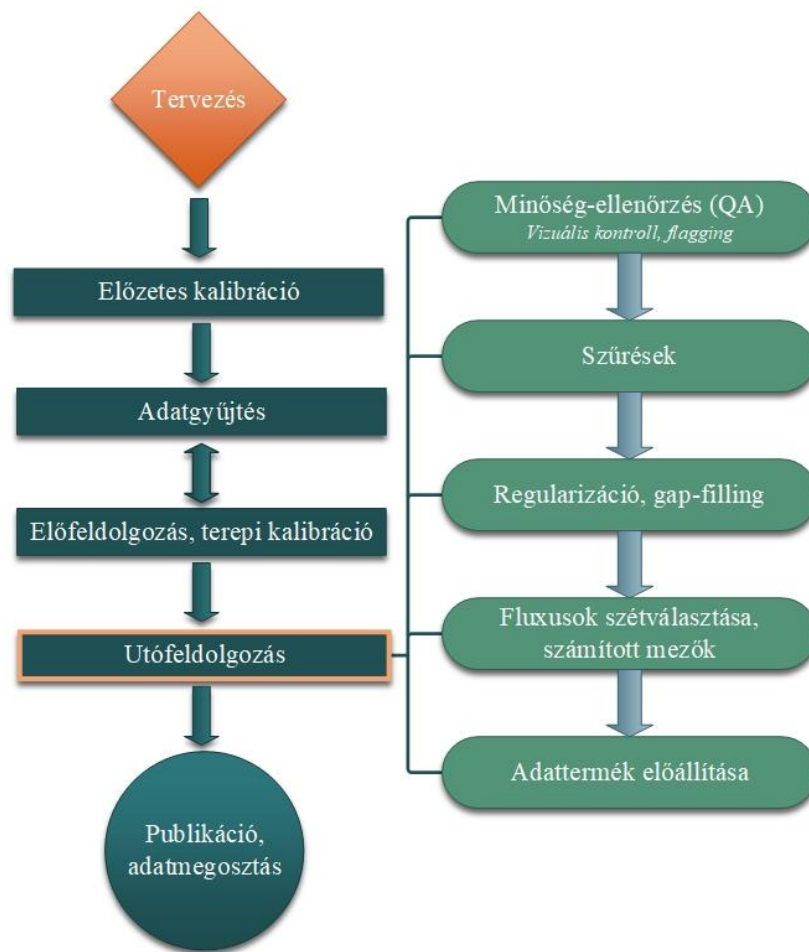
1. a meglévő adatok ellenőrzése, hibakeresés, outlier-analízis,
2. adatkorrekció – nem korrigálható adatok mellőzése, alkalmazott korrekciók dokumentációja,
3. meglévő adatokon alapuló új adatok előállítás (statisztikák, más változók, indexek) – a számítási módszerek dokumentációja mellett,
4. az adatsorok publikációja további felhasználásra (a képzett metaadatokkal együtt).

A FLUXNET program minőségbiztosítási vonatkozásai

A FLUXNET hálózat olyan nemzetközi mikrometeorológiai mérések hálózata, mely az Eddy-kovariancia technikát felhasználó regionális mérő-hálózatokat kapcsolja össze. Célja a mérési adatsorok harmonizációja, abból adatproduktumok előállítása (Baldocchi et al., 2001). Ennek érdekében a program keretén belül számos, kifejezetten mikrometeorológiai tematikájú adatfeldolgozási és minőségbiztosítási módszertan került kialakításra, melyek az egyes mérési kampányokat kivitelező kutatók számára is iránymutatást jelentenek. A programban hazai mérőhelyek is szerepelnek, így a hegyhátsági mérőtorony (Barcza et al., 2020) és a bugaci fűfelszín feletti mérések (Nagy, 2010).

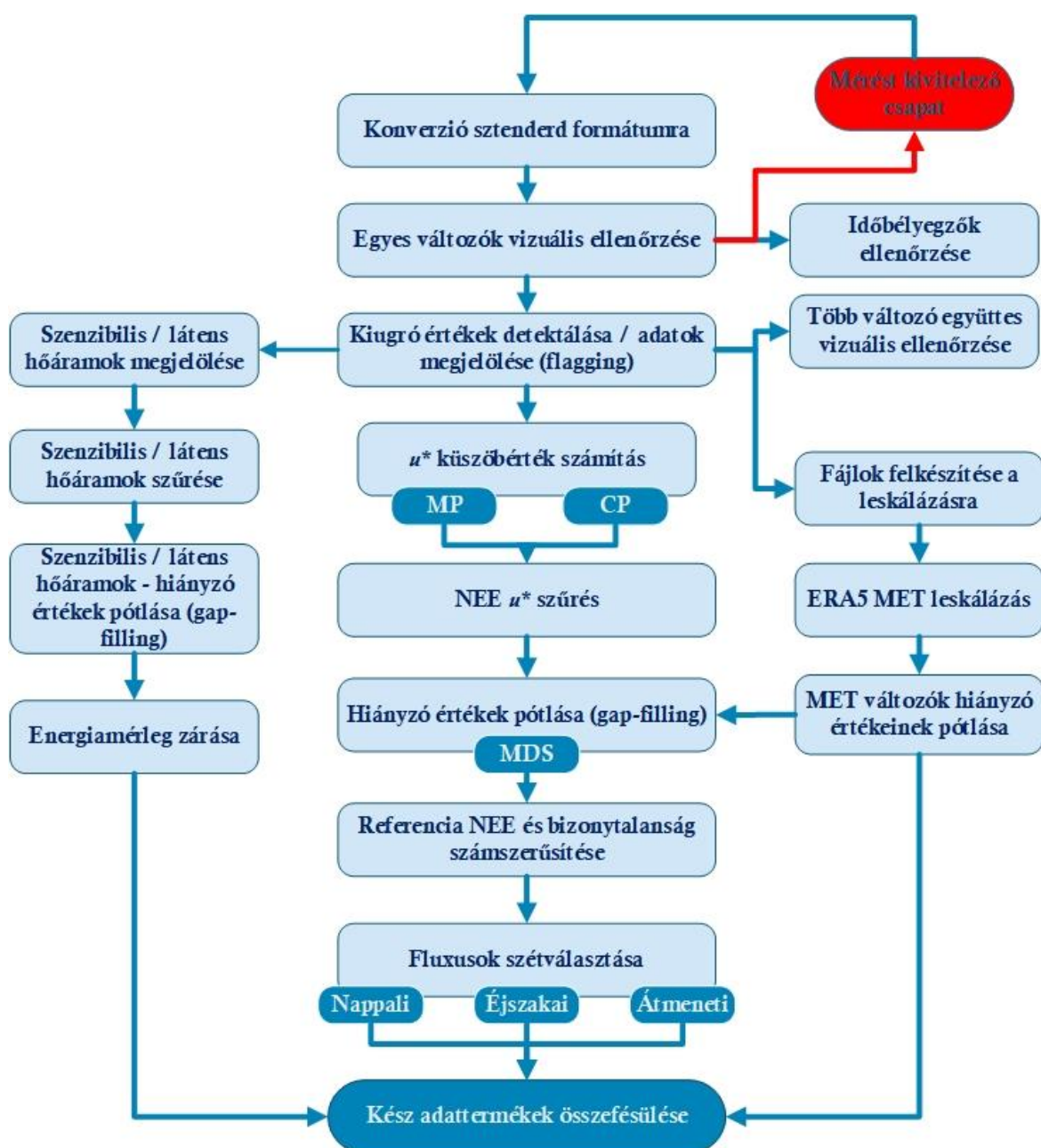
Pastorello et al. (2020a,b) munkájukban a FLUXNET mikrometeorológiai adatbázis-rendszer tapasztalatait felhasználva az utófeldolgozás folyamatát 5 különálló részfolyamatra osztja, melyet a 5. ábra szemléltet:

1. Minőségbiztosítás – ideértve az adatok vizuális ellenőrzését, és a feltételezhetően hibás adatok megjelölését (manuálisan, illetve automatizált eljárásokkal).
2. Szűrések végrehajtása.
3. Adatsorok egységesítése (regularizációja), adathiányok kezelése (gap-filling).
4. Származtatott mennyiségek számítása (pl. mikrometeorológiai mérések esetén szenzibilis és látens hőáramok, a talajba jutó hőáram, valamint a felszíni energiamérleg lezárási bizonytalanságainak számításai (Foken et al., 2012b)).
5. Kész, ellenőrzött adattermék előállítása (megfelelő formátumban).



5. ábra – A meteorológiai mérések kivitelezésének folyamata, kiemelve az utófeldolgozás legfontosabb részfolyamataival (Pastorello et al., 2020a,b alapján)

Az utófeldolgozást hagyományosan a mérési programért felelős kutatóintézmény végzi. A FLUXNET megközelítésében az utófeldolgozás több részfolyamatra válik szét (6. ábra); az alapvető feldolgozási technikákat követően az adatok a nemzetközi hálózatba kerülnek, ahol részletes minőségbiztosítási- és minőség-ellenőrzési protokollon mennek keresztül. Először az adatok formátumának konverziója történik meg, majd a mért változókat egyesével, illetve együttesen is ellenőrzik. A kiugró értékeket részben automatizált eljárással detektálják, illetve megjelölik (flagging). Ezután a szenzibilis és látens hőáramok napszak és stabilitás szerinti szétválasztása történik, melyek minőségbiztosítását automatizált eljárásokkal végzik. Határérték-teszteket végeznek a dinamikus sebességre (u^*) és a teljes ökoszisztéma kicserélődére (NEE – net ecosystem exchange). A hiányzó adatokat az ERA5 adatbázisból pótolják. A kész adatermék a fenti folyamatok eredményeinek és metaadatainak „összefésülésével” áll elő.



6. ábra – Az adatok minősbiztosítási folyamata a FluxNET programban Pastorello et al 2020a,b cikkei alapján) u^* = dinamikus sebesség, NEE = teljes ökoszisztéma kicserélődés (net ecosystem exchange)

A mikrometeorológiai mérések során a magas adatminőség biztosítása iránti igény kiemelkedő, tekintettel a mérések tárgyát képező mikroskálájú fluktuációkra és gradiensekre. (Rollenbeck et al., 2016). A minősbiztosítási folyamatnak ki kell terjednie a mérés technikai eredetű problémák (pl. szenzorhiba, mintavételezési hibák) és a fizikai okok folytán fellépő problémák szűrésére is (Vickers and Mahrt, 1997). Mivel egységes, széleskörűen elfogadott, sztenderd módszertan nem áll rendelkezésre; minden esetben az adott kutató választja az alkalmazott eljárásokat, erre mutat példát Zahn et al. (2016)

munkája. Cikkében olyan mikrometeorológiai minőség-ellenőrzési módszertant javasol, melynek fő szempontja az automatizálhatóság és az alkalmazott tesztek egyszerűsége. Ez a módszer alkalmas arra, hogy nagymennyiségű adaton gyors szűrési eljárásokat alkalmazzon, melyek során az adatminőséget jellemző mutatók számítása és azok alapján az adatsorok megjelölése (flagging) történik.

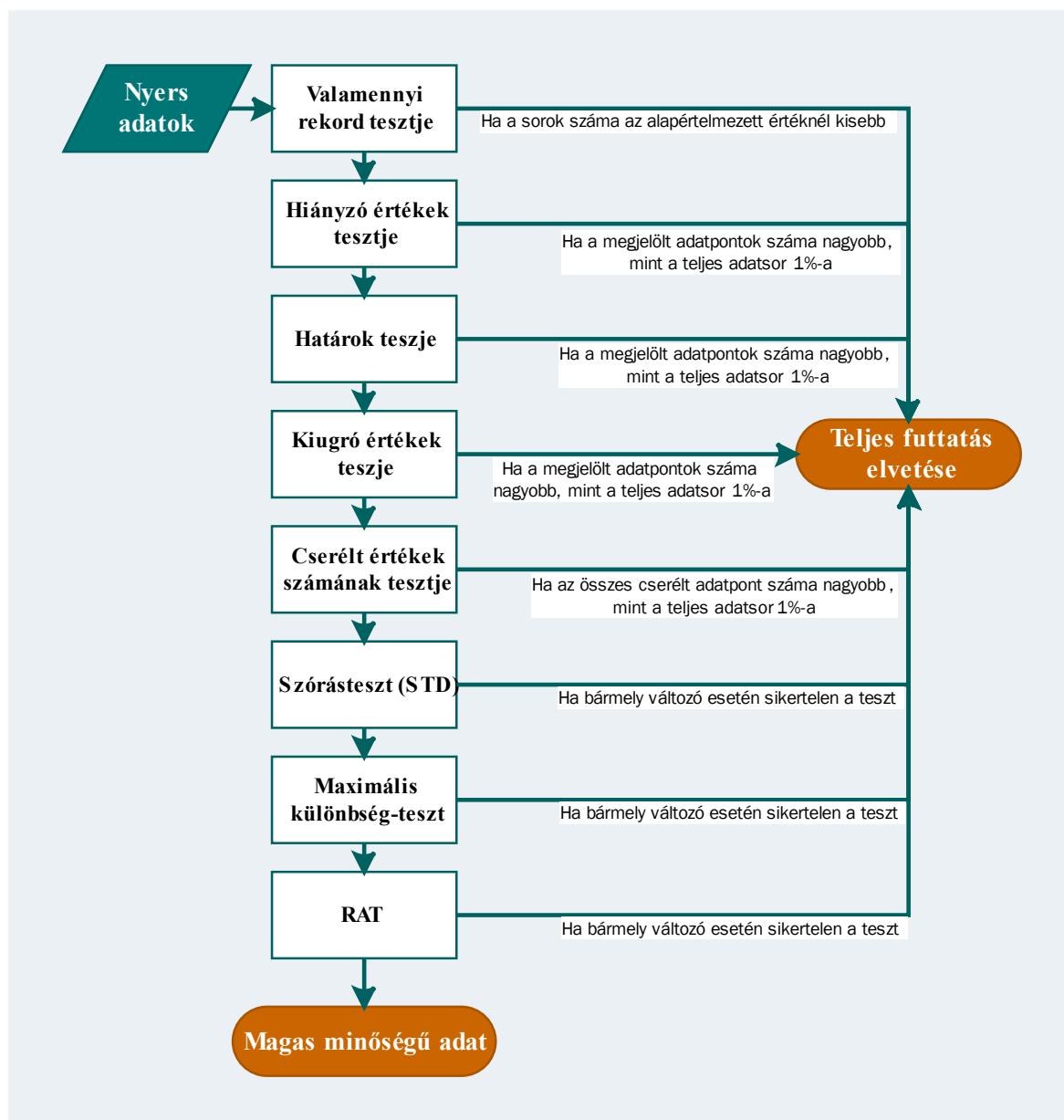
Mikrometeorológiai mérések során alkalmazott két legelterjedtebb módszer, a Monin-Obukhov-féle hasonlósági elmélet és az Eddy-kovariancia módszer egyaránt megköveteli a vizsgált adatsorok stacionaritását (Arya, 2001; Foken és Nappo, 2008). Az Eddy-kovariancia módszer ezen felül csak teljesen fejlett turbulencia esetén alkalmazható (Foken, 2012). Ebből következően az alkalmazott minőség-ellenőrzési rendszernek ezeket a szükséges feltételeket is ellenőriznie kell. A javasolt módszer alkalmazásának folyamatát a 7. ábra szemlélteti. A szerző feltételezi, hogy egy futtatás egy átlagolási periódusra vizsgált nagyfrekvenciás adatot vizsgál (a vizsgált cikk esetén ez 30 perces átlagolási időtartamot, 10 Hz-es mérési felbontást, és így egy állományban 18000 sort/rekordot jelentett). Ez a megközelítés előrevetíti, hogy ha az alkalmazott adatstruktúra ettől eltér, érdemes az adatok ilyen formátumú átalakítása. Megjegyzendő, hogy a módszertan nélkül is alkalmazható – ebben az esetben a tesztek során alkalmazott küszöbértékek módosítására lehet szükség.

A cikk alapján javasolt tesztek sorrendben a következőképpen foglalhatók össze:

1. Rekordok számának tesztje – alapvető teszt a mérési frekvencia teljesülésére, az egy állományon belül található rekordok száma meg kell, hogy egyezzen az előzetesen várttal.
2. Hiányzó értékek tesztje – a különböző adatgyűjtők által NAN, NA, -9999, stb. jelölések által jelzett adathiány számszerűsítése. A futtatás 1%-nál nagyobb adathiány esetén kerül elvetésre.
3. Határok tesztje – számos minőségbiztosítási eljárás részét képezi (Vickers and Mahrt, 1997; Mauder et al., 2006; Mauder et al., 2013). Minden egyes változóra előre definiált alsó és felső határérték alapján dönt, melyek mérési programonként különbözőek lehetnek. A határértékek szűkítése a fals-pozitív találatok esélyét növeli.
4. Kiugró értékek (tűskék) tesztje – a döntés régebbi szakirodalomban a teljes futásra vonatkozó mozgóátlag alapján történt (Vickers and Mahrt, 1997), újabb források a

- 30 perces adatszszakaszok (mozgó) mediánja és a medián abszolút eltérése alapján döntenek (Mauder et al., 2013).
5. Lecserélt értékek számának tesztje – a megelőző lépésekben futtatott tesztek alapján lecserélt értékek számát vizsgálja. Amennyiben az összes csere száma meghaladja a teljes idősorban található értékek 1%-át, a futás elvetésre kerül. Mauder et al., 2013 cikkében 10%-os küszöbértéket javasol.
 6. Szóráseszt (STD test) – amennyiben egy szenzor felbontása nem elégséges a nagyfrekvenciás (gyors) fluktuációk detektálására, az adatsor vizuálisan „lépcsős” szerkezetet mutathat. Hasonló problémák adódhatnak műszerhibák folytán is. Ezeket a hibákat szűrendő a változók szórásaira vonatkozó teszt végezhető (az elvetési határérték és a vizsgált időtartomány mérésről mérésre változhat – optimalizációs kérdése). Zahn et al. (2016) ebben a lépésben lineáris detrendálást alkalmaz az idősoron, majd 2 perces időablakokat vizsgálva (900 adatpont) számítja a szórásokat, melyeket az előre definiált határértékekkel vet össze.
 7. Maximális különbségek tesztje – Ezt a tesztet a szerző a lineáris detrendálás után továbbra is nem-stacionárius viselkedés detektálására javasolja. Az eljárás során valamennyi változó fluktuációjának lineáris detrendálását végzi, majd a 30 perces fluktuációk mozgómediánjának legmagasabb és legalacsonyabb értéke közti abszolút különbség alapján dönt (előre definiált küszöbérték szerint).
 8. Fordított elrendezés teszt (RAT) – trendek kimutatása és további nem-stacionárius viselkedése céljából futtatott statisztikai teszt. Zahn et al. (2016) alapján kizárólag a lineáris detrendálás után használható hatékonyan. A módszer részletes leírása és az elfogadási tartomány értéktáblázata Bendat and Piersol (2010) művében olvasható. Lényege, hogy az idősorban található megfigyelések száma (N) alapján a módszer kiszámítja a fordított elrendezések számát (A), majd adott szignifikancia-szinten (α) a következő elfogadási tartomány alapján dönt [1]:

$$A_{N;1-\frac{\alpha}{2}} < A < A_{N;\frac{\alpha}{2}} \quad [1]$$



7. ábra – Mikrometeorológiai adatokon végzett egyszerű tesztek és azok kimenetei Zahn et al. (2016) alapján

Az Eddy-kovariancia módszer minőségbiztosításának elterjedt módja a Bayreuth-i Egyetemen fejlesztett, FORTRAN nyelven íródott TK3 szoftver alkalmazása (Mauder et al., 2008; Mauder és Foken, 2015). Már elődje, a TK2 program alkalmas volt valamennyi turbulencia-mérés utófeldolgozására, valamint minőségellenőrzött fluxusok számítására (Foken et al., 2004), a CarboEurope közösség minőségbiztosítási sztenderdként fogadta el (Göckede et al., 2008). A TK3 minden számítási lépésben minőségbiztosítási jelölőket használ az adatminőség értékelésére (flag-ek), melyek alapján az adat végső minősítést kap (Foken et al., 2012b). Ez a minősítés 3 adatminőség-osztályt különít el:

- 0. osztály (Class 0) – magas adatminőség, alapvető kutatásokban használható adatok.
- 1. osztály (Class 1) – közepes adatminőség, hosszútávú mérési programokban alkalmazható adatok.
- 2. osztály (Class 2) – alacsony adatminőség, hiányzó adatok pótlása (gap-filling) szükséges.

2.6 Metaadatok típusai, dokumentációjuk

Amennyire lehetséges, kerülni kell az inhomogenitásokat az adatsorokban. Gondoljunk például a mikrometeorológiai mérésekre, ahol a horizontálisan homogén és stacionárius turbulencia az Eddy-kovariancia módszer alkalmazásának szükséges feltétele. A feltétel teljesülését különböző homogenitási tesztek segítségével tudjuk ellenőrizni (Foken and Nappo, 2008; Aubinet et al., 2012; Zahn et al., 2016). Amennyiben a szükséges feltételek mégsem teljesülnének (pl. szenzor-meghibásodás és -csere, változó mérési körülmények, technikák), az utólagos, statisztikai módszerekkel történő homogenizáció, illetve adathiány feltöltésére más forrásokból (gap-filling) megoldást jelenthet (Zahn et al., 2016, Gunawardena et al., 2022). Ennek azonban előfeltétele, hogy a mérésekről és a mérőeszközökről megfelelő dokumentáció álljon rendelkezésre: ezek a metaadatok. A metaadatok a mérőrendszerre vonatkozó részletes nyilvántartás, mely a lehetséges legtöbb információt tartalmazza a telepítés kezdetétől fogva az ellenőrzéseken, változtatásokon át egészen az adatok feldolgozásának végéig. A pontos és részletes nyilvántartás szerepe jól bemutatható az Országos Meteorológiai Szolgálat weboldalán elérhető, több mint 100 éves, homogenizált állomási adatsorok segítségével. [5 – met.hu/eghajlat] Megtalálhatóak itt az egyes állomások részletes történetei, az alkalmazott mérési eljárások és azok változásai, a különböző meteorológiai paraméterek számításának módja, valamint maguk az ellenőrzött adatok is lekérdezhetőek, letölthetőek. Az adatok letöltésére már az új Meteorológiai Adattárban is lehetőség nyílik [6 – odp.met.hu], ahol az állomási adatokon túl a kapcsolódó metaadatok, illetve számos más produktum is elérhető. Szintén A metaadatok jellemzően számítógépes adatbázis formájában kerülnek tárolásra; így lehetőség adódik gyors lekérdezésekre, illetve frissítésekre. A WMO általános javaslatot fogalmaz meg az automata mérőrendszerek metaadataira vonatkozóan, amely útmutatásként szolgálhat a kutatási célú mérési programok számára is. Ugyanakkor fontos megemlíteni, hogy egyes részterületek (pl. agrometeorológia, repülésmeteorológia, mikrometeorológia) metaadat-igényei eltérhetnek

az általános javaslatoktól (Anda et al., 2010; Muller et al., 2013). A WMO iránymutatása (WMO, 2018) alapján egy metaadat-adatbázis kötelező elemei a következők:

- a. Mérőhálózatra vonatkozó információk:
 - i. Üzemeltető szervezet, kontaktszemély, mérőhálózat típusa, célja.
- b. Mérőállomásra vonatkozó információk:
 - i. Adminisztratív jellegű információk (üzemeltetésért felelős személy).
 - ii. Elhelyezkedés: földrajzi koordináták, tengerszint feletti magasság(ok).
 - iii. Közvetlen és távoli környezet, tereptárgyak, akadályok leírása (minden szögben kiegészítve fotódokumentációval).
 - iv. Műszerek elhelyezkedése az állomáson belül.
 - v. Adatátviteli berendezések, tápegységek, kábelek leírása.
 - vi. Klimatológiai leírás.
- c. Egyes mérőműszerekre vonatkozó adatok:
 - i. Típusa: gyártó, modell, sorozatszám, működési elv(ek).
 - ii. Teljesítmény-jellemzők (méréshatárok, mérési frekvencia, pontosság, kimenő jel formátuma).
 - iii. Kalibrációs adatok, kalibráció ideje és helye.
 - iv. Elhelyezkedés és kitettség: rögzítés módja, árnyékolás, felszín feletti magasság (kiegészítve térképpel).
 - v. Mérési program általános leírása.
 - vi. Megfigyelés gyakorisága – amennyiben van.
 - vii. Megfigyelő személy neve – amennyiben van.
 - viii. Adatgyűjtésre vonatkozó információk: mintavételi és kiírási frekvenciák.
 - ix. Adatfeldolgozási módszerek és algoritmusok dokumentációja – beleértve a gyártó(k) által szolgáltatott dokumentációt és programokat is.
 - x. Preventív és korrektív karbantartások adatai: végző személy, cél, érintett műszerek, eredmények.
 - xi. Adatminőségi mutatók (flags).

Alapos áttekintést nyújt a felmerülő metaadatok kategóriáit illetően a WMO Integrált Globális Megfigyelőrendszer (WIGOS – WMO Integrated Global Observing System)

leírását tartalmazó WMO-kiadvány (WMO, 2019). Az előfordulót metaadatokat 10 kategóriába sorolja, melyeket a 2. táblázat foglal össze:

2. táblázat – A WMO WIGOS rendszer által alkalmazott metaadat-kategóriák WMO (2019) alapján

Kategória	Leírás
1. Megfigyelt változó	Megfigyelt meteorológiai állapothatározó alapvető karakterisztikáinak és a keletkező adatsorok leírása. Térbeli reprezentativitásra vonatkozó adatok. A megfigyelés által leírt biogeofizikai folyamatok.
2. Megfigyelés célja	A megfigyelés fő alkalmazási területei. Megfigyelés keretprogramja, illetve a megfigyelőhálózat megnevezése – amennyiben van.
3. Állomás / platform	A megfigyelések helyeül szolgáló létesítmény komplex leírása – beleértve a helyhez kötött, illetve mozgó állomásokat és távérzékelési eszközöket is.
4. Környezet	A megfigyelés földrajzi környezetének leírása.
5. Műszerek és megfigyelési módszerek	Megfigyeléshez használt módszerek, mérőműszerek karakterisztikáinak részletezése.
6. Mintavételezés	Mintavételezés folyamatának és frekvenciájának részletezése.
7. Adatfeldolgozás- és továbbítás	Az adatfolyam útjának leírása a nyers adatok keletkezésétől a meteorológiai változókká alakításon át a végfelhasználók felé történő adattovábbításig.
8. Adatminőség	Az adatminőséget jellemző körülmények és a megfigyelés nyomon követhetőségének leírása.
9. Tulajdonjog és adatpolitika	Megfigyelések tulajdonosa, felelős személyek, résztvevők (személyek és intézmények), adatpolitika (nyílt, zárt stb.)
10. Kapcsolat	A megfigyelésre vonatkozó információk, illetve a megfigyelési adatok elérhetősége, kontaktszemélyek elérhetőségei.

Diplomamunkám témájához szorosan kapcsolódik a közelmúltban indult CA20108 – FAIR Network of micrometeorological measurements (FAIRNESS) nevű 2021 őszén indult COST program (<https://www.cost.eu/actions/CA20108/>, Milošević et al., 2022). Elsődleges célkitűzése egy olyan mikrometeorológiai tudásmegosztó platform létrehozása, mely főként Európai, minőségbiztosított mikrometeorológiai mérési adatok egységes adatbankját hozza létre. Szintén cél a mérési technikák és eljárások harmonizálása, közös irányelvek kidolgozása mind a mérések, mind az adatfeldolgozás, mind a kapcsolódó metaadatok struktúráját illetően. E program keretein belül tervezett a különböző mikrometeorológiai adatbázisok sztenderdizációja is. Diplomamunkám készítésének idején a programhoz kapcsolódó metaadat-struktúra kidolgozása zajlik – a korábbi fejezetekben ismertetett alapvető irányelvek és a nemzetközi kutatóhálózat tapasztalatai alapján. A programban Magyarországról az OMSZ, az ELTE Meteorológiai Tanszék és a Szegedi Tudományegyetem Éghajlattani és Tájföldrajzi Tanszék munkatársai vesznek részt.

2.7 Meteorológiában alkalmazott adatformátumok

A meteorológia tudományában az adatok kulcsfontosságúak; így a tárolásuk, megosztásuk, értelmezésük lényeges kérdés (Sherstnyov et al., 2016). Mint az előző alfejezetben bemutattam, a metaadatok az adatok értelmezéséhez, alkalmazásához szükséges elengedhetetlen elemek. A kifejezetten meteorológiai célú adatformátumok fontos tulajdonsága tehát, hogy hordozhatóak (rendszer-függetlenek) és önleírók („self-describing”). Ezeknél a formátumoknál az adatfelhasználónak nem szükséges ismernie a fájlok struktúráját, azt a megfelelő szoftverek olvassák. Továbbá ezek az adatformátumok alkalmasak az adatsorról, illetve annak változóiról metaadatok tárolására (pl. koordináták leírása, mértékegységek, időformátum), melyek a felhasználó által lekérdezhetőek. Mivel dolgozatomban számos pontján érintem az adatok kezelésének és minőségbiztosításának kérdéskörét, így nem nélkülözhető a meteorológia „saját” adatformátumaink rövid ismertetése. Ebben az alfejezetben három elterjedt formátumról teszek említést, melyek: a netCDF, a HDF és a GRIB.

A netCDF (Network Common Data Form, kiterjesztés: .nc) kifejezetten tömbökbe rendezett (több-dimenziós adathalmaz) adatok tárolására és megosztására készült hordozható adatformátum. Az University Corporation for Atmospheric Research (UCAR) fejleszti, már 1988-tól kezdve. Önleíró; fejléccet tartalmaz, amely a fájl-és az abban elhelyezett adatok

struktúráját írja le, továbbá itt tároltak a metaadatok is. A dimenziók és a változók tárolása elkülönül. A netCDF metaadatok formátumára 2 elterjedt sztenderd konvekció létezik; a COARDS és a CF (Climate and Forecast). Ezek a sztenderdek definiálják az alkalmazott változók és attribútumok neveit, továbbá megadásuk módját, ezáltal elősegítve a különböző forrásból származó adatok összehasonlíthatóságát. A CF konvenció visszafelé kompatibilis a COARDS-szal.

A HDF (Hierarchical Data Format, kiterjesztés: .hdf, .h5, .hdf5, .he5) adatformátumot eredetileg a National Center for Supercomputing Applications fejlesztette ki. jelenleg két verzióban elérhető; HDF4 és HDF5. A formátum két verziója teljesen különbözik, ennél fogva inkompatibilisek. A HDF adatmodellje egy Unix hierarchikus fájlstruktúrához hasonló (POSIX-szerű szintaxis).

A HDF függvénykönyvtárak alapból nem alkalmasak földrajzi adatok (geolokáció), időadatok (idősorok), valamint metaadatok kezelésére, ehhez a HDF-EOS formátumkiterjesztés szükséges. A HDF5 B-fastruktúrát alkalmaz az adattáblák indexeléséhez, mely gyors adatkezelést tesz lehetővé. A netCDF legújabb, 4-es verziója a HDF5-re épül.

A GRIB (Gridded Binary, kiterjesztés: .grib, .grb, .gb) a legelterjedtebb meteorológiai célú adatformátum; valamennyi meteorológiai szolgálat használja, a WMO sztenderd formátuma (GRIB FM 92-IX). Kialakításának célja a nagy adatmennyiségek megbízható és gyors továbbítása volt adatközpontok között. Egy vagy több rekordot tartalmaz, melyek szekvenciális bitfolyamként kerülnek tárolásra. Minden rekord fejléccel kezdődik, mely előjel nélküli, 8 biten tárolt számsorból áll. Két verziója létezik, a GRIB-1 eredeti és az új GRIB-2.

A GRIB-1 formátum esetén minden rekordhoz két horizontális dimenzió, egy idődimenzió és egy magasságdimenzió tartozik. A GRIB-2 formátum már több horizontális és vertikális rácspontot is képes egyidejűleg kezelni. A formátum önleíró jellege kevésbé szembetűnő, mint a netCDF és a HDF esetében; valamennyi önálló rekord tartalmaz minden információt a benne tömörített adatok kitömörítéséhez – nincs szükség a rekordok struktúrájának ismeretére. Ez az adatformátum nagy előnye is; több GRIB formátumú adatfájlt egyszerűen konkatenálva az eredményfájl értelmezhető marad. Ugyanakkor a változókat indikátor paraméterek jelölik (egyezményesek), melyeket egy előre megadott táblázat (lookup table)

alapján lehet azonosítani, így az adatok értelmezéséhez ezekre szükség van. Operatív gyakorlatban az időjárási modellek reanalízisei és előrejelzési produktumai többségében ebben a formátumban készülnek.

3. Adatbázisba rendezett mikrometeorológiai mérések

Az ELTE Meteorológiai Tanszéken számos, szerteágazó mikrometeorológiai kutatási projekt futott (Weidinger, 2012), illetve folytatódik a mai napig. Gondoljunk például az AgroMo integrált biogeokémiai és mezőgazdasági modellrendszerre [7 – agromo.atk.hu], amelyben a terepi mérések (kísérleti környezetek) és a számítógépes modellfejlesztés is fontos szerephez jutnak (Barcza et al., 2018). Szintén jelentős kutatás kötődik a Hegyhátsági mérőtoronyból származó, több mint 21 éves mérési adatbázishoz (Barcza et al., 2020). De nem csupán fix mérőpontos, hanem mobil mérések is zajlanak a Tanszéken. Ilyenek például a kerékpárokkal végzett NO₂, O₃, CO mérések Budapest tipikus útvonalain (Mészáros et al., 2016a,b), vagy a Ferencvárosban végzett városklimatológiai célú hőmérséklet- és nedvességmérések (Pongrácz et al., 2016; Dian et al., 2019). Más kutatások az időjárást humán szempontból; a ruházat és az emberi hőérzet alapján vizsgálják (Ács et al., 2021). Dolgozatomban azokat a mérési programokat ismertetem, melyekben személyesen részt vettem.

Az elmúlt 8 évben (2015–2022) számos mikrometeorológiai mérési program valósulhatott meg az ELTE Meteorológiai Tanszék közreműködésével, változatos terepi körülmények között. Voltak – többek között – síkvidéki, magashegyi, barlangi, folyóvölgyi, tavi expedíciók. Bár ezen expedíciók mérési szakaszát az adatok feldolgozása és elemzése követte, egyre sürgetőbb igény mutatkozott arra, hogy valamennyi expedíció adatait egységes adatbázisba rendezzük. Ez volt a dolgozatomhoz kapcsolódó elsődleges gyakorlati feladatom: egységes adatstruktúra kialakítása a különböző mérési adatokból, ezek rendszerezése, strukturálása. Ehhez kapcsolódott az elérhető metaadatok összegzése, azok egységesítése, valamint az adatok minőségbiztosítási szempontú vizsgálata is. A cél, hogy a mérési programok között egységes legyen

- az adatszerkezet: nyers, feldolgozatlan és ellenőrzött adatok rendezése,
- a változónév-struktúra: követve a szakirodalmi ajánlásokat,
- az alkalmazott korrekciók: felhasználva az utókalibrációkat és összehasonlító méréseket,
- a metaadatok formátuma: felhasználva a FLUXNET adatbank tapasztalataira alapuló formátumot (Pastorello et al., 2020a,b), valamint alkalmazkodva nemrég kezdődött COST FAIRNESS program igényeihez [10 – cost.eu],

- fájl- és adatbázisszerkezet: szem előtt tartva az adatsere folyamatának egyszerűségét és a mérésekben résztvevő partnerek igényeit.

A diplomamunkához kapcsolódó – több évet átívelő – gyakorlati munka szorosan kapcsolódik a 2021-ben kezdődött COST FAIRNESS programhoz [10 – cost.eu], melynek célja egy közös mikrometeorológiai tudásmegosztó platform létrehozása (Milošević et al., 2022). Ennek keretrendszere dolgozatom írásának idejében kidolgozás alatt áll. Célunk, hogy e program által egyes méréseink adatai részévé váljanak e nemzetközi platformnak; így a minőségbiztosítási eljárásokon átesett adatok a potenciális adatfelhasználók rendelkezésére állhassanak.

Diplomamunkában azokat a mérési programokat szerepeltetem, ahol – valamilyen szerepkörben – személyesen részt vettem; a terepi mérések tervezésében, kivitelezésében, illetve az adatfeldolgozás folyamatában. E dolgozat tartalmi korlátai nem tennék lehetővé valamennyi mérési program részletes bemutatását, azonban a legtöbb esetben számos publikáció (cikk, előadás, poszter, TDK munkák és szakdolgozat) által ez más platformokon megtörtént, melyekre dolgozatomban is utalok. Célom az egyes mérési kampányok céljainak, módszereinek, eszközeinek bemutatása – kiemelve a minőség-menedzsment és adatkezelési aspektusokat –, az alkalmazott műszerek kiemelése, illetve a végzett korrekciók összefoglalása. Bemutatom a mérési programok során felmerülő interdiszciplináris megközelítés szükségességét, ahol mind a meteorológiai, mind a mérés technikai, mind az informatikai/számítástudományi szempontok megjelennek. Esettanulmányokban illusztrálom munkám néhány válogatott eredményét, valamint egy lehetséges utólagos korrekciós eljárás kidolgozását.

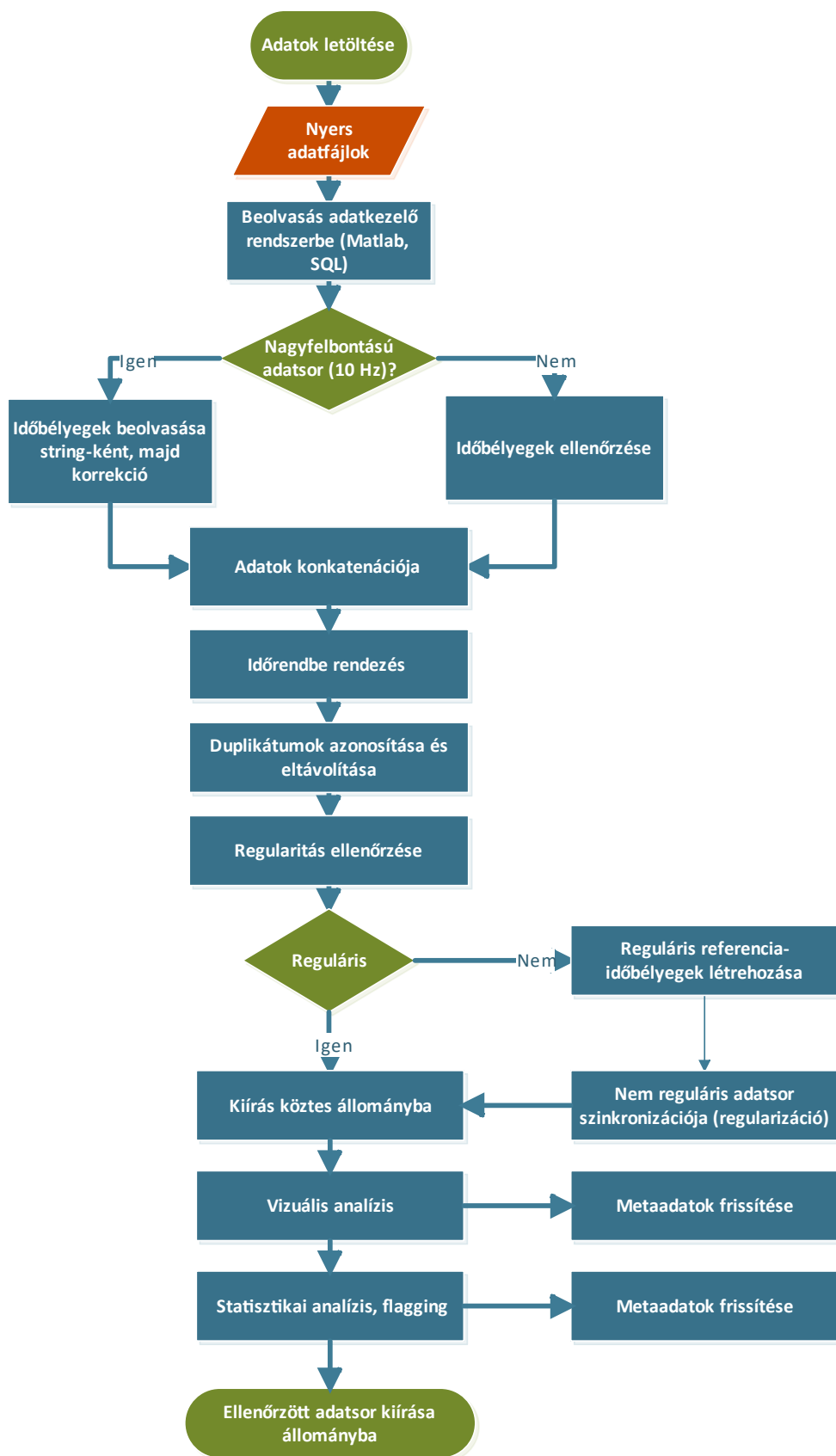
A gyakorlati munka nagyban épít a korszerű informatikai infrastruktúrára és módszertanra, valamint számos adattudományi vonatkozás is felmerül. Így – még a mérési programok részletezése előtt – fontos, hogy az egységesítés céljából felhasznált eszközöket, az adaptált és kidolgozott adatfeldolgozási módszereket, illetve a kialakított adatszerkezetet ismertessem. E kérdésekkel foglalkozom a következő alfejezetben.

3.1 Az adatfeldolgozás módszere, kialakított egységes adatszerkezet

A következőkben az alkalmazott adatfeldolgozási- és minőség-ellenőrzési eljárás folyamatát mutatom be, amelyet a 8. ábra szemléltet. A nyers adatok forrásai elsősorban a

mérésadatgyűjtők, melyekről az adatok letöltését több részletben végeztük. Kisebb adatmennyiségek esetén a mérés végeztével megoldható volt a teljes mérési periódus adatainak letöltése egy-egy állományba, azonban összetettebb műszerezettségű, illetve hosszabb kampányok esetén ez nem volt biztonságosan kivitelezhető. A kiindulási állapot tehát általánosságban több, típusonként azonos szerkezetű adatállomány (jellemzően .csv formátum, .dat kiterjesztés) volt. Ezeket az adatsorokat több mérési program során kiegészítették vertikális szondázások, illetve nem helyhez kötött mérések (mozgómérés), melyeket minden esetben külön, egyedileg dolgoztunk fel. Azonban, mivel az adatok túlnyomó része (beleértve a nagyfrekvenciás mérési adatokat is) az előbbi formátumban állt rendelkezésre, érdemes volt egy általános feldolgozási munkafolyamatot kidolgozni, amely egyben minőség-ellenőrzési funkciókat is ellát (8. ábra).

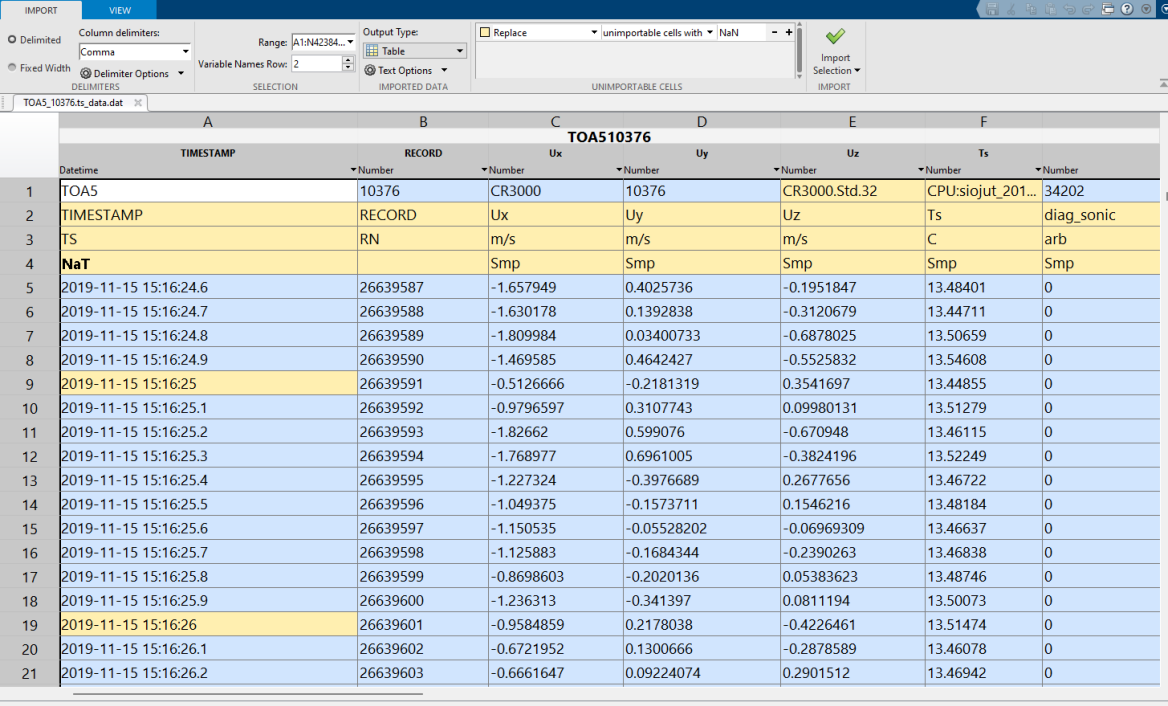
Az eljárás kezdetén a nyers adatfájlokat adatkezelő programba olvastam be. Ehhez virtualizált környezetben futtatott MS SQL szerver, Matlab R2021a és újabb verzióit, illetve a vizuális adatelemzéshez Tableau Desktop szoftvereket használtam. A feldolgozást végző szkriptek legteljesebb verziója Matlab nyelven áll rendelkezésre. A program először beolvassa a megadott adatállományokat előre definiált szabályok szerint (megadandó paraméterek: elválasztó karakter(ek), tizedesjelölő, hiányzó adatokat jelző értékek, fejléc helye, adatok kezdete, adatsor időbeli felbontása). A hiányzó adatpontokat (melyek adatgyűjtő rendszertől függően lehetnek NA, NAN, INF, -9999, illetve 9999 értékkel jelöltek) minden esetben NULL értékre cseréli (Matlab esetén NaN, SQL nyelvű feldolgozás esetén NULL). Amennyiben több adatfájlból történt a beolvasás, valamennyi adatfájl adatsorait egy adattáblában kerülnek összefűzésre (konkatenáció, SQL esetén FULL OUTER JOIN).



8. ábra – A kialakított adatfeldolgozási és minőségbiztosítási munkamenet folyamatábrája.

Ezután következik az időbélyegek azonos formátumra történő konverziója, melynek formátumkódja yyyy.mm.dd hh:MM:ss.SS. Ahol időbélyeg nem áll rendelkezésre (pl. csak év, év napja, illetve idő), ott ezekből az adatokból előállításra kerül az időbélyeg. Amennyiben nagyfelbontású (jellemzően 10 Hz) adatsor kezelése történik, gyakran előfordul probléma, hogy a 0. tizedmásodperc az adatsorban külön jelölést nem kap, itt csak a másodperc szerepel. Ezekben az esetekben az MS SQL továbbra is probléma nélkül felismeri a dátum/idő típust, azonban a Matlab esetén korrekcióra van szükség: az időbélyegeket karakterláncként kell beolvasni (string), a rövidebb láncokat (ahol hiányzik a tizedmásodperc) ki kell egészíteni, majd a teljes változót konvertálni dátum/idő típusra (9. ábra). Ez az (automatizált) mechanizmus a felmerülő problémákat hatékonyan megoldja.

Természetesen előfordulhatnak a letöltések között átfedések; egy időpontra vonatkozó adat több állományban is szerepelhet. Ezért a következő lépésben a duplikátumokat (csak teljes egyezés esetén!) eltávolítja a szkript, a megmaradt adatokat pedig időrendbe rendezi.



	A	B	C	D	E	F
	TOA510376					
	Timestamp	Record	Ux	Uy	Uz	Ts
	Datetime	Number	Number	Number	Number	Number
1	TOA5	10376	CR3000	10376	CR3000.Std.32	CPU:siojut_201... 34202
2	TIMESTAMP	RECORD	Ux	Uy	Uz	diag_sonic
3	TS	RN	m/s	m/s	m/s	C
4	NaT	Smp	Smp	Smp	Smp	Smp
5	2019-11-15 15:16:24.6	26639587	-1.657949	0.4025736	-0.1951847	13.48401
6	2019-11-15 15:16:24.7	26639588	-1.630178	0.1392838	-0.3120679	13.44711
7	2019-11-15 15:16:24.8	26639589	-1.809984	0.03400733	-0.6878025	13.50659
8	2019-11-15 15:16:24.9	26639590	-1.469585	0.4642427	-0.5525832	13.54608
9	2019-11-15 15:16:25	26639591	-0.5126666	-0.2181319	0.3541697	13.44855
10	2019-11-15 15:16:25.1	26639592	-0.9796597	0.3107743	0.09980131	13.51279
11	2019-11-15 15:16:25.2	26639593	-1.82662	0.599076	-0.670948	13.46115
12	2019-11-15 15:16:25.3	26639594	-1.768977	0.6961005	-0.3824196	13.52249
13	2019-11-15 15:16:25.4	26639595	-1.227324	-0.3976689	0.2677656	13.46722
14	2019-11-15 15:16:25.5	26639596	-1.049375	-0.1573711	0.1546216	13.48184
15	2019-11-15 15:16:25.6	26639597	-1.150535	-0.05528202	-0.06969309	13.46637
16	2019-11-15 15:16:25.7	26639598	-1.125883	-0.1684344	-0.2390263	13.46838
17	2019-11-15 15:16:25.8	26639599	-0.8698603	-0.2020136	0.05383623	13.48746
18	2019-11-15 15:16:25.9	26639600	-1.236313	-0.341397	0.0811194	13.50073
19	2019-11-15 15:16:26	26639601	-0.9584859	0.2178038	-0.4226461	13.51474
20	2019-11-15 15:16:26.1	26639602	-0.6721952	0.1300666	-0.2878589	13.46078
21	2019-11-15 15:16:26.2	26639603	-0.6661647	0.09224074	0.2901512	13.46942

9. ábra – Nyers, 10 Hz felbontású állomány manuális importálása Matlab rendszerbe. Az adatsort Campbell Scientific CSAT3+EC150 szenzor és Campbell Scientific CR3000 adatgyűjtőből származik. A kiválasztott adatok között sárga színnel jelöltek az értékek, melyeket a definiált változótípusba nem lehet beolvasni; ezek helyére alapértelmezésben NULL (Matlab esetén NaN) értékek kerülnének. Ezt elkerülendő célszerű az időbélyegek karakterláncként történő beolvasása és korrekciója.

Az ellenőrzött adatsorokkal szemben elvárjuk, hogy reguláris legyen, azaz minden adatpont között azonos legyen az időlépcső, ne legyen hiányzó időpont. A regularitás Matlab nyelven könnyen ellenőrizhető az adattábla „timetable” formátumúvá konvertálása által. Ekkor az elsődleges rendezési (és indexelési) elv a dátum/idő oszlop lesz, melyet az előzőekben létrehoztunk és egységessé tettünk. Ilyen formátumú objektumon az „isRegular” függvény alkalmazható a regularitás ellenőrzésére; eredményeképpen igaz/hamis (0/1) értéket kapunk. Amennyiben az adatsor nem reguláris, a hiányzó időlépcsőket be kell illeszteni, valamint azokat meg kell jelölni. Ehhez minden esetben a program referencia-idősort hoz létre, melynek kezdőidőpontja az adatsor első, záróidőpontja az adatsor utolsó értéke, az időlépcső pedig a megadott érték (10 Hz, 1 másodperc, 1 perc, ... stb.). A referencia idősor is „timetable” típusú objektumként kerül tárolásra. Két „timetable” objektum már könnyen összehasonlítható, sőt szinkronizálható úgy, hogy a referencia idősor valamennyi időpontjához (eleméhez) hozzárendeljük az eredeti adatsor elemeit, amennyiben azok rendelkezésre állnak. Ez SQL rendszerben is hasonlóan történik, adatbázis-kezelési szempontból egyoldali JOIN eljárásról van szó, ahol az egyik halmaz valamennyi eleméhez hozzárendeljük a két halmaz metszetét. Ezután a regularitás teljesülését újra ellenőrizve reguláris adatsort kell kapjunk. Lényeges, hogy az így hozzáadott rekordok meg legyenek jelölve (missing flag), így az adatminőségre vonatkozó kimutatásnál ezek arányát pontosan meg tudjuk adni, illetve az adatok rendelkezésre állását egyszerűen le tudjuk kérdezni. A módszer alkalmazható több adatforrás tetszőleges fix időintervallumra történő összesítésére is. A kapott adattáblát a program egy köztes, .csv formátumú állományba kiírja.

Ezután következik az adatok ellenőrzése 2 módszerrel. Először az egyedi változók, majd több változó együttes vizsgálata történik vizuális módszerrel. Összetett adatsorok esetén ez Tableau Desktop szoftver segítségével történt – a köztes állomány alapján. E vizuális analitikai program segítségével valamennyi változó gyorsan, hatékonyan áttekinthető, így egy előzetes képet kaphatunk az adatsorok minőségéről. Sok jellegzetes hiba (pl.: globálsugárzás 0-tól eltérő értékei éjszaka, kiugró hőmérséklet és relatív nedvesség-értékek, lehetetlen értékek) jól kirajzolódik, így már sejthető lesz, milyen tesztekre és korrekciókra lesz szükség. További előnye a módszernek, hogy egyes kiugró adatpontok részletesen megvizsgálhatók („on-demand” vizuális szűrési eljárás segítségével), így az eltérések felmerülő okai is elemezhetők. Szintén lehetőség van akár egyedi adatpontok, akár adatpontok valamely csoportjának megjelölésére (flagging) – akár minőség-ellenőrzési, akár

további elemzés céljából. Hasonlóképpen az adatsorból tetszőleges tartomány kijelölésével részadatsor is képezhető néhány kattintással.

A vizuális analízist a programozott tesztek, illetve a statisztikai analízis követi. Ebben a lépésben – az irodalmi áttekintés során ismertetett – Zahn et al. (2016) és Pastorello et al. (2020a,b) cikkeiben leírt tesztek és eljárásokat, valamint a WMO és a szakirodalom egyes meteorológiai változókra vonatkozó mérési javaslatait követjük (Strangeways, 2003; Balasubramanian, 2016; WMO, 2018). Nem kerül futtatásra minden esetben minden teszt, viszont az értéktartományok, az időpontok közötti változás nagysága, és a jellemző értékeken alapuló teszt e lépés alapjául szolgálnak. Ebben a pontban a nagyfrekvenciás adatok minőség-ellenőrzése lényegesen eltér a lassú szenzorok adataitól; ezek tekintetében valamely külön erre a célra fejlesztett program (TK3, EddyPro – Mauder és Foken, 2015) szolgál. A lehetséges hibás értékek megjelölésre kerülnek, melyeket utána felülvizsgálunk. Szintén itt történik meg az adatsorok összevetése referenciaadatokkal, vizsgálva a mérések tér- és időbeli reprezentativitását, illetve a szisztematikus hibák (pl. helytelen kalibrációs konstansok) lehetőségét. Amennyiben feltételezhető hiba merül fel, a metaadatok közt jelölésre kerül, és további vizsgálatok következnek. Ezek során a referencia-adatsorokkal vett kapcsolatokat explicit módon (pl. lineáris kapcsolat esetén lineáris regresszió alkalmazásával) vizsgáljuk, ha erre lehetőség van. A mérések sokfélesége következtében ezek eredményére nem lehet általános érvényű kijelentést tenni; tapasztalati úton döntünk. Amennyiben szükséges és megoldható, utólagos kalibráció, illetve empirikus korrekciók bevezetése által javítjuk az adatminőséget. Ezeket az eljárásokat részletesen dokumentáljuk – az elvégzett tesztek és számításokat is beleértve –, majd csatoljuk az adatbankhoz.

Fontos megemlíteni a hiányzó adatok (NaN) problémakörét is. A legtöbb esetben ezek tényleges adathiányt jelölnek, azonban egyes szenzorok esetén, különösen régebbi típusú, pl. CR10X, CR21 adatgyűjtők méréseinél előfordulhat, hogy a valós adathiány a jelöltnél kevesebb. Tipikus példa erre a levélnedvességmérők (Campbell Scientific 237-L Leaf Wetness Sensor) adatsora, ahol ellenállásmérés történik. Teljesen száraz szenzorfelület esetén az ellenállás maximális, mely a méréshatárral egyenlő (8 k Ω), ilyenkor 7999 értékek kerülnek rögzítésre. Előfordul azonban, hogy a régebbi adatgyűjtők kevéssel ennél az értékkel magasabb értéket észlelnek, és mivel programozásukkor a hibakorrekciók lehetősége az újabb változatokhoz képest korlátozottabbak, néhány esetben a méréshatár

túllépése folytán INF vagy NAN értékeket rögzítenek (10. ábra). Ezt a problémát mindenképpen vizsgálni és kezelni kell. A programkódban a kezelése a szomszédos adatpontok vizsgálata alapján történik; amennyiben NAN vagy INF érték 7999 k Ω környezetében van, cserélendő 7999-re (maximumra). Ezen értékek megjelölését és cseréjét is elvégzi a program, ellenőrzése vizuálisan történik.

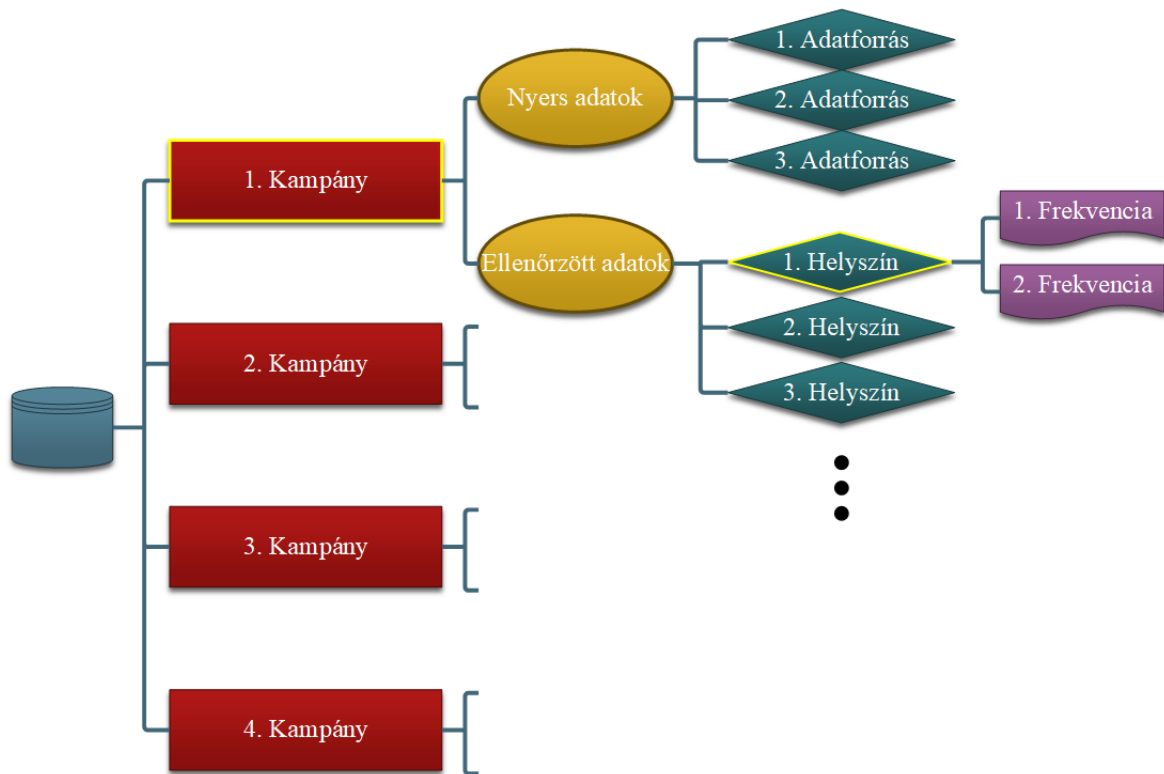
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	TIMESTAMP	RECORD	BattV_Avg	PTemp_C_Avg	Valsala_fent_Avg	leaf_kohms_Avg	AirTC_fent_Avg	RH_fent_Avg	AppTarget_C_Avg	CorrectedT_C_Avg	Schenk_1_Avg	Schenk_2_Avg
2	TS	RN	Volts	Deg C	Counts/Hz	kilohms	Deg C	%	Deg C	Deg C	mV	mV
3	2019.10.17 8:54	2469	13,65	25,93	0,522	INF	13,94	74,55	20,41	20,42	4,294	0,681
4	2019.10.17 8:55	2470	13,65	25,99	0,703	7999	13,98	74,26	20,54	20,55	4,305	0,684
5	2019.10.17 8:56	2471	13,65	26,03	0,812	INF	14,03	73,88	20,65	20,65	4,292	0,683
6	2019.10.17 8:57	2472	13,65	26,09	0,497	INF	14,04	73,62	20,74	20,74	4,287	0,68
7	2019.10.17 8:58	2473	13,65	26,14	0,025	7999	14,13	74,73	20,96	20,96	4,3	0,683
8	2019.10.17 8:59	2474	13,65	26,18	0,678	7999	14,29	74,91	21,11	21,11	4,341	0,688
9	2019.10.17 9:00	2475	13,65	26,24	0,597	INF	14,4	73,24	21,19	21,18	4,339	0,691
10	2019.10.17 9:01	2476	13,65	26,3	0,255	INF	14,46	71,98	21,28	21,28	4,342	0,691
11	2019.10.17 9:02	2477	13,65	26,36	0,313	INF	14,58	72,83	21,55	21,53	4,362	0,691
12	2019.10.17 9:03	2478	13,65	26,42	1,147	7999	14,7	71,87	21,37	21,38	4,369	0,693
13	2019.10.17 9:04	2479	13,65	26,48	0,907	NAN	14,66	71,09	21,37	21,37	4,385	0,699
14	2019.10.17 9:05	2480	13,65	26,53	0,743	7999	14,58	70,76	21,44	21,45	4,392	0,704
15	2019.10.17 9:06	2481	13,65	26,57	0,915	NAN	14,57	71,75	21,72	21,71	4,401	0,704
16	2019.10.17 9:07	2482	13,65	26,62	1,467	INF	14,61	71,72	21,72	21,71	4,412	0,706
17	2019.10.17 9:08	2483	13,65	26,66	1,038	7999	14,61	70,9	21,63	21,61	4,418	0,711
18	2019.10.17 9:09	2484	13,65	26,7	1,6	NAN	14,64	71,13	21,58	21,56	4,436	0,714
19	2019.10.17 9:10	2485	13,65	26,74	1,672	NAN	14,63	71,14	21,38	21,36	4,449	0,718
20	2019.10.17 9:11	2486	13,65	26,76	1,237	NAN	14,61	72,13	21,69	21,64	4,468	0,724
21	2019.10.17 9:12	2487	13,65	26,79	1,262	NAN	14,66	71,43	21,62	21,57	4,471	0,725
22	2019.10.17 9:13	2488	13,65	26,81	0,87	NAN	14,65	71,75	21,74	21,68	4,495	0,73
23	2019.10.17 9:14	2489	13,65	26,83	0,262	NAN	14,7	72,25	21,79	21,74	4,503	0,731
24	2019.10.17 9:15	2490	13,65	26,85	0,673	NAN	14,8	71,84	21,95	21,89	4,513	0,731
25	2019.10.17 9:16	2491	13,65	26,87	0,35	INF	14,9	72,37	21,92	21,87	4,519	0,731
26	2019.10.17 9:17	2492	13,65	26,9	0,758	NAN	15,08	72,04	21,88	21,85	4,53	0,731

10. ábra – A 2019–2020. telén végzett ködmérések egyik mérőpontján végzett mérések nyers adatsorának részlete Microsoft Excel táblázatkezelőbe beolvasva. Látható, hogy a levélnedvesség-szenzor teljesen száraz állapotú, az adatgyűjtő a kapott információt azonban nem minden adatpontban interpretálja helyesen. Az értékek utólagos korrekciója szükséges.

Végül az ellenőrzött adatsor – minőségbiztosítási mutatókkal együtt – kiírásra kerül egy külön állományba. A változónevek kialakításánál a FluxNET program (Pastorello et al., 2020a,b) példáját követtük. Az adatok könnyű kezelhetősége, illetve a mérésben résztvevők közötti adatmegosztás gördülékenysége szempontjait figyelembe véve a lassú szenzorok adatsorait Microsoft Excel (.xlsx) és csv formátumokban állítottuk elő, a nagyfrekvenciás adatsorok csv formátumúak. Igény esetén a kialakított formátumokból gyorsan elő tudunk állítani NetCDF állományokat is (Matlab, illetve R nyelvű programkód is rendelkezésre áll). A metaadatokat egyszerű szöveges formátumban rögzítettük úgy, hogy szükség esetén ezek más formátumba történő konverziója (pl. xml) könnyen megoldható legyen. A metaadat-adatbázishoz csatoltuk a végzett számítások leírását, valamint a számológéptáblákat.

A teljes adatbank (~231 GB) az ELTE számára a Microsoft által biztosított Sharepoint felületen került elhelyezésre, mely teljesíti az adatbiztonságra vonatkozó irányelveket [11 – elte.hu.sharepoint.com]. Előnye továbbá, hogy az egyes adatsorok könnyen megoszthatóak a résztvevők között. Szintén kialakításra került – kísérleti jelleggel – egy az ellenőrzött

adatokat tartalmazó SQL adatbázis is (HYPER-V virtualizált környezetben, MS SQL szerver alapon). Az adatok struktúráját a 11. ábra szemlélteti. Az elsődleges csoportosítási szempont a mérési kampány, melyen belül a nyers adatállományok és az ellenőrzött adatsorok különülnek el. A nyers adatok csoportosítása adatforrás szerint (helyszínek, mérést végzők stb.), az ellenőrzött adatok csoportosítása mérőhely szerint, azon belül pedig mérési frekvencia szerint történt.



11. ábra – Az adatfeldolgozás során kialakított adatstruktúra.

3.1 Feldolgozott mérési kampányok, adatsorok

A diplomamunkához kapcsolódó gyakorlati munka az ELTE Meteorológiai Tanszéken a részvételemmel, közreműködésemmel végzett kutatási programok adataira támaszkodott. Dolgozatom tartalmi korlátai nem tennék lehetővé valamennyi mérési program részletes bemutatását, így azok fő célkitűzéseinek és az alkalmazott módszerek illusztrálása után az adatfeldolgozással és minőségbiztosítással kapcsolatos szempontokat emelem ki. A bemutatott mérési programok a következők:

- 2015, PABLS Határréteg mérési program, Szeged,
- 2016 tavasz, Andok mikroklíma mérési program,

- 2016, Szeged, Nyári határréteg mérési program,
- 2016, Gellért-tározó mikrometeorológiai mérési kampány,
- 2017, Szemlő-hegyi-barlang mikrometeorológiai mérési kampány,
- 2017–2018, Zágráb, agromikrometeorológiai mérések szőlőállományban,
- 2018–2020, Jakabszállás és Villány – agromikrometeorológiai mérések,
- 2018–2021, Köd mikrofizikai kutatási program – Siójut és Pestszentlőrinc,
- + a mérési kampányokhoz kapcsolódó kalibrációs mérések.

A mérési programok sokféleségéből adódóan a nyers adatok struktúrája eltérő. Szerepelnek – a teljesség igénye nélkül – az adatforrások között:

- Terepi mérésadatgyűjtők adatsorai (Campbell Scientific CR10, CR21, CR23X, CR1000, CR1000X, CR3000, CR6).
- Rádiószondás felszállások (kötött ballon, kvadrokopter, GRAW DFM-09).
- Ceilométer adatsorok (Lufft, netCDF).
- OMSZ által szolgáltatott mérési adatsorok.
- Szónikus anemométerek adatai (Gill, METEK USA-1, CSAT-3).
- Low-cost szenzorok kísérleti adatsorai.
- Szinoptikus táviratok (SYNOP) és rádiószonda-felszállások (TEMP) dekódolt adatai.
- USB hőmérséklet-relatív nedvesség (T/RH) adatgyűjtőkkel végzett pont- és mozgómérések adatai.
- Kézi szélességmérővel végzett mozgómérések adatai.

A legtöbb mérési adatsor idősor, rögzített térkoordináták mellett. Külön kezelendők (kiegészítő adatsorként) a rádiószondás felszállások, illetve a mozgómérések (változó idő- és helykoordináták).

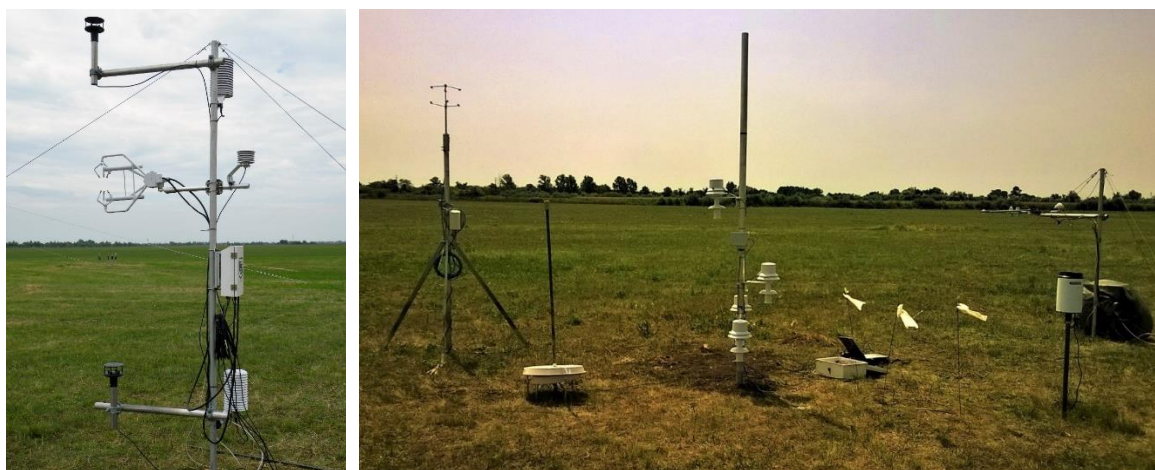
3.2 Mérési kampányok céljai, műszerezettségük

3.2.1 PABLS'15

A Pannon Atmospheric Boundary Layer Experiment Szeged (PABLS) expedíció 2015 nyarán számos hazai (BMGE, Debreceni Egyetem, ELTE, OMSZ, Szegedi Tudományegyetem), és nemzetközi intézmény (University of the Balearic Islands, Palma,

Mallorca, Spain, Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Höxter, North Rhine-Westphalia, Germany, University of Zagreb) közreműködésének köszönhetően került megrendezésre. A mérési program elsődleges helyszínéül a Szegedi Repülőtér szolgált, mivel itt – a nagy kiterjedésű sík felszín következtében – adottak a horizontálisan homogén és izotróp turbulencia feltételei (Weidinger et al., 2016a; Weidinger és Bordás, 2017). A sztenderd mikrometeorológiai méréseket (12. ábra) kiegészítették i) az Országos Meteorológiai Szolgálat Szegedi Magaslégköri Obszervatóriuma által végzett szinoptikus mérések és rádiószondás felszállások, ii) Windprofiler mérések, iii) hosszúhullámú radiométer mérések, iv) felhőalpmérő adatok (LIDAR) is (Tordai, 2016). A kampány főbb célkitűzései voltak:

1. a planetáris határréteg (PBL) fejlődésének, illetve napi menetének vizsgálata,
2. az éjszakai stabil határréteg szerkezetének, kialakulásának vizsgálata – kiemelten a hajnali és esti átmeneti állapotok esetén (Cuxart et al., 2016a),
3. a felszíni energiamérleg komponenseinek nagy pontosságú mérése (Cuxart et al., 2016b),
4. turbulencia-karakterisztikák és fluxusok meghatározása Eddy-kovariancia módszerrel (Salavec, 2017),
5. vertikális hőmérsékleti, nedvességi- és szélprofilok megfigyelése a határrétegben kötött ballonos és kvadrokopteres felszállások által 13. ábra – mérési technikák tesztelése és fejlesztése.



12. ábra – A PABLS'15 expedíció során telepített mérőrendszer részlete. Bal oldalon a BGME által kiépített Eddy-kovariancia oszlop, jobb oldalon (balról jobbra haladva) a METEK USA-1 szónikus anemométer, az aspirált árnyékolóban elhelyezett T107 hőmérők, a billenőedényes csapadékmérő és a sugárzási egyenleg komponenseit mérő oszlop.

A kampány során 4 intenzív megfigyelési időszak (IOP – intensive observational period) került megvalósításra (Cuxart et al., 2016a), melyek során az éjszakai stabil határreteg közel folyamatos, vertikális szondázása történt szakirodalmi technikákra támaszkodva (Poulos et al., 2002; Wrenger et al., 2015). Az ELTE Meteorológiai Tanszék a szondázásokat egy tartós üzemre átalakított GRAW DFM-09 rádiószondával végezte (Tordai, 2016). E rádiószonda gyári kalibrációja (kalibrációs konstansok a szonda EEPROM tárolójába égetve) a 3. táblázatban feltüntetett pontosságot biztosítják, amennyiben – a használati előírásoknak megfelelően – a szonda inicializációja a felszállások előtt a gyártó által biztosított bázisállomás segítségével megtörténik. E folyamat nélkül az adatgyűjtés nem valósul meg; valamennyi felszállás előtt megtörtént az inicializáció – ezáltal is biztosítva a konzisztens adatminőséget.

3. táblázat – A GRAW DFM-09 rádiószonda specifikációi a gyártó szerint [8 – graw.de]

Mért paraméter	Szenzor típusa	Mérési tartomány	Pontosság	Felbontás
Hőmérséklet	Termisztor	–95 °C – +50 °C	±0,2 °C	±0,01 °C
Relatív nedvesség	Kapacitív polimer	0 – 100 %	4 %	1 %
Légnyomás	Piezo-ellenállás	10 – 1100 hPa	±0,5 hPa	±0,1 hPa





13. ábra – Kötött ballonos (fent) és kvadrokopteres felszállások (lent) a 2015-ös szegedi expedíció (PABLS'15) intenzív mérési periódusaiban. A cél hőmérséklet- és nedvesség vertikális profiljainak vizsgálata.

A kampány műszerezettségét, valamint a használt műszerek minőségbiztosítási jellemzőit a Függelék 5. táblázata mutatja be.

A mérési program kivitelezését megelőzően megtörtént a mérőeszközök kalibrációja. A mérőeszközök állapotának ellenőrzése, valamint az adatletöltés rendszeres időközönként biztosított volt. Az adatfeldolgozás során egységes adatbázisba került az ELTE által telepített gradiens-oszlop, a METEK-USA 1 szónikus anemométer (10 Hz), a BGME által telepített Eddy-kovariancia oszlop (10 Hz), valamint az ELTE, az UIB (Universitat de les Illes Balears) és az OMSZ által közösen felépített hőmérséklet-gradiens mérő oszlop. Az adatbázis kiegészült az OMSZ Szegedi Magaslégköri Obszervatóriuma által üzemeltetett szinoptikus mérőállomás adataival (SYNOP táviratok alapján), a Szegedi Reptérre vonatkozó METAR táviratok adatsoraival, valamint a rendelkezésre álló rádiószondás felszállások adataival (TEMP táviratok alapján). A kötött ballonos és kvadrokopteres mérések alapján végzett profilmérések közül a GRAW DFM-09 rádiószonda adatainak feldolgozását végeztük, valamint a kapott eredményeket összehasonlítottuk az UIB által fejlesztett szondázó eszköz méréseivel. Megállapítottuk, hogy az alkalmazott GRAW gyártmányú rádiószondával végzett mérések hiszterézise kicsi – az eszköz kialakításából adódóan –, így alkalmas határrétegben végzett profilmérésekre, az kapott adatok biztonsággal használhatók további feldolgozásokban (Tordai, 2016).

A nagyfelbontású adatok korrekcióját és minőség-ellenőrzését Salavec Péter végezte (Salavec, 2016), mely eredményeit, valamint a feldolgozás során szükségessé váló korrekciók dokumentációt az adatbázishoz csatoltuk.

Valamennyi lassú szenzor adatsorát vizuálisan elemeztük, adathiány két esetben rövid (< 1 nap) merült fel. Sajnos a CNR-1 sugárzásegyenleg-komponensmérő technikai problémák miatt nem működött. Más műszerek esetén sem az expedíció során, sem a

feldolgozás alatt nem észleltünk szignifikáns eltérést, illetve szisztematikus hibára utaló jelet (Tordai, 2015).

A lassú szenzorok adatai esetén lehetőségünk volt referencia-műszerrel, illetve azonos típusú műszerek esetén egymással történő összehasonlítások elvégzésére. Lényeges szempont volt a különböző sugárázmérő, illetve sugárzási-egyenlegmérő műszerek mérési adatai közti vizsgálat, meghatározva a régebbi eszközök stabilitását. Ennek érdekében egy évvel később újabb, kontrolmérést is végeztünk valamennyi alkalmazott műszerrel azonos helyszínen és beállításokkal. E mérések eredményei alapján a Q7.1 REBS mérési adatsorát korrigáltuk (új műszerkonstansok megállapítása), felhasználva a CNR-1 műszerrel kimutatott kapcsolatot.

A terepi mérések kivitelezésénél fontos tapasztalat volt, hogy a mérőrendszerek rendszeres ellenőrzése és állapotuk dokumentációja kulcsfontosságú, azonban e mérés során még automatikus minőség-ellenőrzési lehetőség, továbbá megfelelő infrastruktúra távoli eléréshez még nem állt rendelkezésünkre (Tordai, 2015). Éppen ezért célként tűztük ki e rendszerek beszerzését, illetve fejlesztését.

3.2.2 2016 – ATACAMA EXPEDÍCIÓ (Ojos del Salado)

2015–2016 telén lehetőség nyílt a Dr. Nagy Balázs által vezetett ATACAMA Expedíció keretében mikrometeorológiai mérések kivitelezésére (Nagy, 2016). A Chilében, a Száraz Andok legmagasabb pontján (Ojos del Salado, 14. ábra) végzett meteorológiai és klimatológiai mérések célja a klímaváltozás hatásainak számszerű dokumentálása, a gleccserek olvadásának leírása. A helyszín mind mikroklimatius mind klimatológiai szempontból egyedi; ezért is merült fel a mikrometeorológiai vizsgálatok iránti igény (Nagy et al., 2014). E kutatási program részeként a felszíni energiamérleg-komponensek meghatározására, a talaj hőforglamának becslésére, valamint sztenderd meteorológiai változók pontos mérésére koncentráltunk. A mérési program kidolgozásában, a mérőrendszer előkészítésében és programozásában, valamint az adatfeldolgozásban aktív szerepet vállaltam. A mérési program műszerezettségét a Függelék 6. táblázata mutatja be.

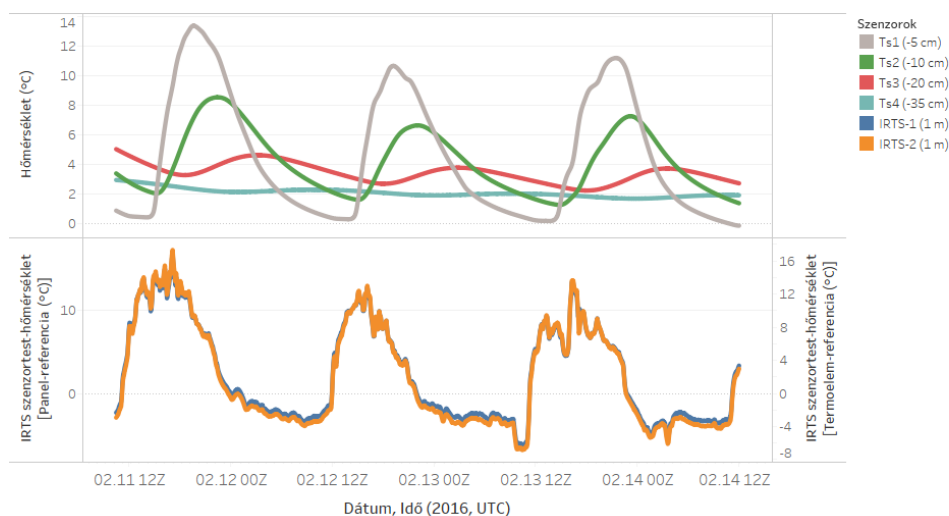


14. ábra – Mikrometeorológiai mérések a Száraz-Andokban a 2016-os Ojos del Salado-i expedíció során (Weidinger et al., 2016b)

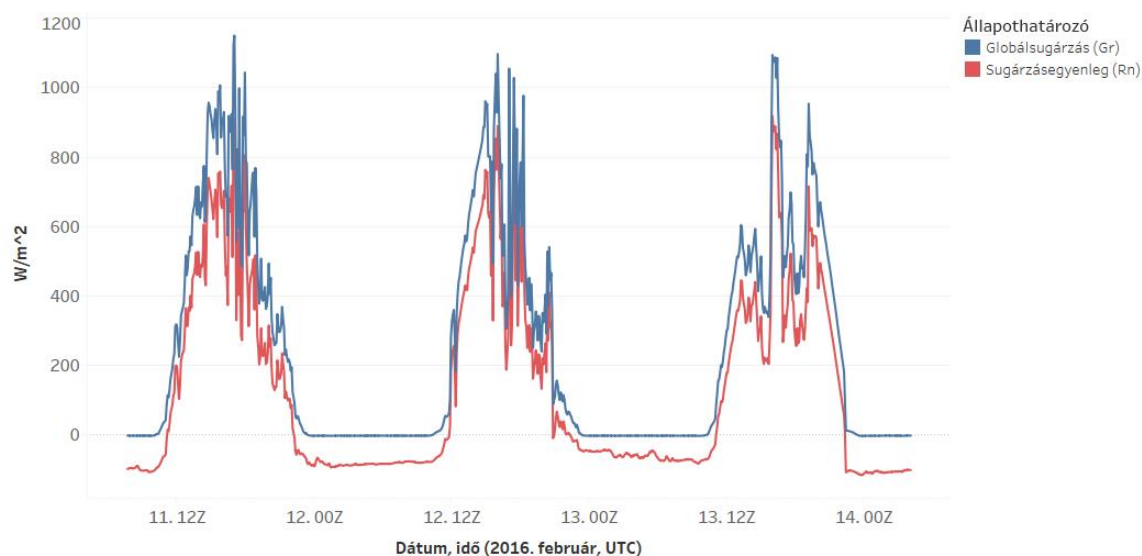
A mérések kivitelezése során a legfőbb problémát a mérőeszközök helyszínre történő szállítása, terepi összeállítása, valamint a tápellátás jelentették. Utóbbi jelentette a mérési időszakra vonatkozó korlátot; összesen 4 napig sikerült folyamatos adatgyűjtést kivitelezni. Szintén kihívást jelentett a mérőrendszer működésének terepi ellenőrizhetősége; az erős napfény gyakorlatilag valamennyi kijelző érdemi használatát ellehetetlenítette, illetve az extrém körülmények nem tették lehetővé az mérések állapotának részletes, helyszíni auditálását. Ezek a tapasztalatok a jövőre nézve fontos iránymutatást jelentenek; egyrészt a napelemes, illetve aggregátoros tápellátás használatát illetően, másrészt az egyszerűen összeszerelhető, moduláris rendszerek iránti igény, harmadrészt a mérőrendszer ellenőrizhetőségének megoldása (pl. műholdas kapcsolat segítségével) kérdéseiben.

A mérési expedíció sikerrel zárult, azonban az adatfeldolgozás során észleltük, hogy a 2 db Vaisala HMP-45C hőmérséklet-és nedvességmérő szenzor nem gyűjtött adatokat – vélhetően tápellátási problémákból kifolyólag. A többi szenzor jól funkcionált, az előzetes kalibrációknak köszönhetően utólagos korrekciókat nem kellett alkalmazni. A mért talajhőmérsékletek menetét a 15. ábra, a globálsugárzás, illetve a sugárzásegyenleg meneteit a 16. ábra illusztrálja. A mérések feldolgozása és minőség-ellenőrzését követően lehetőség

nyílt azok alkalmazása; jelentős eredmény a kapott értékek modellszimulációval történő összehasonlítása (Breuer et al., 2020).



15. ábra – Talajhőmérséklet, illetve az infrahőmérő szenzortest-hőmérsékleti adatai (kétféle belső referencia hőmérséklet alkalmazásával) a 2016-os ATACAMA-expedíció során

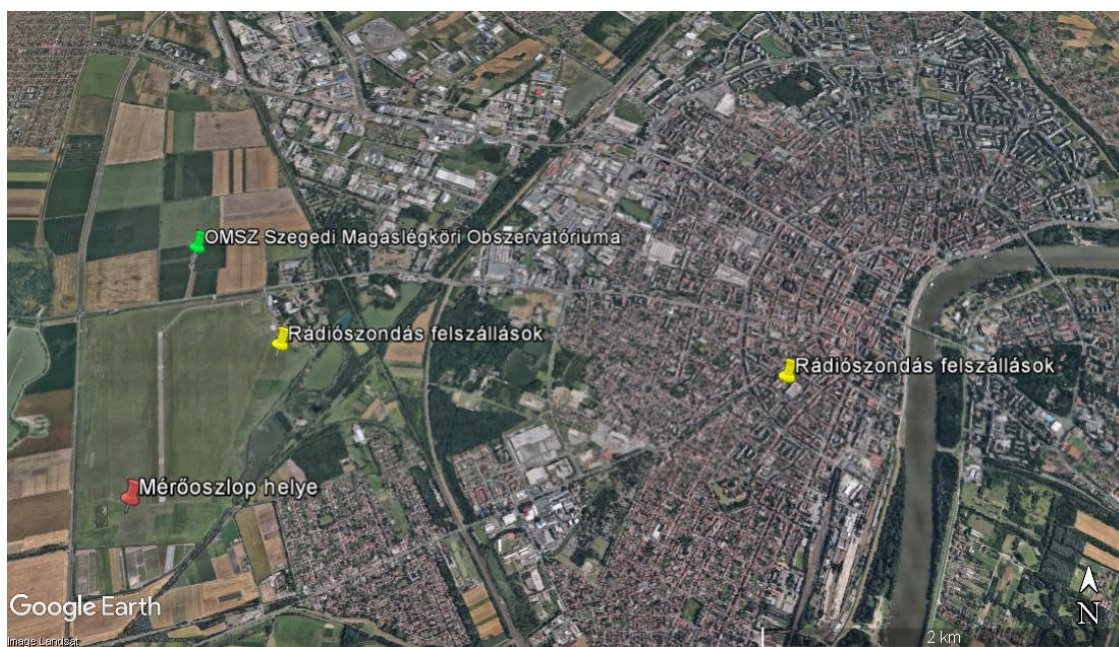


16. ábra – Globálisugárzás (Schenk piranométer) és sugárzásegyenleg (Q7.1) a 2016-os ATACAMA-expedíció során

3.2.3 2016 – Városi és külvárosi határréteg-mérések, Szeged

A 2015-ös PABLS expedíció tapasztalataiból kiindulva, további módszerfejlesztés céljából 2016 nyarán lehetőség adódott újabb Szegedi expedíciós mérések kivitelezésére a Bolyai Tehetséggondozó Gimnáziummal (Zenta) és a Szegedi Tudományegyetem Természettudományi és Informatikai Karával együttműködésben. A mérési program

célkitűzései között szerepelt a felszínközeli rétegben végzett vertikális profilmérések módszereinek fejlesztése kvadrokopteres mérések alapján, a városi hősziget-hatás kimutatása, illetve a sugárzásmérő műszereink teljesítményének összehasonlítása (Bordás et al., 2017). A mérési program főbb helyszíneit a 17. ábra szemlélteti. A hősziget-hatást a Szegedi Repülőtérén, illetve az SZTE TTIK épülete melletti parkban kivitelezett mérések alapján elemeztük – utóbbi esetén részletes profilméréseket végeztünk a városi határréteg hőmérsékleti- és nedvességi viszonyainak meghatározása érdekében. Feladatom elsődlegesen a sugárzásegyenleg komponenseinek mérését célzó műszeregyüttes előkészítése (18. ábra), a mérésadatgyűjtő programozása, valamint a GRAW szondákhoz tartozó földi egység kezelése volt (Tordai, 2017). Aktív részt vállaltam a terepi mérések kivitelezésében és a kapcsolódó adatfeldolgozásban is.



17. ábra – A 2016-os szegedi mérési expedíció főbb helyszínei



18. ábra – A 2016-os szegedi expedíció során a Szegedi Repülőtéren telepített mérőrendszer

A mérőrendszer műszerezettségét a Függelék 7. táblázata mutatja be. A rendszer akkumulátorról üzemelt, így lényeges szempont volt a teljes áramfogyasztás meghatározása és így a biztonságosan vállalható maximális adatgyűjtési idő becslése. A részletes mérési program, illetve a mérőeszközök által küldött jelek azonos adatgyűjtőn történő rögzítése érdekében a Campbell Scientific 23X mérésadatgyűjtőt AM416 relés multiplexerrel egészítettük ki. Az expedíció során teszt jelleggel telepítettünk 2 db Voltcraft DL-120TH USB csatlakozófelülettel rendelkező hőmérséklet- és nedvességadatgyűjtőt is – elsősorban alkalmazhatóságuk és stabilitásuk vizsgálatára.

A CNR-1 műszer hőmérsékletméréséhez (Pt-100 ellenállás-hőmérő) a gyártótól kapható precíziós ellenállásokból álló modulra (mérőhíd) van szükség. Az eredeti modul egy 100 Ω -os (0,01% tolerancia) fémfólia-ellenállásból és egy 10 k Ω -os (5% tolerancia) ellenállásból épül fel. Mivel ez nem állt rendelkezésünkre, helyettesítő modult készítettem, melynek során a fémfólia-ellenállás helyett 100 Ω , 0,1%-os fémréteg-ellenállást használtam (beszerzési-és költséghatékonysági szempontokat figyelembe véve). Mivel a gyártó által előírt mérési pontosság csak a megadott ellenállás-értékek esetén teljesül, az alkalmazott ellenállásokat kalibrált mérőműszerrel megvizsgáltuk, majd a kapott értékeket metaadatként rögzítettük. Minőségbiztosítási szempontból lényeges, hogy az ellenállások pontos értékét

meghatároztuk – ezáltal az utófeldolgozás során a mért hőmérsékletértékeket egyszerű korrekcióval pontosítottuk.

Az adatbázis tartalmazza a CR23X adatgyűjtő által rögzített adatokat, a GRAW DFM-09 rádiószondás felszállások adatait (txt formátum), valamint az azokról készült biztonsági mentéseket (xml alapú formátum, a GrawMet szoftver sajátja). Mivel több azonos specifikációjú rádiószondát alkalmaztunk, ezeket összehasonlító (párhuzamos) mérésnek vetettük alá, ezek az adatok is archiválásra kerültek. Háttéradatként csatoltuk az OMSZ Szegedi Magaslégköri Observatóriuma által mért szinoptikus adatokat (SYNOP táviratok), illetve az SZTE TTIK mérőállomásának adatsorait. Az alkalmazott Voltcraft DL-120TH adatgyűjtők idősorai szintén bekerültek az adatbázisba.

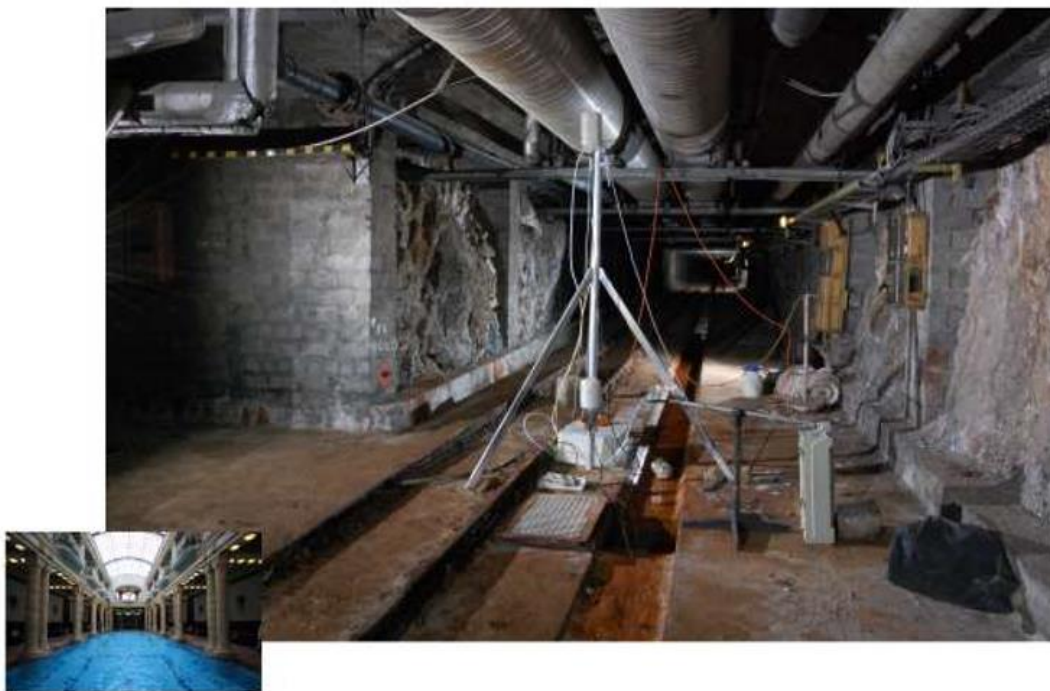
3.2.4 Mikroklimatikai mérési kampány a Gellért-fürdő alagútrendszerében (Gellért-táró)

2016 tavaszán az ELTE Általános és Alkalmazott Földtani Tanszékkal együttműködésben a Gellért-hegy belsejében húzódó, több kilométer hosszú alagútrendszerben végeztünk mikroklimatológiai vizsgálatokat (Mádlné Szőnyi, 2012). A hidrogeológiai természetű kutatás célja a – Gellért-fürdőt is ellátó – termálvíz kémiai összetételének vizsgálata, valamint a termálvizet egy nagyjából 400 m hosszú csatornába szivattyúzva a különböző anyagok koncentrációjának, azok kiülepedésének dinamikai vizsgálata volt. Mivel a meteorológiai paraméterek alapvetően befolyásolják a vizsgálat körülményeit (víz-levegő kölcsönhatások), illetve a kiülepedés dinamikáját, részletes mérőprogramot dolgoztunk ki ezek meghatározására. Célunk volt i) a hőmérséklet és nedvesség horizontális- és vertikális gradiensének meghatározása, ii) a vízhőmérséklet horizontális gradiensének mérése a csatornában, illetve a forrásnál (zsomp), iii) a terület energiaháztartásának vizsgálata, valamint iv) a vízgőz és szén-dioxid koncentrációk és azok változásának dokumentálása. A kivitelezett mérőrendszer (19. ábra) műszerezettségét a függelék 8. táblázata (FÜGGELÉK) szemlélteti. A mérés tervezésétől kezdve a kivitelezésen át az adatfeldolgozásig valamennyi feladatban aktívan részt vettem (Tordai, 2017).



19. ábra – A Gellért-táró kísérlet során telepített mérőrendszer részlete. Középen látható a termálvíz-forrás (zsomp) és az abból a csatornába szivattyúzott víz.

A mérőrendszer a termálvíz-forrás (zsomp) mellett került telepítésre (20. ábra). A CO₂ és H₂O méréseket két szinten végeztük; 0,5 és 2 m magasságban. Az alkalmazott műszer (Li-Cor LI 840A) működéséhez vákuumszivattyúra is szükség van, illetve a különböző magasságokban történő mérés elkülönítése legegyszerűbben elektronikusan vezérelt szelep segítségével volt megoldható, így e mérésekhez komplex elektrotechnikai vezérlést alakítottunk ki (Tordai, 2016). A rendszer előnye, hogy hogy valamennyi rendszer vezérlését teljes mértékben az alkalmazott mérésadatgyűjtő (Campbell Scientific CR23X) kontrollálta, így lehetőség adódott diagnosztikai változók rögzítésére (pl. szelepállás, mérési referenciák, műszerek állapota, stb.). A beszívott levegő mennyiségét nyomásszabályzó segítségével állítottuk be.

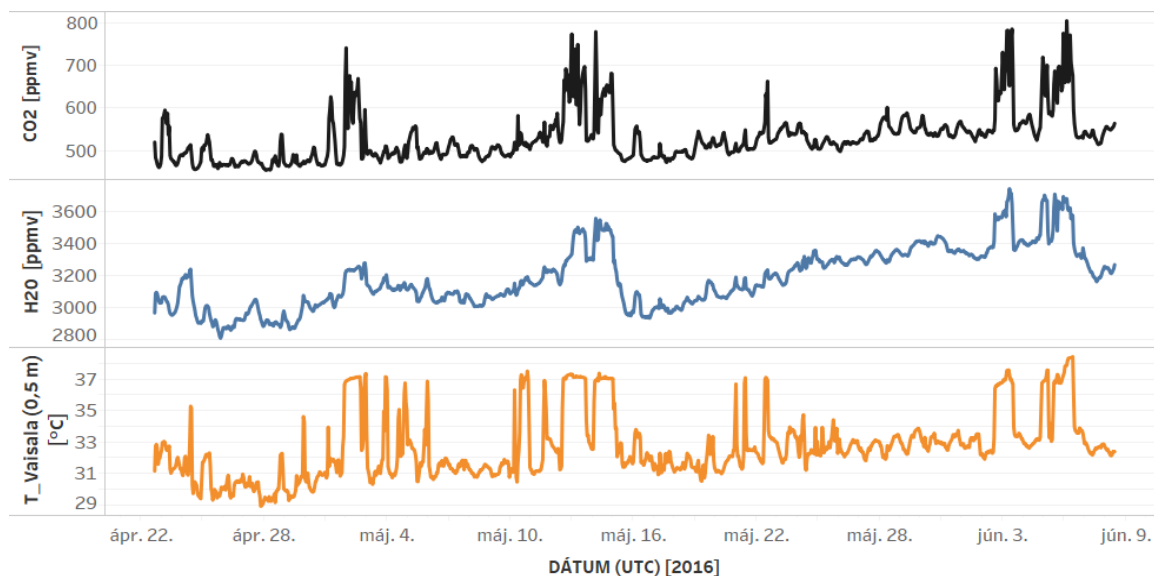


20. ábra – A Gellért-táró kísérletben telepített mérőrendszer. Alul a Gellért-fürdő. (Forrás: Hegedűs és Csondor, 2016)

A termálvíz szivattyúzása során – a hidrogeológiai mérések kiegészítésére – mozgó hőmérséklet- és nedvességméréseket végeztünk Voltcraft DL-120TH műszerekkel. A hordozható mérőeszközök belső óráját előzetesen számítógépen szinkronizáltuk – így az megegyezett a fix mérőoszlop beállításával. A mozgómérések során a csatorna mentén előzetesen kijelölt pontokon, 1 m magasságban, 2 perces stabilizációs időt alkalmazva mértünk, melyek során a használt műszer folyamatosan, 1 másodperces frekvenciával gyűjtötte az adatokat. A mozgómérések befejeztével a kézi műszereket a forrástól számítva 2 és 100 m távolságra helyeztük el, 60 cm magasságban, ahol 5 perces mintavételi frekvenciával gyűjtötték az adatokat.

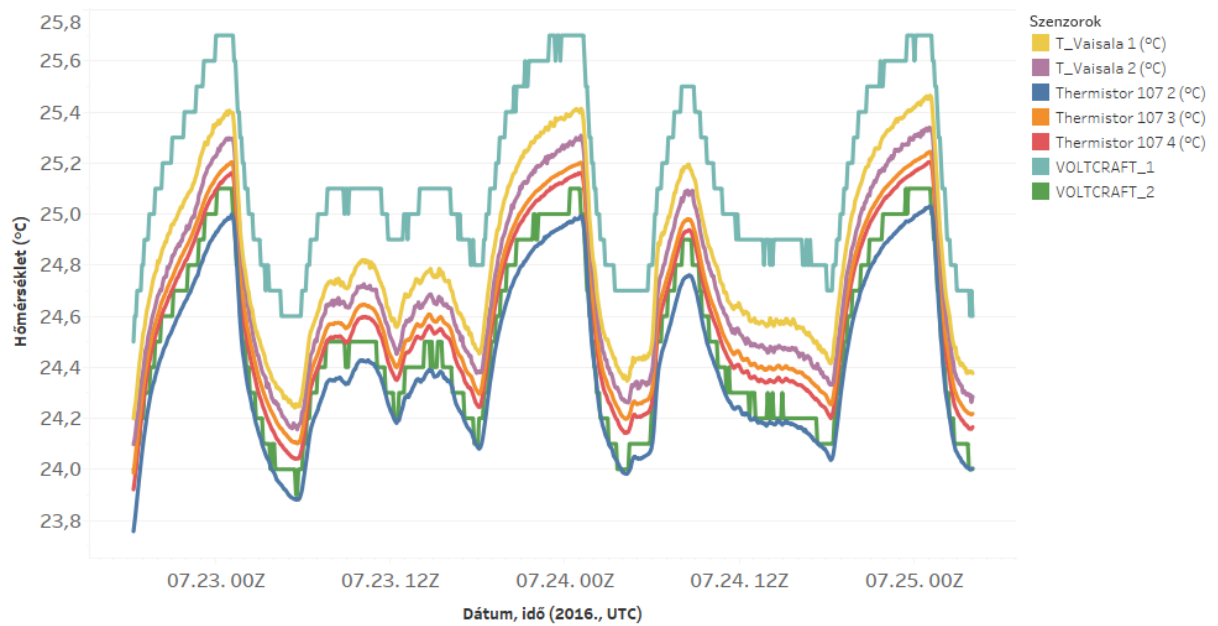
A mérés kivitelezése során kihívást jelentett a mérőhelyen tapasztalt magas hőmérséklet és páratartalom, illetve a mérőeszköz megközelíthetősége is. További nehézséget okozott, hogy a helyszín adottságaiból adódóan a távoli elérés és a valós idejű monitoring nem volt megvalósítható. Mindezek ellenére a rendszeres ellenőrzés biztosított volt. A vákuumszivattyú egy alkalommal meghibásodott, mely cseréjét tette szükségessé. Ennek következtében CO₂ és H₂O mérések a 4 hónapig tartó mérési periódusból ~ 3 hónapra állnak rendelkezésre. Ebben az időszakban is megfigyelhetők megugrások a koncentráció

értékekben (21.ábra) – későbbi vizsgálatok alapján a szellőztető rendszer teljesítményének változása az elsődleges oka.

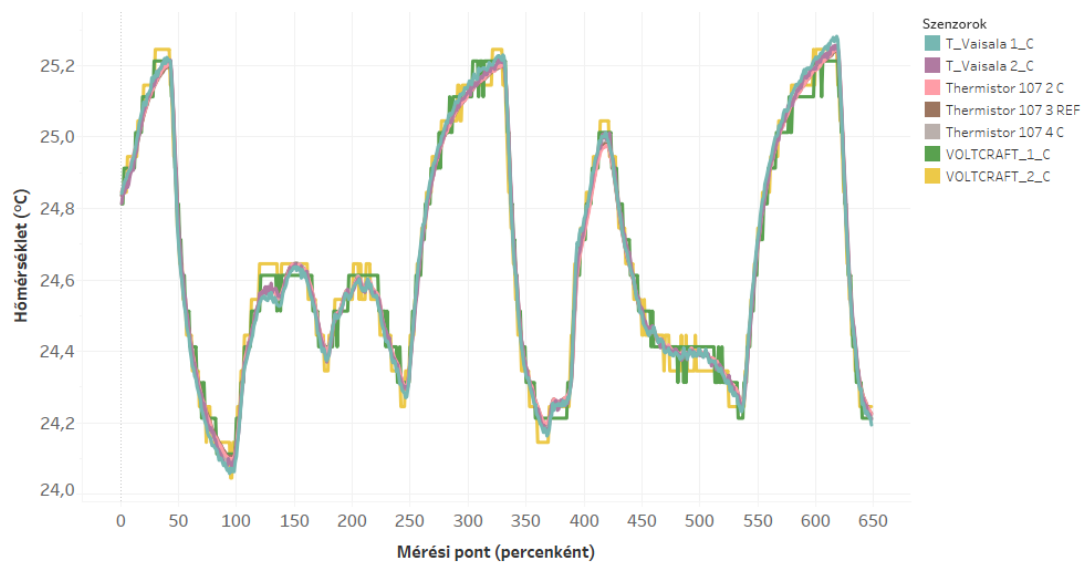


21. ábra – A Gellért-táró kísérlet során a CO₂, H₂O és hőmérsékleti (0,5 m) adatsorban megfigyelhető anomáliák.

A mérés során alkalmazott hőmérséklet- és nedvességmérő műszereket előzetes összemérésnek vetettük alá (beleértve a Voltcraft DL-120TH adatgyűjtőket is), mely alapján (1 saját referenciát alkalmazva) meghatároztuk az egyes műszerek korrekcióit. Az összemérést az ELTE Meteorológiai Tanszéken, ellenőrzött körülmények között végeztük, offset-korrekciókat alkalmaztunk. Az egyes műszerek korrekció előtti- és utáni adatsorát a 22. és 23. ábrák szemléltetik. Később lehetőségünk nyílt Vaisala HMP-45C mérőeszközeink kalibrációjára az Országos Meteorológiai Szolgálat által, mely eljárás során kapott korrekciós faktorokat metaadatként rögzítettük, és felhasználtuk az adatsorok korrekciójánál.



22. ábra – A különböző hőmérők kontrollált körülmények között (ELTE Meteorológiai Tanszék) történő összemérésének nyers adatai



23. ábra – A referenciához történő kalibráció során számított offset-ekkel korrigált hőmérsékleti adatsorok

A mérési adatbázis tartalmazza a mérőoszlop és a 2 Voltcraft mérésadatgyűjtő adatait, valamint a mozgómérések adatait. Kiegészítő (háttéradatként) rögzítettük a Duna vízállására vonatkozó adatokat, melyek a vizsgált zomp vízszintjével – illetve az abból túlcserdülő víz mennyiségével egyenes korrelációt mutatnak. A különböző szenzorok egyidejű mérésének eredményét a 24. ábra szemlélteti.



24. ábra – Az alagúton kívüli- és a Gellért-tárón belüli levegő állapothatározói (2016. április 22. – július 18.)

3.2.5 2018–2020 – Kísérleti agromikrometeorológiai mérések Jakabszálláson és Villányban

A DIVERFARMING projekt (EU 2020 No. 728003) a mezőgazdasági folyamatok optimalizációját, alacsony környezeti terheléssel járó, fenntartható mezőgazdasági gyakorlatok kutatását, illetve a gyakorlatba történő átültetését tűzte ki célul [1 – diverfarming.eu]. E program keretein belül – a Pécsi Tudományegyetem (PTE) – koordinálásában termőhelyi kísérletek kerültek kialakításra 3 helyszínen: i) a PTE Szőlészeti és Borászati Kutatóintézetében, ii) Jakabszálláson, a Nedel-Market Kft. spárgaültetvényében, illetve iii) Villányban, az Aka Kft szőlészetében (Gere-borászat). A jakabszállási és a villányi kísérlet során meteorológiai adatok csak korlátozottan álltak rendelkezésre, így igény merült fel agrometeorológiai állomások telepítésére. Az ELTE Meteorológiai Tanszék e mérések tervezésében, kísérleti mérőplatformok telepítésében és a

projekt elvárásainak megfelelő napi szintű adatbázisok előállításában működött közre. A kísérleti agrometeorológiai mérések valamennyi fázisában részt vettem (Tordai, 2020).

A kísérleti fázisban az ELTE Meteorológiai Tanszék mérésadatgyűjtőire (kezdetben Campbell Scientific CR10 és CR21X majd 23X) alapuló állomások kerültek telepítésre mindkét helyszínen (25. és 26. ábrák). A mérés elsődleges célja a helyszínek és a mérési programok tesztje volt végleges, részletesebb programmal rendelkező agromikrometeorológiai állomások telepítéséhez. Másodlagos célként megfogalmazható a sztenderd meteorológiai- és talajparaméterek megfigyelése, mely háttérinformációként szolgál különböző agronómiai, illetve talaj- és növényteni kutatásokhoz (Szalai, 2020). Felmerülő kérdés volt, hogy a kísérleti helyszínekhez legközelebb lévő szinoptikus mérőállomások (Jakabszállás esetén Kecskemét (12970), Villány esetén Pécs-Pogány (12942) – mindkettő légvonalban nagyságrendileg 20 km távolságra) mennyire reprezentatívak az ültetvényekre; milyen mértékig alkalmazhatók.



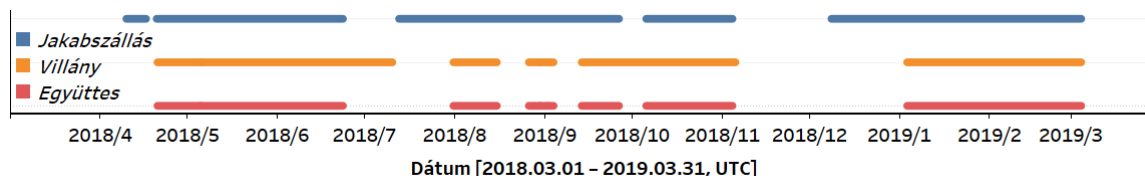
25. ábra – Jakabszállási (balra) és Villányi (jobbra) kísérleti állomások telepítése.



26. ábra – Üzembe helyezett kísérleti állomások, Jakabszállási (balra) és Villányi (jobbra)

A mérések kivitelezésénél a rendelkezésünkre álló régebbi sorozatú adatgyűjtőkre támaszkodtunk (CR10 és CR21X), melyek még beépített EEPROM tárolóegységgel nem rendelkeznek, így áramszünet esetén mind a tárolt program, mind az addig gyűjtött adatok elvesznek. A villányi mérés későbbi szakaszában a CR21X-et CR23X adatgyűjtőre cseréltük, mely erre a problémára már nem érzékeny. Az esetleges áramkimaradásokat Jakabszállás esetén akkumulátor, Villány esetén szünetmentes tápegység beiktatásával igyekeztünk áthidalni. Ilyen felépítés mellett közel 1 évig végeztünk méréseket; 2018. márciusától 2019. márciusáig. Problémát jelentett a rendszeres időközönkénti ellenőrzés és adatletöltés – elsősorban Villány esetén a távolság miatt. Mivel ekkor még közel valós idejű monitoring rendszer nem állt rendelkezésünkre, ezért a mérőrendszer állapotáról csak személyesen lehetett meggyőződni. Ehhez meg kellett becsülni, hogy az adatgyűjtők mennyi adatot képesek tárolni, ez mindkét esetben ~3 hetet jelentett. Több alkalommal merültek fel technikai problémák mindkét helyszínen – elsősorban az áramellátás bizonytalanságából adódóan – melyek orvoslására csak detektálásuk után kerülhetett sor. Sajnos az adatok rendelkezésre állása is jól mutatja e problémák megjelenését (27. ábra); a teljes mérési periódusban Jakabszállás esetén 80%, Villány esetében 68%, az együttes rendelkezésre állás 58%-os (Tordai, 2020). Ez a probléma is mutatja az élő telekommunikációs kapcsolat, és a valós idejű monitoring rendszerek iránti égető igényt, mely a modern magas-minőségű mérések számára alapkövetelménynek tekinthető. Ugyanakkor felmerülnek kompatibilitási problémák is: a régebbi típusú egyszerű RS232 soros kommunikációt alkalmazó adatgyűjtők

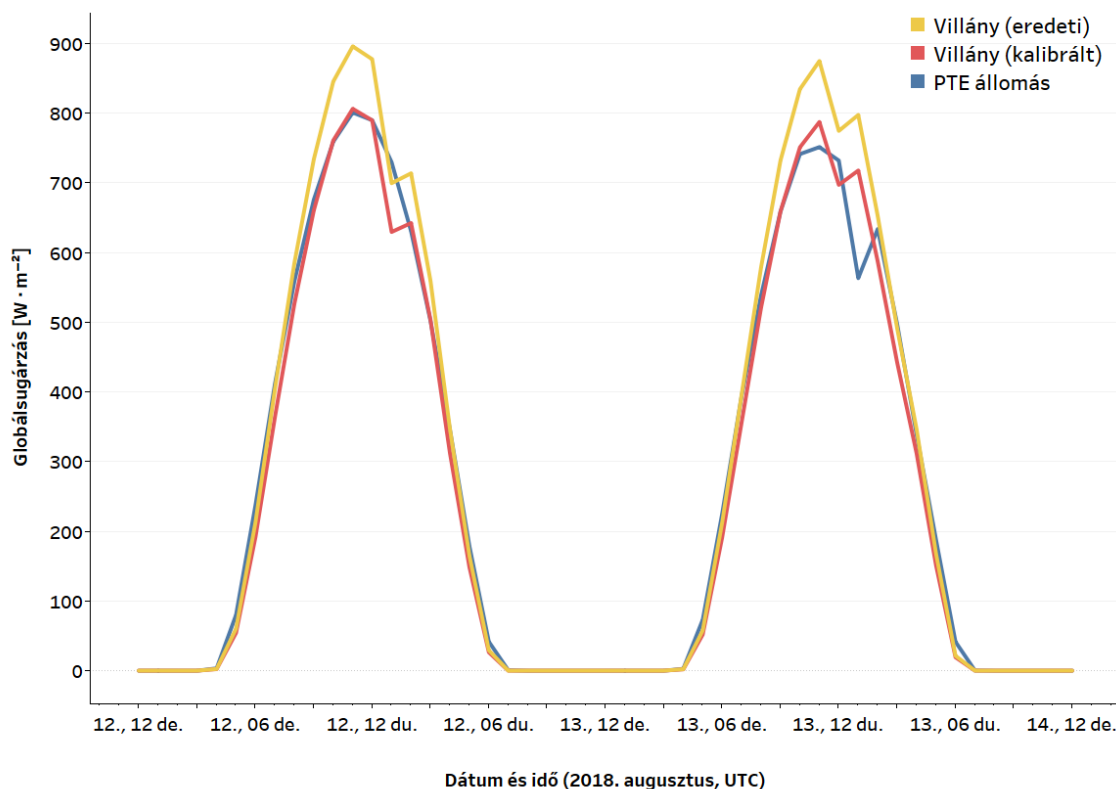
távolsági elérése nem oldható meg egy lépésben, köztes eszközök programozására van szükség a jel értelmezéséhez és továbbításához (az újabb sorozatokból származó CR1000, CR1000X, CR3000 típusok már alapból támogatják az IP-alapú kommunikációt). A kísérleti mérőállomások műszerezettségét a függelék 9. és 10. táblázatai mutatják be.



27. ábra – A jakabszállási, a villányi és a két mérés adatainak együttes rendelkezésre állása 2018. 03. 01 és 2019. 03. 31 között

A jakabszállási mérőhely esetén több alkalommal volt szükség a Q7.1 REBS sugárzásegyenlegmérő szenzor lupolen burájának cseréjére (madarak okozta károk következtében). E cseréket dokumentáltuk. A kezdetben tervezett 3 talajhőmérő helyett csak 2db T107 szenzort helyeztünk el, mivel a harmadiknál a korai terepi tesztek instabil működésre utaltak. Mindkét esetben a Schenk piranométerek kalibrációra szorultak, mely utólag az Országos Meteorológiai Szolgálat jóvoltából meg is történt. A 28. ábra jól illusztrálja ennek hatását és szükségességét a villányi állomás esetén. Az ábrán kék színnel látható a PTE TTK globálsugárzás-mérőjéből származó adatsor is. A két helyszín közötti akár 100 Wm^{-2} eltérések irreálisak, az új kalibráció alkalmazásával kapott maximális $\sim 30 \text{ Wm}^{-2}$ már reális – 2018. augusztus 13-án fátyolfelhők átvonulása volt megfigyelhető a térségben, mely az eltérést magyarázhatja.

Az adatbázis a két állomás mérési adatsorából, a kapcsolódó kalibrációk és összemérések adataiból, valamint a környező szinoptikus állomások órás adatsoraiból épül fel.



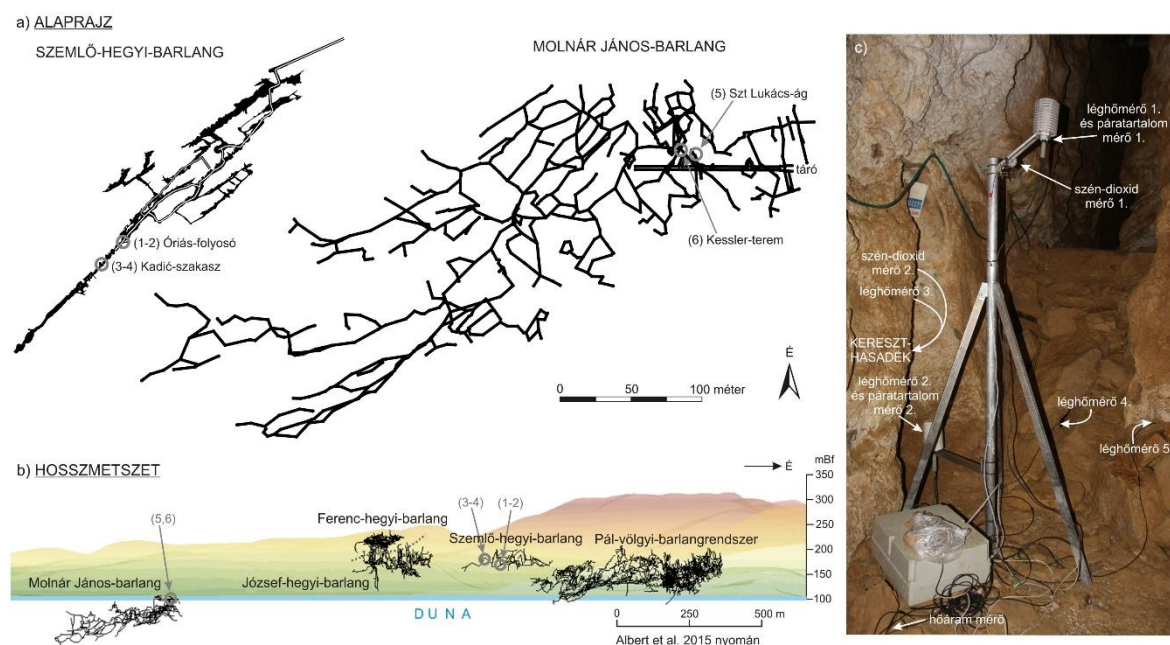
28. ábra – Globálisugárzás napi menete a villányi kísérleti állomás (kalibráció előtt és után), valamint a PTE mérőrendszerének adataiból (2018. augusztus 12–13.)

3.2.6 2017 – Mikroklíma mérések a Szemlő-hegyi- és a Molnár János barlangokban

A korábbi Gellért-tározó kísérlet mintájára és annak tapasztalatait felhasználva 2017-ben lehetőség nyílt a Szemlő-hegyi-barlangban is mikroklíma-mérési program kivitelezésére. A barlangjáratok oldódásában, illetve az üregképződésben kulcsszerepe van a mélyből érkező termálvíznek, melyből érkező és oxidálódó H_2S , valamint az oxidáció következményeképp keletkező szén-dioxid (CO_2) egyaránt fontos szereppel bírnak (Kovács-Bodor et al., 2018; Weidinger et al, 2018). Kutatási kérdés a rózsadombi és más barlangok közötti összeköttetés vizsgálata is, erre utalhat a légcseré – így mérésekkel igazolható (Stieber, 2016).

A legfontosabb mérési célunk – az alapvető állapothatározók meghatározása mellett – a szén-dioxid koncentráció alakulásának vizsgálata volt mindkét helyszínen. A kialakított mérési helyszínek és a mérőrendszer a 29. ábrán látható. A H_2O és CO_2 méréseknél újfent alkalmaztuk a Gellért-tározó kísérlet során kidolgozott szeleprendszert, így 5 percenkénti váltással két régiót is meg tudtunk figyelni. A mérések valamennyi fázisában aktívan részt

vettem. A Szemlő-hegyi-barlangban 2017. április 8–18-ig, míg a Molnár János Barlangban 2017. április 21–25-ig végeztünk méréseket. A H_2O és CO_2 értékeket 5, a többi állapothatározót 20 percenként átlagoltunk. A mérési adatok gyűjtését Campbell Scientific CR23X adatgyűjtő végezte. Ebből adódóan az esetleges áramszünetek nem jelentettek problémát. A mérések kalibrált mérőeszközökkel történtek, a rövid mérési periódusok alatt dokumentálandó hibajelenség nem volt tapasztalható.



29. ábra – A Szemlő-hegyi- és a Molnár János-barlangok alaprajza és hosszmetSZETE, jelölve a 6 mérési pontot. Jobbra az ELTE Meteorológiai Tanszék mérőoszlopa és műszerei (forrás: Weidinger et al., 2018)

3.2.7 2017 –2018, Agromikrometeorológiai mérések Zágrábi szőlőállományban

A FIMO-CROHUN bilaterális együttműködés keretében a Zágrábi Egyetemmel közös mérési programok kerültek kivitelezésre. Ennek első fázisát a Zágrábi Egyetem birtokán található szőlőállományokban történő komplex mikrometeorológiai mérés jelentette 2017 és 2019 között (Weidinger, 2018), kiemelten a vegetációs periódusokban (30. ábra). Célunk volt a felszíni energiaháztartás komponenseinek meghatározása (különböző felszínek fölött), a talaj hőmérsékleti és nedvességi profiljainak mérése, a sugárzásegyenleg komponenseinek analízise, illetve a lokális mikrolimatikus adottságok dokumentálása a közös mikrometeorológiai mérési potenciál harmonizációja által (Weidinger et al., 2019a). A mérési program valamennyi szakaszában közreműködtem.



30. ábra – Zágrábi mikrometeorológiai mérések 2017-ben. Balra az ELTE műszerdoboz, benne a Campbell Scientific CR23X adatgyűjtő. Jobbra a Zágrábi Egyetem mérőtornya, melyre az áramellátást biztosító napelemek is kerültek.

A közös mérőrendszer alapját Campbell Scientific adatgyűjtők képezték (CR23X és CR3000), melyeket napelemes rendszer látott el árammal (Weidinger et al., 2019b). A program keretein belül az eszközök távelérése is biztosított volt a Zágrábi Egyetem Teltonika RUT955 típusú 3G/4G router által [9 – teltonika-networks.com], így lehetőség volt az állomások működésének közel valós idejű ellenőrzésére, valamint az adatok távoli letöltésére és analízisére is (31.ábra). A terepi ellenőrzéseket a Zágrábi Egyetem munkatársai végezték.

CR23X_Internet Numeric Display 1: Real Time Monitoring (Connected)

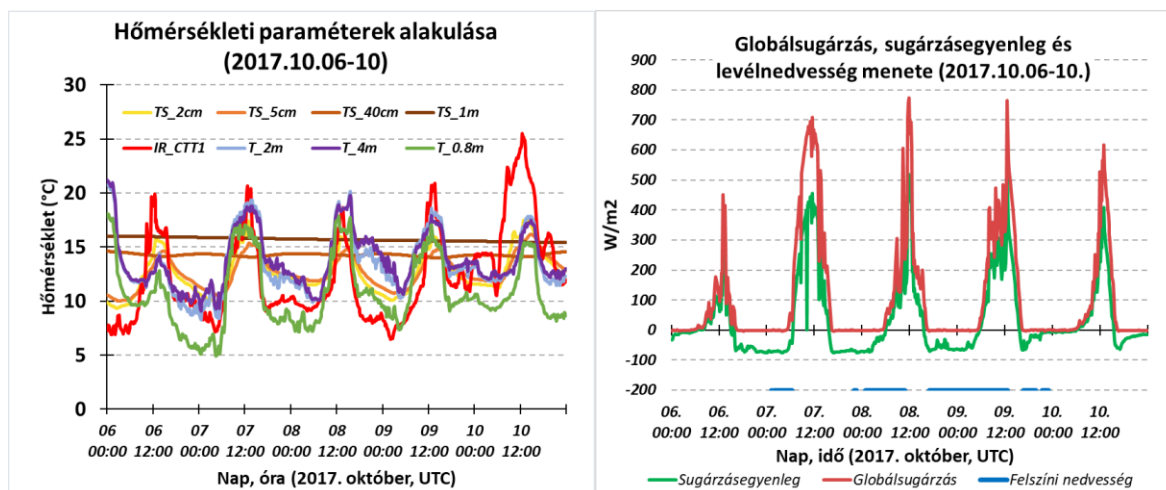
Add...	RecNum	990	Cal2	41,57		
	TimeStamp	00:14:40	Shf 1 raw	71,96		
	Battery V	12,41	Shf 2 raw	-118,14		
Delete	T panel	17,85	Shf 1 b raw	71,96		
	T TCPL	17,42	Shf 2 b raw	-118,14		
	Termistor 1	19,77	Leaf Wetness norm	0,00		
Delete All	Termistor 2	20,64	Leaf wetness KOHM	213 953,40		
	Termistor 3	22,39	Soil W 1	26,43		
	Termistor 4	20,91	Soil W 2	25,39		
Options...	AppTarqT	16,96	Soil W 3	23,92		
	SenBodyT	17,55	InputLocation 27	0,26		
	AppTarqT1	16,54	InputLocation 28	0,23		
Stop	SenBodyT1	17,13				
	CTT	17,15				
	CTT1	16,72				
Help	shf 1561	78 103,96				
	shf 1527	-4 910,90				
	Cal1	1 085,36				

31. ábra – Képernyőkép az ELTE CR23X adatgyűjtőjének távoli elérésének tesztjéről. A Campbell Scientific LoggerNet szoftverén az adatgyűjtővel közel valós idejű kapcsolat létesült, mely lehetővé tette az egyes paraméterek megfigyelését, vizualizációját, valamint az adatok letöltését is. Az ábra a műszerek telepítése közben készült – ez magyarázza az előforduló irreális értékeket.

A műszeres mérések során az elhelyezett két önkalibráló talajhőárammérő (Hukseflux HFP01) vezetőkeit – feltehetőleg egy a szőlőültetvények dolgozó mezőgazdasági gép elvágta, melynek hatására átmeneti adathiány keletkezett a két szenzor tekintetében. A részletes adatelemzés, illetve a közös minőség-ellenőrzés jelenleg is zajlik.

Az adatbázis részét képezik a közös mérőrendszer adatai – melyek ellenőrzését és feldolgozását az adatgyűjtés módja szerint (adatgyűjtőnként) végeztünk.

A 32. ábra – a közös mérési adatbank felhasználhatóságát illusztrálандó – a különböző szintek hőmérsékletének, valamint a globálsugárzás, a sugárzásegyenleg és a levélnedvesség napi meneteinek alakulását mutatja be a 2017. október 6–10. közötti időszakban. A felszíni nedvesség-egzisztenciát (dimenziótlan mennyiség) a levélnedvesség adatok alapján, határérték ($<100 \Omega$) megadásával számoltuk. A *TS* változónevek talajhőmérsékleteket jelölnek (Campbell Scientific T107 szenzorok 2 cm, 5 cm, 40 cm és 100 cm mélységekben), az *IR_CT1* a Campbell Scientific IRTS-P infravörös hőmérő által mért (korrigált) értéket jelenti, a *T* kezdetű változók pedig az árnyékolt (Vaisala HMP45C) hőmérséklet-és nedvességszenzorokra utalnak 0,8 m, 2 m és 4 m magasságokban. A sugárzási adatok Kipp & Zonen CNR1 sugárzásegyenleg-komponensmérőből származnak.



32. ábra – Hőmérsékleti- és sugárzási paraméterek, valamint a levélnedvesség-egzisztencia alakulása a Zágrábi mikrometeorológiai mérések során 2017. október 6. és 10. között

3.2.8 2018-2021 – Köd mikrofizikai kutatási program, Siójut és Pestszentlőrinc

A Pannon Egyetem által vezetett GINOP-2.3.2-15-2016-00055 projekt a Pécsi Tudományegyetem és az Országos Meteorológiai Szolgálat részvételével 2016-ban indult. A program a „Légszennyezettség előrejelző rendszer kifejlesztése légköri víz-aeroszol kölcsönhatások figyelembevételével” címet viseli. A mérési program célja a köd kialakulásának, fejlődésének és disszipációjának vizsgálata mind mikrofizikai, mind levegőkémiai aspektusokból (Weidinger, 2018). A ködképződés folyamata ilyen szempontok alapján kevésbé ismert, a különböző modellek fejlesztésének érdekében részletes célzott mérési programra van szükség. Ehhez a munkához csatlakozott az ELTE Meteorológiai Tanszék is. Célunk a ködhelyzetek mikrometeorológiai vizsgálata, amely magában foglalja a felszíni energiamérleg komponenseinek meghatározását Eddy-kovariancia módszerrel, valamint a felszínközeli réteg (30 m-ig) hőmérséklet, nedvesség, szél és TKE (turbulens kinetikus energia) profiljainak mérését (Weidinger et al., 2019c).

A kutatási program négy éve alatt négy különböző mérési program került megvalósításra két helyszínen: Siójuton, a Sió-völgye mellett és Pestszentlőrincen, az OMSZ Marczell György Főobszervatóriumában (33. ábra). A mérések interdiszciplináris megközelítésen alapultak; a mikrometeorológiai mérések mellett sor került többek között nyomgázok, aeroszolok, ködrészecskék méreteloszlásának, illetve ködvíz kémiai összetételének mérésére is (Weidinger, 2018). A határréteg szerkezetét rádiószondás felszállások, és ceilométer adatok alapján detektáltuk (Weidinger et al., 2021). A Budapest Liszt Ferenc Nemzetközi

Repülőtéren történő SODAR mérések is rendelkezésre állnak. Sor került kötött ballonos felszállásokra és kvadrokopteres mérések tesztelésére is. Utóbbi a ködhelyzetek során – az intenzív jegesedés folytán – nem bizonyult hatékonynak. Rendelkezésünkre állnak továbbá az Országos Meteorológiai Szolgálat szinoptikus mérőhálózatának mérési adatai is a vizsgált időszakokra Siófokra, illetve Pestszentlőrincre.



33. ábra – A 2018-2019-es téli ködmérési expedíció műszerezettségének részlete. Balra a sióuti mérőoszlop tetején a 10Hz-es felbontású Gill anemométerrel. A háttérben a Veszprémi Egyetem Környezetvédelmi Mobil Mérőlaboratóriuma. Jobbra fent az OMSZ Marczell György Főobszervatóriumában elhelyezett Eddy-kovariancia-mérőoszlop (BGME), háttérben a 30 m-es torony, melyen a profilméréseket végeztük.

A 2018-2019-es mérési programban valamennyi munkafázisban részt vettem; a mérőrendszer tervezésétől kezdve a kivitelezésen és ellenőrzésen át az adatok feldolgozásáig. A többi mérési program esetén a terepi kivitelezést témavezetőm és a BMGE Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék munkatársai végezték, az adatellenőrzés- és feldolgozás itt is az én feladatomból volt. A nagyfrekvenciás mérések feldolgozásával és minőségbiztosításával Arun Gandhi PhD hallgató foglalkozik (Gandhi, 2021). Már a 2018-19-es mérések során sikeresen alkalmaztam egy Teltonika RUT955 3G/4G útválasztót (a Zágrábi mérések tapasztalata alapján, Campbell Scientific CR1000 adatgyűjtővel), mely segítségével a valós idejű monitoring és adatelérés megvalósult. Ezen kívül lehetőség adódott az adatok távoli letöltésére, illetve a mérésadatgyűjtő állapotának lekérdezésére, felmérésére, szükség esetén a mérésvezérlő program módosítására is – a Campbell Scientific LoggerNet programcsomagján keresztül.

Az adatbázis az összes mérési program közül e kampány során a legkomplexebb. Az adatrendezés során a négy mérési periódust külön kezeltük (2018 eleje, 2018–19 tél, 2019–20 tél, 2020–21 tél). Mivel a különböző kampányok mérési programja több ponton eltérő (lásd Függelék 11–17. táblázatok), nem volt lehetséges egy-az-egyben ugyanazt a feldolgozási módszert alkalmazni mind a négy esetben. A nagymennyiségű adat, illetve a különböző adatformátumok indokolták az adatfeldolgozás 3.1 alfejezetben bemutatott módszertan alapján történő automatizálását. A kutatási célnak megfelelő utólagos korrekciókról – egy esettanulmányként a következő (3.3) fejezetben írok részletesebben.

3.3 Eredmények – esettanulmányok

Utókalibráció a ködmérések során

Esettanulmányomban egy olyan utólagos korrekciót mutatok be, mely az eddigiekben ismertetett, általános korrekciókon túlmutat; azt a kutatási cél határozta meg.

2020–21 telén a köd-mikrofizikai mérések utolsó periódusában Pestszentlőrincen, az Országos Meteorológiai Szolgálat Marczell György Főobszervatóriumában 4 különálló helyen történtek relatív nedvességmérések; a 30 m magas mérőtornyon 10 m és 30 m magasságokban (ELTE), a mikrometeorológiai állomáson (BMGE) 1 m és 5 m magasságokban, a tetőn elhelyezett műszerrel (ELTE) (8 m magasán), illetve a sztenderd 2 m-es magasságban az OMSZ által. A toronyban Vaisala HMP45C, a tetőn HMP45D, míg az oszlopon Campbell Scientific HigoVUE5 műszerek kerültek elhelyezésre, az OMSZ Vaisala HMP155 szenzort használt. A mérési adatok elemzése során a különböző eszközök között a ködesemények beálltakor szignifikáns különbségek alakultak ki, néhány szenzor a 100%-os relatív nedvesség értékeket sem érte el. A ködesemények detektálása jelenidő szenzor és vizuális megfigyelések alapján történt. Korábban már a szakirodalmi forrásokban megjelenik az egyes kapacitív relatív nedvességmérők 90%-os értékek feletti stabilitásának kérdése (Hassanzadeh et al., 2008), sőt a HMP45 ködesemények során mutatott viselkedését részletesen is elemezték (Kyroutac és Theisen, 2017). A probléma adott: hogyan lehet a relatív nedvesség értékeket rekonstruálni, hogy a fizikai folyamatokat megfelelően reprezentálja?

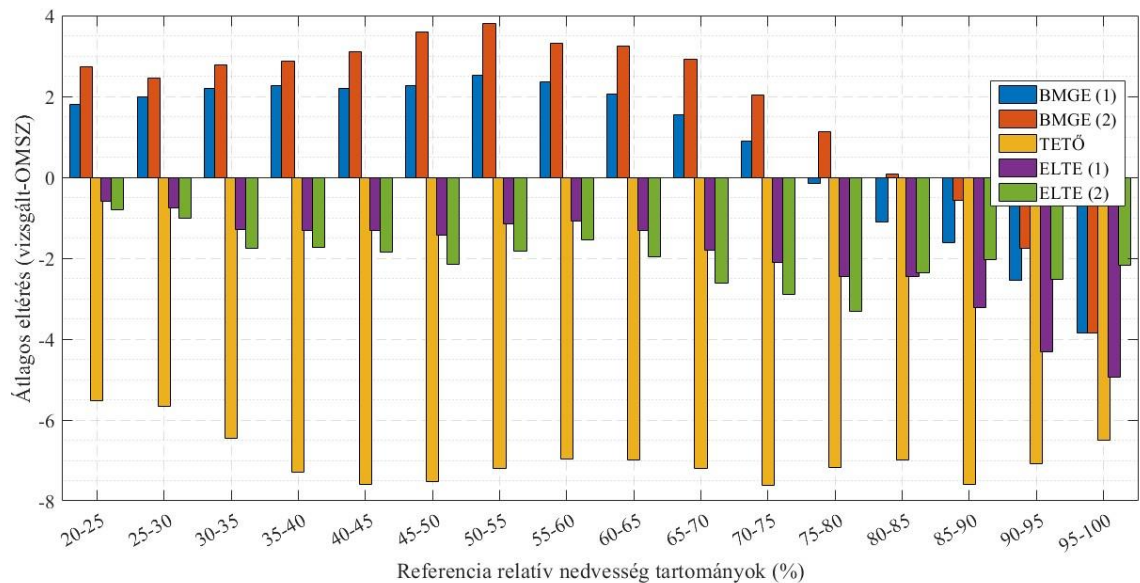
Mindenekelőtt a nedvességmérők kalibrációjáról kell szót ejtenünk. Az Országos Meteorológiai Szolgálat műszereit rendszeresen, akkreditált kalibráló laboratóriumban kalibrálja. A jelenleg használt műszerek esetén a kalibrációs konstansok digitálisan tárolhatók és állíthatók a műszereken, mely nagyban elősegíti a konzisztens adatminőség fenntartását. A régebbi, HMP45 típusú szenzorok esetén (melyek analóg, 0–1 VDC közötti feszültség-jelet adnak a mért paraméter függvényében) a kalibráció mechanikusan történik: 2 potenciométer állításával. E módszer jellegéből fakadóan kevésbé pontos, mint az előbbi. Figyelembe kell venni továbbá, hogy a laboratóriumi kalibráció ismert tulajdonságú gázok segítségével történik, nem a vízgőzkoncentráció beállításával. Még a megfelelően kalibrált szenzorok esetén is gyakori, hogy 100% feletti értékeket regisztrálnak, ezesetben – a legtöbb

gyártó, illetve a WMO ajánlásának megfelelően – a 100%-nál magasabb értékek 100%-nak vehetők. A HMP45 szenzorok Campbell Scientific adatgyűjtőre történő programozása során is lehetséges a 100% feletti „vágás” automatizálása, a szenzor kézikönyve ilyen megközelítést javasol. Operatív gyakorlatban ez az eljárás teljesen megszokott, a mérési pontosságot nem befolyásolja. A mi esetünkben azonban, amikor kifejezetten a 90% feletti nedvességértékek a lényegesek, és eltérő specifikáció műszerek álltak rendelkezésünkre, ez a módszer nem volt alkalmazható. Éppen ezért a 100% feletti nedvességértékek is rögzítésre kerültek az utólagos korrekciók elősegítésének érdekében.

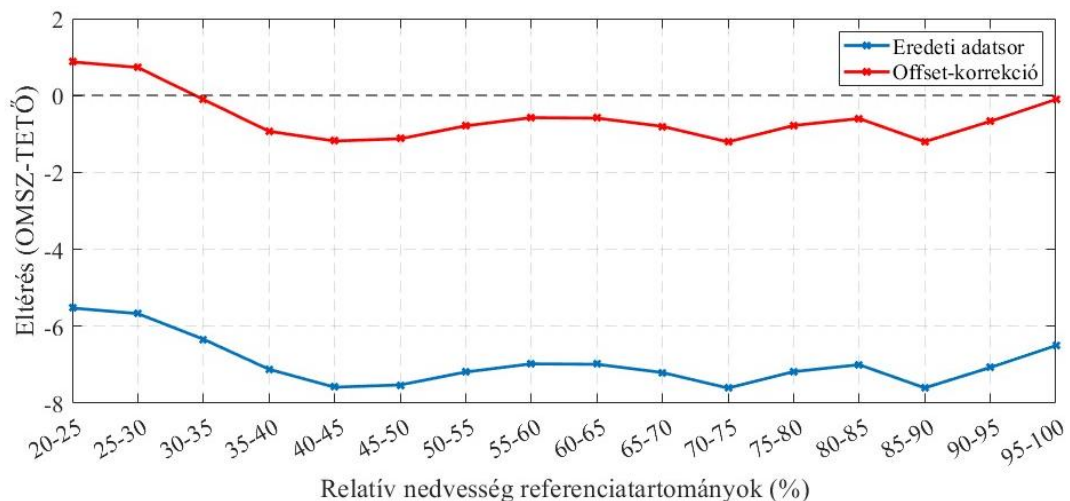
A vizsgálat során a 10 perces felbontású adatsorokat alkalmaztuk. Először is kiszámítottuk valamennyi adatsor maximumát. A 4. táblázatban látható, hogy azonos típusú műszerek között is több százalékos eltérések jelennek meg a maximumok között. Kíváncsiak voltunk a műszerek különböző relatív nedvesség tartományokban történő viselkedésére. Referenciának az OMSZ méréseit vettük (ez a műszer a legstabilabb magas nedvességértékek esetén), melyekből 5 százalékonként képeztünk tartományokat, és ezekben a tartományokban kiszámítottuk a többi műszer átlagos értékét, illetve az OMSZ mérésektől vett eltérését. Az eltéréseket eloszlását tartományonként a 34. ábra szemlélteti. Világosan kirajzolódik, hogy ~80% feletti méréseknél az eltérések szignifikánsabbá válnak, illetve előjelet is váltanak a BGME által használt szenzorok esetén. Az a következtetés vonható le, hogy a magas nedvességértékeknél (párasság és ködesemények) szisztematikus hiba jelenik meg minden alkalmazott műszer esetén. Kiemelkedően nagy eltérések látszanak a tetőn elhelyezett műszernél – itt az adatgyűjtést A/D konverter végezte, melynek hatására fix offset volt tapasztalható. Ezt az offset-et az adatsor eltolásának optimalizálásával határoztuk meg, 6,4 lett. A 35. ábrán látható az az OMSZ mérésektől vett eltérések eloszlása offset nélküli és annak alkalmazásával.

4. táblázat – Az egyes műszerek adatsorainak maximumai, valamint a referenciaérték (100,6%) és a 85%-hoz tartozó eltérés hányadosai (korrekciós faktor). A számok műszerazonosítókat jelölnek.

	BMG E (1)	BMGE (2)	TETŐ (eredeti)	TETŐ (offset)	ELTE (1)	ELTE (2)	OMSZ
Maximumok	100	99,5	96,1	102,5	98	101,8	100
K korrekciós faktor (Referencia/relatív eltérés)	1,04	1,076	1,405	0,891	1,2	0,929	1,04



34. ábra – Az egyes mérőműszerek átlagos eltérése (relatív nedvesség) az OMSZ referenciaműszer átlagától, 5%-os tartományonként



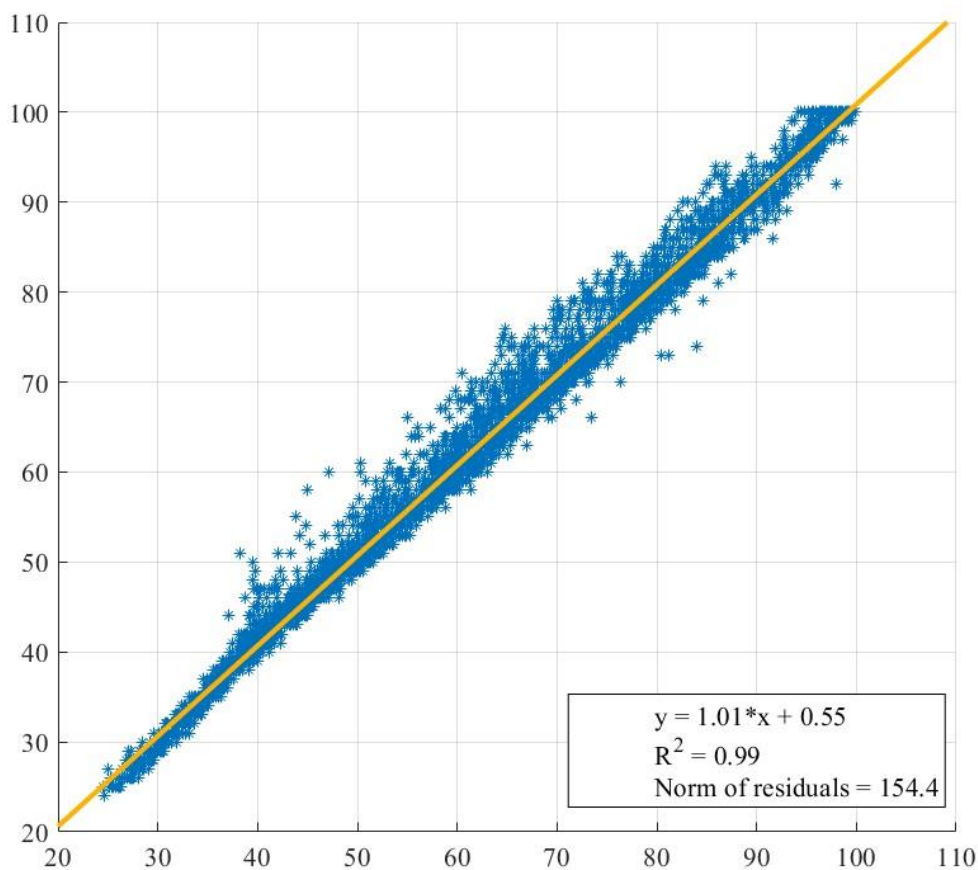
35. ábra – A tetőn (6 m) elhelyezett HMP45D és az OMSZ referenciaműszere közti átlagos eltérések (relatív nedvesség) tartományonként. Kék színnel a korrekció előtti, pirossal a korrekció utáni állapot ábrázolva.

Hogyan korrigálható az összes adatsor egyenletesen úgy, hogy a fizikai folyamatokat továbbra is tükrözze, azonban figyelembe vegye az egyes műszerek eltérő adottságait, állapotukat? Mivel az előbbieken alapján a műszerek 85% fölötti nedvesség esetén deviálnak szignifikánsan (melyet magyaráz a műszerekre vonatkozó nagyobb mérési bizonytalanság 90% feletti értékek esetén), csak ezeket az eseteket vizsgáltuk; markáns ködesemények alapján határoztuk meg a korrekció módját. A mért értékeket a 85% és a mérési adatsor maximuma között nyújtottuk/zsugorítottuk a 85% és 100,6% közötti tartományra. A 100,6%-os maximumérték empirikus – vizsgálataink szerint a legjobb eredmény ezzel a

beállítással érhető el, így ezt az értéket választottuk referenciának. A referenciaérték és a maximumok 85%-tól vett eltérésének hányadosából korrekciós tényezőt képeztünk (K) (4. táblázat), mellyel az alábbi [2] korrekciót vezettük be valamennyi adatsorra:

$$\text{Korrigált érték} = (\text{Eredeti} - 85) * K + 85 \quad [2]$$

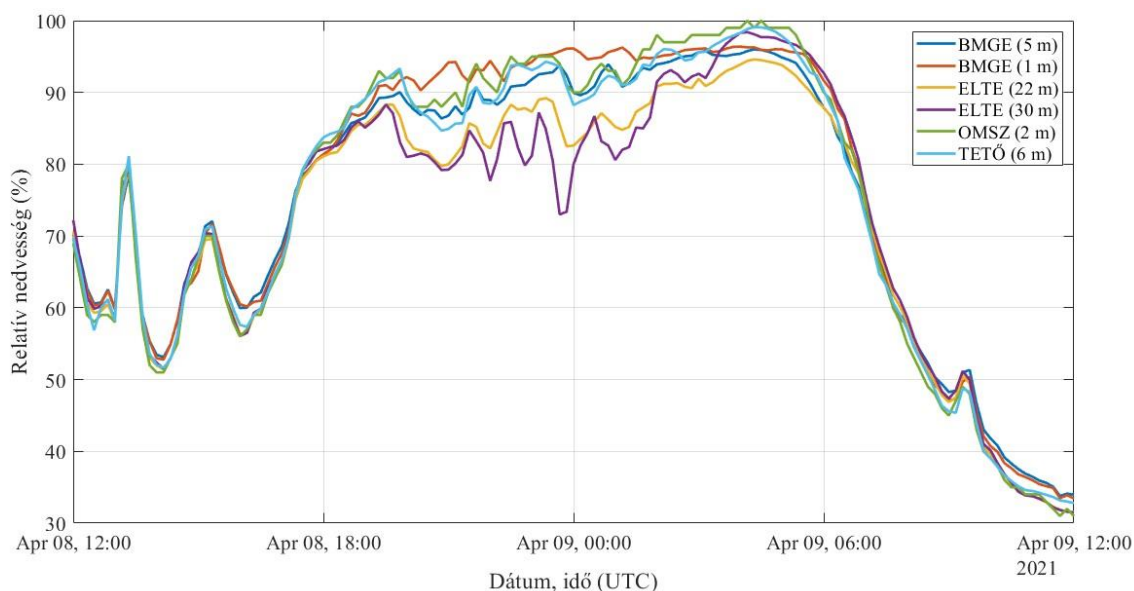
E maximum-alapú korrekció által valamennyi adatsor maximuma 100,6% lett, a 100% feletti értékeket 100%-nak vettük (vágás). A kapott adatsor vizuális elemzés alapján jól követi a ködképződés és disszipáció folyamatait. A korrekció minőségét lineáris regresszió segítségével vizsgáltuk. A 36. ábra szemlélteti a (kezdetben legnagyobb eltérést mutató), tetőn elhelyezett műszer és az OMSZ mérései közötti kapcsolatot a korrekció után ($R^2 = 0,99$) a teljes mérési tartományra. A többi műszer esetén is hasonló eredményeket kapva a korrekciót dokumentáltuk és az ellenőrzött adatsorokba beépítettük.



36. ábra – Az offset-korrekcióval és a 100% feletti értékek "vágásával" korrigált HMP45D (tető, 6 m) és a referenciaműszer (OMSZ) közötti lineáris kapcsolat

A folyamat előrevetít egy lehetséges jövőbeli kutatási célt is: érdemes lehet meghatározni a különböző gyártmányú, karakterisztikájú, műszerek ködhelyzetekre adott válaszát, azok viselkedését, valamint a még pontosabb korrekciók kidolgozásának lehetőségét.

Végezetül – a korrigált adatok alkalmazhatóságát illusztrálendő – egy kisugárzási ködesemény kialakulását mutatom be kizárólag a relatív nedvesség mérések alapján. A 37. ábrán látható a különböző magasságokban és különböző résztvevők által mért relatív nedvesség értékek 2021. április 8. 12:00 UTC és 2021. április 9. 12:00 UTC között. A nagytérségi időjárási helyzetet anticiklon alakította, így a lokális hatások dominanciájára számítunk. Látható, hogy már 18 UTC magasságában a felszínközeli rétegben nő a páratartalom; a naplementét követően a felszínközeli rétegben párásodik ki. Jól látszik, hogy a magasabb rétegekben (10 m, 30 m) lassabban nő a nedvesség, illetve nagyobb a fluktuáció. Április 9-re, 3–4 UTC között már ezekben a rétegekben is telítődik a légtömeg, a ködöt mind a szinoptikus megfigyelések, mind az automata látástávolság-érzékelő megerősítették. Napfelkelte után a besugárzás hatására intenzív átkeveredés indul meg, melynek hatására a köd rövid időn belül disszipálódik. Jól kirajzolódik az esettanulmány által, hogy a kisugárzási köd kialakulása során különböző rétegmagasságokban a relatív-nedvességtartalom eltérően viselkedik, azonban az átmeneti időszakokban (naplemente, napfelkelte) valamennyi magasságban együtt futnak a mért értékek.



37. ábra – Megfigyelt ködképződési folyamat 2021. április 9-én, hajnalban a különböző magasságokban elhelyezett műszerek utólagos korrekción átesett adatai alapján.

4. Összefoglalás

Diplomamunkámban a meteorológiához kapcsolódó minőségbiztosítási folyamatokat, rendszereket vizsgáltam. Áttekintettem a területen felmerülő legfontosabb alapelveket, melyeket a Meteorológiai Világszervezet, a WMO szabályoz. Foglalkoztam a meteorológiai szolgálatokra vonatkozó minőségirányítási szabványokkal, bemutattam az Országos Meteorológiai Szolgálat Minőségirányítási Rendszerét. Vizsgáltam az adatfeldolgozás folyamata során felmerülő minőség-ellenőrzési eljárásokat, különös hangsúlyt fektetve a mikrometeorológiai mérésekre. Bemutattam a metaadatok csoportosításának szakirodalmi lehetőségeit, jelentőségüket, illusztráltam a résztudományterületek metaadat-formátumai harmonizációjában rejlő potenciált. Röviden ismertettem a meteorológia specifikus adatformátumainak jellemzőit, konkrétan a netCDF, a HDF és a GRIB formátumokat.

Dolgozatom második részének alapját az ELTE Meteorológiai Tanszéken az elmúlt 8 évben (2015–2022) végbement mikrometeorológiai mérések képezték, konkrétan azok, melyekben személyesen részt vettem. Bemutattam a mérések fő célkitűzéseit, az alkalmazott mérés technikai eljárásokat. Foglalkoztam a mérési adatok egységes adatbázisba rendezésével, az expedíciók között egyforma adatstruktúra kialakításával, illetve a kapcsolódó adatfeldolgozás módszertanával. E tekintetben nagymértékben támaszkodtam a rendelkezésre álló hazai és nemzetközi szakirodalmi ajánlásokra (Foken et al., 2004; Mészáros, 2013; Zahn et al., 2016; WMO, 2018; WMO, 2021). Kiemeltem az egyes kampányok során felmerülő minőségbiztosítási és minőség-ellenőrzési aspektusokat. Végezetül a köd-mikrofizikai mérési kampány egy esettanulmányán keresztül illusztráltam a relatív nedvesség-mérő műszerek eltérő mérési tulajdonságaiból adódó hibalehetőséget és annak egy lehetséges utólagos korrekcióját. A korrekció alkalmazhatóságát egy konkrét, megfigyelt ködesemény (2021. április 9-e, hajnal) mutattam be, ahol a különböző szinteken mért relatív nedvesség jól kirajzolta a kisugárzási köd képződésének és disszipációjának dinamikáját.

5. Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, Dr. Weidinger Tamásnak a szakmai vezetésért, a kutatási lehetőségek biztosításáért, az alkotó együttműködésért.

Köszönet illeti Dr. Mészáros Róbertet, az ELTE Meteorológiai Tanszék vezetőjét szakmai támogatásáért, értékes tanácsaiért, tanulmányaim és a kutatómunkám értő gonddal való segítségével.

Szintén köszönet illeti Prof. Dr. Salma Imre az egyetemi tanárt, az MTA doktorát, aki kutatásaim során tanácsaival és bátorító szavaival segítette előrehaladásomat.

Külön köszönet illeti Dr. Prof. Joan Cuxart Rodamilans-ot (Universitat de les Illes Balears) a kötött ballonos mérésekbe történő bevezetésért.

Köszönetet érdemel Dr. Dezső József, a Pécsi Tudományegyetem Természet- és Környezetföldrajzi Tanszék adjunktusa a DIVERFARMING projektben történő részvételi lehetőség biztosításáért és munkámba fektetett bizalmáért.

Köszönöm a Nedel-Market Kft. és a villányi Gere Attila Pincészete támogatását a DIVERFARMING projektmunka megvalósításában.

Szintén köszönetet érdemel Mádlné Dr. Szőnyi Judit az ELTE TTK Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék docense a Gellért-tározó kísérletben történő részvétel lehetőségéért, valamint Dr. Virág Magdolna a barlangi mérések megszervezésért.

Hálásan köszönöm a Zágrábi Egyetem munkatársainak, Prof. Dr. Sc. Branko Grisogononak, Dr. Željko Večenajnak és Damir Ptičarnak a közös mérések során szerzett rengeteg szakmai tapasztalatot.

Szintén köszönöm Dr. Horváth László címzetes egyetemi tanár segítségét a jakabszállási és villányi terepi mérések kivitelezésében és a rendszeres felülvizsgálatok megoldásában.

Végezetül, de nem utolsósorban hálásan köszönöm Szüleimnek, Tordai Vilmosnak és Tordainé Vida Katalinnak tanulmányaim sokéves támogatását és előrelátó segítségüket.

6. Irodalomjegyzék

- Ács, F., Kristóf, E., Zsákai, A., Kelemen, B., Szabó, Z., Marques Vieira, L.A., 2021: Weather in the Hungarian Lowland from the Point of View of Humans. *Atmosphere* 12, 84.
- Anda A., Kocsis T., Kovács A., Tőkei L. és Varga, Z., 2010: Agrometeorológiai és klimatológiai alapismeretek. Mezőgazda Kiadó. 382 p. ISBN 978-963-286-598-0
- Arya, S. P., 2001: Introduction to micrometeorology. San Diego: Academic Press. 420 p. ISBN 0-12-059354-8
- Arya, S.P., 2005: Micrometeorology and Atmospheric Boundary Layer. *Pure and applied geophysics*. 162, 1721–1745
- Aubinet, M., Grelle, A., Ibrom, A., Rannik, U., Moncrieff, J., Foken, T., Kowalski, A. S., Martin, P. H., Berbigier, P., Bernhofer, C., Clement, R., Elbers, J., Granier, A., Grünwald, T., Morgenstern, K., Pilegaard, K., Rebmann, C., Snijders, W., Valentini, R., Vesala, T., 2000: Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: The EUROFLUX methodology. *Advances in Ecological Research*, 30, 113-175.
- Aubinet, M., Vesala, T., Papale, D., 2012: Eddy covariance: a practical guide to measurement and data analysis. Springer Science & Business Media. 438 p. ISBN 978-94-007-2350-4
- Bagiorgas, H.S., Assimakopoulos, M.N., Patentaki, A., Konofaos, N., Matthopoulos, D.P., Mihalakakou, G., 2007: The design, installation and operation of a fully computerized, automatic weather station for high quality meteorological measurements. *Fresenius Environmental Bulletin*, 16(8), 948-962.
- Balasubramanian, A., 2016: Measurement of Meteorological Variables. Technical report. Department of Studies in Earth Science, University of Mysore, 13 p.
- Baldocchi, D., Falge, E., Gu, L., Olson, R., Hollinger, D., Running, S., Anthoni, P., Bernhofer, Ch., Davis, K., Evans, R., Fuentes, J., Goldstein, A., Katul, G., Law, B., Lee, X., Malhi, Y., Meyers, T., Munger, W., Oechel, W., Paw U, K. T., 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(11), 2415-2434.
- Barcza Z., Fodor N., (Szerkesztők) Árendás T., Árvai M., Barcza Z., Bartholy J., Cseresnyés I., Fodor N., Gell Gy., Gelybó Gy., Haszpra L., Hidy D., Horváth F., Ittész D., Koós S., Laborczi A., Marton A.T., Mészáros J., Nagy Z., Papp G., Pásztor L., Pintér K., Pokovai K., Pongrácz R., Rada M., Salma I., Sándor R., Szatmári G., Takács K., Takács T., 2018: Az AgroMo megközelítés: integrált biogeokémiai és mezőgazdasági modellrendszer kialakítása a hazai agroklimatológiai környezetben – modellfejlesztés és megfigyelőrendszer kapcsolata és együttműködése. White paper. Martonvásár. 150 oldal. http://agromodel.agrar.mta.hu/files/GINOP_SZAKMAI_ANYAG_2017_v14_FINAL.pdf. (utoljára megnyitva: 2022. 05. 13.)
- 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, 108027.
- Bendat J.S., Piersol A.G., 2010: Random Data: Analysis and Measurement Procedures. Wiley & Sons, 4nd edition. 640 p. ISBN: 978-0-470-24877-5
- Bhattacharya, B.K., Dutt, C.B.S., Parihar, J.S., 2009: INSAT uplinked Agromet Station—a scientific tool with a network of automated micrometeorological measurements for soilcanopy-atmosphere feedback studies. *ISPRS Archives XXXVIII-8/W3 Workshop Proceedings: Impact of Climate Change on Agriculture*. 72-77. https://www.isprs.org/proceedings/xxxviii/8-w3/B1/11-23_F.pdf (utoljára megnyitva: 2022. 05. 13.)
- Bordás, Á., Kiss, T., Weidinger, T., Tordai, Á., Gyöngyösi, A.Z., Unger, J., Gál, T., Sebők, I., 2017: The urban boundary layer 2016 campaign. In: Horvath, C., Croitoru, A.E., Guettler, I., Man, T.C., and Bartok, B. (szerkesztők): *Climate System of the Pannonian Basin (PannEx) 3rd Workshop*, Cluj-Napoca, Románia, 45 p. <https://pannex.org/workshops/> (utoljára megnyitva: 2022. 05. 13.)

- Breuer, H., Berényi, A., Mari, L., Nagy, B., Szalai, Z., Tordai, Á., Weidinger, T., 2020: Analog site experiment in the High Andes-Atacama Region: surface energy budget components on Ojos del Salado from field measurements and weather research and forecasting simulations. *Astrobiology*. 20(6), 684-700.
- Campbell, J.L., Rustad, L.E., Porter, J.H., Taylor, J.R., Dereszynski, E.W., Shanley, J.B., Gries, C., Henshaw, D.L., Martin, M.E., Sheldon, W.M., 2013: Quantity is Nothing without Quality: Automated QA/QC for Streaming Environmental Sensor Data. *BioScience*, 63(7), 574-585.
- Cuxart, J., Weidinger T., Wrenger, B., Matjacic B., Simó G., Villagrasa, M. D., Bordás Á., Tordai, Á., Torma, P., Nagy Z., 2016a: Nocturnal surface thermal inversions in the Pannonian Basin, EMS2016-334 - 16th EMS Annual Meeting & 11th European Conference on Applied Climatology (ECAC)
- Cuxart, J., Wrenger, B., Martínez-Villagrasa, D., Reuder, J., Jonassen, M.O., Jiménez, M.A., Lothon, M., Lohou, F., Hartogensis, O., Dünnermann, J., Conangla, L., Garai, A., 2016b: Estimation of the advection effects induced by surface heterogeneities in the surface energy budget, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 9489–9504
- Dian, Cs., Pongracz, R., Incze, D., Bartholy, J., Talamon, A., 2019: Analysis of the urban heat island intensity based on air temperature measurements in a renovated part of Budapest (Hungary). *Geographica Pannonica*. 23, 277-288.
- Estévez, J., Gavilán P., Giráldez J.V., 2011: Guidelines on validation procedures for meteorological data from automatic weather stations. *Journal of Hydrology*, 402(1-2), 144-154.
- Faybishenko, B., Versteeg, R., Pastorello, G., Dwivedi, D., Varadharajan, C., Agarwal, D., 2022: Challenging problems of quality assurance and quality control (QA/QC) of meteorological time series data. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 36(4), 1049-1062.
- Feng, S., Hu, Q., Qian, W., 2004: Quality control of daily meteorological data in China, 1951–2000: a new dataset. *International Journal of Climatology*, 24, 853-870.
- Fiebrich, C. A., Crawford, K. C., 2001: The Impact of Unique Meteorological Phenomena Detected by the Oklahoma Mesonet and ARS Micronet on Automated Quality Control. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82(10), 2173-2188.
- Foken, T., Göckede, M., Mauder, M., Mahrt, L., Amiro, B., Munger, W., 2004: Post-Field Data Quality Control. In: *Handbook of Micrometeorology* (szerk.: Lee, X., Massman, W., Law, B.). Atmospheric and Oceanographic Sciences Library, vol 29. Springer, Dordrecht. 181–208.
- Foken, T., Aubinet, M., Leuning, R., 2012: The Eddy Covariance Method. In: *Eddy Covariance* (szerk.: Aubinet, M., Vesala, T., Papale, D.). Springer Atmospheric Sciences, Dordrecht. 1-19.
- Foken, T., Leuning, R., Oncley, S., Mauder, M., Aubinet, M., 2012: Corrections and data quality control. In *Eddy Covariance* (szerk.: Aubinet, M., Vesala, T., Papale, D.). Springer, Dordrecht. 85-131.
- Foken, T., Napo, C. J., 2008: *Micrometeorology*. Springer Science & Business Media, Berlin. 308 p.
- Gandhi, A., Gyöngyösi, A. Z., Tordai, Á. V., Torma, P., Rehák, A., Szilágyi, M., Horváth, Á., Weidinger, T., 2020: Micrometeorological measurements of foggy situations in Siójut (November - December, 2018). In: *Jelenlegi PhD-kutatások a 75 éves Meteorológiai Tanszéken – Egyetemi Meteorológiai Füzetek No. 33* (szerk.: Ponrácz R., Mészáros R., Kis A.) 40-47. http://nimbus.elte.hu/oktatas/metfuzet/EMF033/PDF/05_Gandhi-et-al.pdf (utoljára megnyitva: 2022. 05. 13.)
- Gandin, L. S. (1988). Complex quality control of meteorological observations. *Monthly Weather Review*, 116(5), 1137-1156.
- Glickman, T. S. (Editor), (2000) *Glossary of Meteorology*, 2nd edition. American Meteorological Society, Boston. 855 pp.
- 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., Koebke, 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., and Yakir, D., 2008: Quality control of CarboEurope flux data – Part 1: Coupling footprint analyses with flux data quality assessment to evaluate sites in forest ecosystems, *Biogeosciences*, 5, 433–450.
- Gunawardena, N., Durand, P., Hedde, T., Dupuy, F., Pardyjak, E., 2022: Data Filling of Micrometeorological Variables in Complex Terrain for High-Resolution Nowcasting. *Atmosphere*. 13(3), 408.
- Hassanzadeh, A., Borghei, A. Lindquist, R.G., 2008: Relative humidity measurement using capacitive sensors. *IEEE SoutheastCon 2008*, 396–398
- Hegedűs A., Csondor K., 2016: OTKA NK 101356 projekt beszámoló. Kézirat.
- Hermann E., Nagy J., Tóth R., Klaibán S., Kordás N., Balázs R., Bujdosó B., Zsoldos E., Suhai B., Suhai Gy., 2021: A földfelszíni megfigyelőhálózat adatgyűjtésébe épített adatellenőrzés, folyamatban lévő fejlesztések. *Légekör* 66. évfolyam, 2021/2, 19–33.
- Horváth Gy., 2019: Mérőhálózat, adatbázis, adatellenőrzés - A földfelszíni megfigyelés jövője. 45. Meteorológiai Tudományos Napok. (2019. november 14–15.) Értékteremtés meteorológiai információkkal. (szerk.: Lakatos, M.)
- Izsák B., Szentimrey T., 2019: Archív napi adatok ellenőrzése MASH eljárással: elmélet és gyakorlat találkozása. 45. Meteorológiai Tudományos Napok. (2019. november 14–15.) Értékteremtés meteorológiai információkkal. (szerk.: Lakatos, M.)
- Karkouch, A., Mousannif, H., Al Moatassime, H., Noel, T., 2016: Data quality in internet of things: A state-of-the-art survey. *Journal of Network and Computer Applications*, 73, 57–81.
- Kovács-Bodor, P., Anda, D., Müller, I., Óváry, M., Jurecska, L., Horváth, Á., Mádl-Szőnyi, J., 2018: Integration of In Situ Experiments and Numerical Simulations to Reveal the Physicochemical Circumstances of Organic and Inorganic Precipitation at a Thermal Spring. *Aquatic Geochemistry*, 24(3).
- Kyrkouac, J., Theisen, A., 2017: Biases of the MET Temperature and Relative Humidity Sensor (HMP45) Report (No. DOE/SC-ARM-TR-192). DOE Office of Science Atmospheric Radiation Measurement (ARM) Program (United States).
- Lacagnina, C., Doblas-Reyes, F., Larnicol, G., Buontempo, C., Obregón, A., Costa-Surós, M., San-Martín, D., Bretonnière, P.-A., Polade, S.D., Romanova, V., Putero, D., Serva, F., Llabrés-Brustenga, A., Pérez, A., Cavaliere, D., Membrive, O., Steger, C., Pérez-Zanón, N., Cristofanelli, P., Madonna, F., Rosoldi, M., Riihelä, A. and Díez, M.G., 2022: Quality Management Framework for Climate Datasets. *Data Science Journal*, 21(1), 10
- Lee, X., Massman W., Law, B., 2004: Handbook of micrometeorology: a guide for surface flux measurement and analysis. Springer Science & Business Media, 264p.
- Ma, Y., Hu, Z., Xie, Z., Ma, W., Wang, B., Chen, X., Li, M., Zhong, L., Sun, F., Gu, L., Han, C., Zhang, L., Liu, X., Ding, Z., Sun, G., Wang, S., Wang, Y., and Wang, Z., 2020: A long-term (2005–2016) dataset of hourly integrated land–atmosphere interaction observations on the Tibetan Plateau, *Earth System Science Data*, 12, 2937–2957.
- Mádl-Szőnyi J., 2012: Detailed research Plan to OTKA NK 101356. Evaluation of hypogenic karstification focusing on microbially mediated processes – interdisciplinary research. Manuscript OTKA Project. 10p.
- Mateo, M.A.F., Leung, C.K.-S., 2009: CHARIOT: A Comprehensive Data Integration and Quality Assurance Model for Agro-Meteorological Data. *Data Quality and High-Dimensional Data Analysis. Proceedings of the DASFAA 2008 Workshops*, 21–41.
- Mauder, M., Liebethal, C., Göckede, M., Leps, J. P., Beyrich, F., Foken, T., 2006: Processing and quality control of flux data during LITFASS-2003. *Boundary-Layer Meteorology*, 121(1), 67–88.
- Mauder, M., Foken, T., Clement, R., Elbers, J. A., Eugster, W., Grünwald, T., Heusinkveld, B., and Kolle, O., 2008: Quality control of CarboEurope flux data – Part 2: Inter-comparison of eddy-covariance software, *Biogeosciences*, 5, 451–462.

Mauder, M.R., Cuntz, M., Drüe, C., Graf, A., Rebmann, C., Schmid, H.P., Schmidt, M., Steinbrecher, R., 2013: A strategy for quality and uncertainty assessment of long-term eddy-covariance measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 169, 122-135.

Mauder, M., Foken, T., 2015: Documentation and instruction manual of the eddy-covariance software package TK3 (update). *Arbeitsergebnisse, Universität Bayreuth, Abt. Mikrometeorologie* (ISSN 1614-8916). 62p. <https://epub.uni-bayreuth.de/2130/1/ARBERG062.pdf> (utoljára megnyitva: 2022. 05. 13.)

Meek, D.W., Hatfield, J.L., 1994: Data quality checking for single station meteorological databases. *Agricultural and Forest Meteorology*, 69(1-2), 85-109.

Mészáros, R., 2013: Meteorológiai műszerek és mérőrendszerek. TÁMOP-4.1.2 A1 és a TÁMOP-4.1.2 A2 könyvei. 204p. <https://dtk.tankonyvtar.hu/xmlui/handle/123456789/11991?show=full> (utoljára megnyitva: 2022. 05. 13.)

Mészáros, R., Leelőssy, Á., Csapó, P., Boda, B., Kovács, A., Lagzi, I., 2016a: Monitoring of atmospheric trace gases in Budapest by mobile measurements. *EMS Annual Meeting Abstracts: 16th EMS / 11th ECAC. Trieste, Olaszország. EMS2016-501*. <https://meetingorganizer.copernicus.org/EMS2016/EMS2016-501.pdf> (utoljára megnyitva: 2022. 05. 13.)

Mészáros, R., Csapó, P., Boda, B., Leelőssy, Á., 2016b: Légszennyezettségi viszonyok mérése Budapesten kerékpárra szerelhető mérőrendszerrel. In: *Kutatási és operatív feladatok meteorológusként – Egyetemi Meteorológiai füzetek No. 27.* (szerk.: Ponrácz R., Mészáros R., Kis A.) 106-111, ISBN 978-963-284-807-5

Milošević, D., Lalić, B., Savić, S., Bechtel, B., Roantree, M., Orlandini, S., 2022: FAIRNESS Project - FAIR Ntwork of micrometeorological measurements. *EGU22-971, EGU General Assembly 2022*

Moncrieff, J. B., Massheder, J. M., DeBruin, H., Elbers, J., Friborg, T., Heusinkveld, B., Kabat, P., Scott, S., Søgaard, H., Verhoef, A., 1997: A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapor and carbon dioxide. *Journal of Hydrology*. 188/189(1-4), 589-611.

Muller, C.L., Chapman, L., Grimmond, C.S.B., Young, D.T., Cai, X.M., 2013: Toward a standardized metadata protocol for urban meteorological networks. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(8), 1161-1185.

Nagy B., Mari L., Kovács J., Nemerkenyi Zs., Heiling Zs., 2014: Adatok a magashegyi sivatag felszíne alól – avagy víz és jég a Föld legszárazabb magashegységén, az Ojos del Saladón. In: *Légköri folyamatok előrejelzésének módszerei és alkalmazásai. Egyetemi Meteorológiai füzetek No. 25.* (szerk.: Ponrácz R., Mészáros R., Kis A., Leelőssy Á., Sábitz J.) 123–128, ISBN 978-963-284-538-8

Nagy B., 2016: Adatvadászok: Ojos del Salado 3.0. *A Földgömb* 34(303), 20–34.

Nagy Z., 2010: Fűves ökoszisztémák CO₂-forgalma. *MTA Doktori Értekezés, Gödöllő*, 113 p.

Pastorello, G., Trotta, C., Canfora, E., Cheah, Y., Christianson, D., Chu, H., Poindexter, C., Chen, J., Elbashandy, A., Humphrey, M., Isaac, P., Polidori, D., Ribeca, A., Van Ingen, C., Zhang, L., Amiro, B., Ammann, C., Arain, M., Ardö, J., Arkebauer, T., Arndt, S., Arriga, N., Aubinet, M., Aurela, M., Baldocchi, D., Barr, A., Beamesderfer, E., Belelli Marchesini, L., Bergeron, O., Beringer, J., Bernhofer, C., Berveiller, D., Billesbach, D., Black, T., Blanken, P., Bohrer, G., Boike, J., Bolstad, P., Bonal, D., Bonnefond, J., Bowling, D., Rosvel, B., Brodeur, J., Brümmer, C., Buchmann, N., Burban, B., Burns, S., Buysse, P., Cale, P., Cavagna, M., Cellier, P., Chen, S., Chini, I., Christensen, T., Cleverly, J., Collalti, A., Consalvo, C., Cook, B., Cook, D., Coursolle, C., Cremonese, E., Curtis, P., D`andrea, E., Da Rocha, H., Dai, X., Davis, K., De Cinti, B., De Grandcourt, A., De Ligne, A., De Oliveira, R., Delpierre, N., Desai, A., Di Bella, C., Di Tommasi, P., Dolman, H., Domingo, F., Dong, G., Dore, S., Duce, P., Dufrêne, E., Dunn, A., Dušek, J., Eamus, D., Eichmann, U., Elkhidir, H., Eugster, W., Ewenz, C., Ewers, B., Famulari, D., Fares, S., Feigenwinter, I., Feitz, A., Fensholt, R., Filippa, G., Fischer, M., Frank, J., Galvagno, M., Gharun, M., Gianelle, D., Gielen, B., Gioli, B., Gitelson, A., Gode Ballarin, I., Goeckede, M., Goldstein, A., Gough, C., Goulden, M., Graf, A., Griebel, A., Gruening, C., Grünwald, T., Hammerle, A., Han, S., Han, X., Hansen, B., Hanson, C., Hatakka, J., He, Y., Hehn, M., Heinesch, B., Hinko-Najera, N., Hörtnagl, L., Hutley, L., Ibrom, A., Ikawa, H., Jackowicz-Korczynski, M., Janouš, D., Jans, W., Jassal, R., Jiang, S., Kato, T., Khomik, M., Klatt, J., Knohl, A., Knox, S., Kobayashi, H., Koerber, G., Kolle, O., Kosugi, Y., Kotani, A., Kowalski, A., Kruijt, B., Kurbatova, J., Kutsch, W., Kwon, H., Launiainen, S., Laurila, T., Law, B., Leuning, R., Li, Y., Liddell, M., Limousin, J., Lion, M., Liska, A., Lohila, A., López-Ballesteros, A., López-Blanco, E., Loubet, B., Loustau, D., Lucas-Moffat, A., Lüers, J., Ma, S.,

- Macfarlane, C., Magliulo, V., Maier, R., Mammarella, I., Manca, G., Marcolla, B., Margolis, H., Marras, S., Massman, W., Mastepanov, M., Matamala, R., Matthes, J., Mazzenga, F., Mccaughey, H., Mchugh, I., Mcmillan, A., Merbold, L., Meyer, W., Meyers, T., Miller, S., Minerbi, S., Moderow, U., Monson, R., Montagnani, L., Moore, C., Moors, E., Moreaux, V., Moureaux, C., Munger, J., Nakai, T., Neiryneck, J., Nesic, Z., Nicolini, G., Noormets, A., Northwood, M., Noretto, M., Nouvellon, Y., Novick, K., Walter, O., Olesen, J., Ourcival, J., Papuga, S., Parmentier, F., Paul-Limoges, E., Pavelka, M., Peichl, M., Pendall, E., Phillips, R., Pilegaard, K., Pirk, N., Posse, G., Thomas, P., Prasse, H., Prober, S., Rambal, S., Rannik, Ü., Raz-Yaseef, N., Reed, D., Resco De Dios, V., Restrepo-Coupe, N., Reverter, B., Roland, M., Sabbatini, S., Sachs, T., Saleska, S., Sánchez-Cañete, E., Sanchez-Mejia, Z., Schmid, H., Schmidt, M., Schneider, K., Schrader, F., Schroder, I., Scott, R., Sedlák, P., Serrano-Ortiz, P., Shao, C., Shi, P., Shironya, I., Siebicke, L., Šigut, L., Silberstein, R., Sirca, C., Spano, D., Steinbrecher, R., Stevens, R., Sturtevant, C., Suyker, A., Tagesson, T., Takanashi, S., Tang, Y., Tapper, N., Thom, J., Tiedemann, F., Tomassucci, M., Tuovinen, J., Urbanski, S., Valentini, R., Van Der Molen, M., Van Gorsel, E., Van Huissteden, K., Varlagin, A., Verfaillie, J., Vesala, T., Vincke, C., Vitale, D., Vygodskaya, N., Walker, J., Walter-Shea, E., Wang, H., Weber, R., Westermann, S., Wille, C., Wofsy, S., Wohlfahrt, G., Wolf, S., Woodgate, W., Yuelin, L., Zampieri, R., Zhang, J., Zhou, G., Zona, D., Agarwal, D., Biraud, S., Torn, M. and Papale, D., 2020: The FLUXNET2015 dataset and the ONEFlux processing pipeline for eddy covariance data. *Scientific Data*, 7(1), 225 p., ISSN 2052-4463 (online).
- Pastorello, G., Trotta, C., Canfora, E., Chu, H., Christianson, D., Cheah, Y. W., Polidori, D., Ribeca, A., Agarwal, D., Biraud, S., Torn, M.S., Papale, D., 2020b: New metadata and data policy for the FLUXNET2015 dataset. In: AGU Fall Meeting Abstracts, Vol. 2020, B097-0010.
- Pongrácz, R., Bartholy, J., Dezső, Z., & Dian, Cs., 2016: Analysis of the air temperature and relative humidity measurements in Budapest-Ferencváros. *Hungarian Geographical Bulletin*, 65(2), 93-103.
- Poulos, G.S., Blumen, W., Fritts, D.C., Lundquist, J.K., Sun, J., Burns, S.P., Nappo, C., Banta, R., Newsom, R., Cuxart, J., Terradellas, E., Balsley, B. and Jensen, M., 2002: CASES-99: A comprehensive investigation of the stable nocturnal boundary layer. *Bulletin of the American Meteorological Society* 83, 555-581.
- Rollenbeck, R., Trachte, K., Bendix, J., 2016: A new class of quality controls for micrometeorological data in complex tropical environments. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 33(1), 169-183.
- Salavec P., 2016: Örvény-kovariancia számítási módszerek összehasonlító vizsgálata a PABLS-2015 Szegedi Határréteg Mérési Program során (Témavezető: Weidinger, T.), ELTE Meteorológiai Tanszék, 85 oldal
- Shafer, M. A., Fiebrich, C. A., Arndt, D. S., Fredrickson, S. E., Hughes, T.W., 2000: Quality assurance procedures in the Oklahoma Mesonet. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 17(4), 474-494.
- Sherstnyov, V.S., Sherstnyova, A.I., Botygin, I.A., Kustov, D.A., 2016: Distributed Information System for Processing and Storage of Meteorological Data. In: *Key Engineering Materials*, 685, 867-871. Trans Tech Publications, Ltd.
- Stieber J. 2016: A Szemlő-hegyi-barlang aeroszol-monitoring programjának eredményei. – *Karszt és Barlang* 2012-14, 71-78.
- Strangeways, I., 2003: *Measuring the Natural Environment*. Cambridge University Press, Cambridge. 548 p.
- Szalai V., 2020: Referencia evapotranszpiráció alapú párolgás becslések hazai spárga- és szőlőültetvényeken. Diplomamunka (Témavezető: Weidinger, T.), ELTE Meteorológiai Tanszék, 74 p.
- Tordai Á.V., 2015: Adatfeldolgozási módszerek fejlesztése a 2015-ös PABLS határréteg mérési program során. TDK Dolgozat (Témavezető: Weidinger, T.), ELTE Meteorológiai Tanszék, Budapest. http://nimbus.elte.hu/docs/2015_Meteorologus_TDK_program.pdf (Utoljára megnyitva: 2020.05.15.)
- Tordai Á.V., 2016: Adatfeldolgozási módszerek fejlesztése a 2015-ös PABLS határréteg mérési program során. OFKD Dolgozat (Témavezető: Weidinger, T.) XV. Országos Felsőoktatási Környezettudományi Diákkonferencia, Szeged. 2016. március 30. - április 01., 41 p.
- Tordai Á.V., 2017: Mikrometeorológiai mérőrendszer kialakítása és alkalmazása síkvidéki, magashegyi és barlangi körülmények között. XXXIII. Országos Tudományos Diákköri Konferencia, Fizika, Földtudományok és Matematika Szekció Kiadványkötet, 148. oldal. http://otdt.hu/upload/files/1524303445_fifoma_rezume.pdf (Utoljára megnyitva: 2020.05.15.)

Tordai Á.V., 2020: Mikrometeorológiai mérőrendszerek tervezése, kivitelezése és az adatfeldolgozási módszerek fejlesztése. Szakdolgozat (Témavezető: Weidinger, T.), ELTE Meteorológiai Tanszék, 64 p.

Urraca, R., Gracia-Amillo, A.M., Huld, T.A., Martinez-de-Pison, F.J., Trentmann, J., Lindfors, A.V., Riihelä, A., Sanz-García, A., 2017: Quality control of global solar radiation data with satellite-based products. *Solar Energy*, 158, 49-62.

Vickers, D., Mahrt, L., 1997: Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 14, 512–526.

Weidinger T., Bordás Á., 2007: A felszínközeli légréteg és a planetáris határreteg kutatásának főbb kérdései. In: *Felhőfizika és mikrometeorológia*, 32. Meteorológiai Tudományos Napok 2006. (Szerk: Weidinger T., Geresdi I.), Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 105–124.

Weidinger, T., 2012: Mikrometeorológiai mérések az ELTE Meteorológiai Tanszékén Léggör, 57. évfolyam 4. szám 137-143. ISSN 0 133-3666

Weidinger, T., Cuxart, J., Gyöngyösi, A. Z., Horváth, Gy., Istenes, Z., Nagy, Z., Salavec, P., Simó, G., Tátrai, D., Tordai, Á., Torma, P., Wrenger, B., 2016a: PABLS'15 Boundary Layer Measurement Campaign, Szeged. Poster, Second Pannex Workshop on the climate system of the Pannonian Basin

Weidinger T., Nagy B., Mádl Sz. J., Bodor P., Salavec P., Tordai Á., 2016b: Terepi mérések a Gellért-hegy belsejétől a Száraz-Andokig In: *Kutatási és operatív feladatok meteorológusként – Egyetemi Meteorológiai füzetek No. 27.* (szerk.: Ponrácz R., Mészáros R., Kis A.) 162-172, ISBN 978-963-284-807-5

Weidinger T., 2018a: Négy kutatási program, négy ábra, négy témakör - mikrometeorológiai témaajánló. In: *Aktuális környezeti problémák az időjárás és az éghajlat összefüggésében – Egyetemi Meteorológiai füzetek No. 30.* (szerk.: Ponrácz R., Mészáros R., Kis A.) ISBN 978-963-489-030-0

Weidinger, T., Virág, M., Tordai, Á.V., Lukács, D., Leél-Össy, Sz., Mindszenty, A., 2018b: Barlangklimatológiai mérések a Budai-termálkarszton. In: *Földtudományok és környezet – harmóniában: tanulmánykötet* (szerk.: Cserny, T., Alpek, B. L.), Pécs, Magyarország, Magyarhoni Földtani Társulat, 129-134. ISBN 9789638221742

Weidinger, T., Ács, F., Breuer, H., Tordai, Á., Vecenaj, Z., Ptičar, D., Grisogono, B., 2019a: A felszíni energiaháztartás komponensek mérése és modellezése a zágrábi szőlőhegyen (Jazbina, 2017-2019) In: 11. Szőlő és Klíma Konferencia Kőszeg (szerk: Puskás, J.), 2019. április 26–27. Program és az előadások összefoglalói, 36 p. https://koszeg.hu/pictures/downloadmanager/42/1487/szolo_es_klima_1913.pdf (utoljára megnyitva: 2022. 05. 13.)

Weidinger, T., Večenaj, Ž., Krámer, T., Lázár, I., Gyöngyösi, A. Z., Ptičar, D., Torma, P., Rehák, A., Szilágyi, M., Breuer, H., Tordai, Á., Bordás, Á., Grisogono, B., 2019b: Joint Croatian-Hungarian micrometeorological experiments in Zagreb vineyards (2016-2018) and on Lake Balaton (2018): instrumentations, data-sets, and modelling work. 5th PannEx Workshop: Building PannEx Task Teams to address environmental needs in the Pannonian basin. 3 - 5 June 2019, Novi Sad, Serbia. http://www.fazos.unios.hr/upload/documents/5th%20PannEx%20workshop_Book%20of%20Abstracts_2019.pdf (utoljára megnyitva: 2022. 05. 13.)

Weidinger T., Gyöngyösi A.Z., Gandhi A., Tordai Á., Krámer T., Torma P., Rehák A., Kardos P., Horváth Á., Pappné Ferenczi Z., Horváth Gy., Balogh T., Geresdi I., Imre K., 2019c: Mikrometeorológiai mérések ködhelyzetek elemzésére. XIV. Magyar Aeroszol Konferencia. 2019. október 2-4. Visegrád. Előadás összefoglalók. <https://oszkdk.oszk.hu/DRJ/27500> (utoljára megnyitva: 2022. 05. 13.)

Weidinger, T., Gyöngyösi, A. Z., Arun, G., Tordai, Á., Krámer, T., Torma, P., Rehák, A., Szilágyi, M., Horváth, Á., Horváth, G., Bottyán, Z., Cséplő, A., Lázár, I., Imre, K., Kardos, P., Geresdi, I., 2021: Micrometeorological fog experiments in Budapest and in Sió Valley near Lake Balaton (2018-2021), EMS Annual Meeting 2021, online, 6–10 Sep 2021, EMS2021-304

World Meteorological Organization (WMO), 2012: Guide to Agricultural Meteorological Practices (GAMP) (WMO-No. 134) Geneva. 799p. ISBN 978-92-63-10134-1 https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=3996 (utoljára megnyitva: 2022. 05. 13.)

World Meteorological Organization (WMO), 2017: Guide to the Implementation of Quality Management Systems for National Meteorological and Hydrological Services and Other Relevant Service Providers (WMO-

No. 1100). Geneva. 107 p. ISBN 978-92-63-11100-8 https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4141 (utoljára megnyitva: 2022. 05. 13.)

World Meteorological Organization (WMO), 2018: Guide to Instruments and Methods of Observation (WMO-No. 8). Geneva, Switzerland. 681p. ISBN 978-92-63-10008-5 https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10616 (utoljára megnyitva: 2022. 05. 13.)

World Meteorological Organization (WMO), 2019: WIGOS Metadata Standard (WMO-No. 1192). Geneva. 51 p. ISBN 978-92-63-11192-0 https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10109 (utoljára megnyitva: 2022. 05. 13.)

World Meteorological Organization (WMO), 2021: Guidelines on Surface Station Data Quality Control and Quality Assurance for Climate Applications (WMO-No. 1269). Geneva. 54 p. ISBN 978-92-63-11269-9 https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=11019 (utoljára megnyitva: 2022. 05. 13.)

Wrenger, B., Bordás, Á., Cuxart, J., Simó, G., Weidinger, T., 2015: Multicopter measurements in the PABLS15 campaign. Pannonian Atmospheric Boundary Layer Studies (PABLS): some findings of the 2013 and 2015 campaigns. GEWEX workshop on the climate system of the Pannonian Basin 9-11. november 2015 Faculty of Agriculture, University of Osijek.

Zahn, E., Chor, T.L., Dias, N. L., 2016: A simple methodology for quality control of micrometeorological datasets. American Journal of Environmental Engineering, 6.4A, 135-142.

Zahumenský, I., 2004: Guidelines on quality control procedures for data from automatic weather stations. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland 10 p.

Internet-es hivatkozások

[1 – public.wmo.int] <https://public.wmo.int/en/our-mandate/how-we-do-it/quality-management-framework> – A WMO Minőségügyi Keretrendszerének weboldala

[2 – csl.noaa.gov] - <https://csl.noaa.gov/research/> – A NOAA Chemical Sciences Laboratory weboldala

[3 – madis.ncep.noaa.gov] – https://madis.ncep.noaa.gov/madis_datasets.shtml – Az operatív NOAA MADIS (Meteorological Assimilation Data Ingest Sistem) rendszer weboldala

[4 – [met.hu](https://www.met.hu)] <https://www.met.hu/omsz/minosegiranyitas/> - Az Országos Meteorológiai Szolgálat Minőségirányítási rendszerének weboldala

[5 – [met.hu](https://www.met.hu)/eghajlat] – https://www.met.hu/eghajlat/magyarorszag_eghajlata/eghajlati_adatsorok/ – Az éghajlati adatsorok (1901-2020) elérhetősége az OMSZ weboldalán

[6 – odp.met.hu] – <https://odp.met.hu> – Az Országos Meteorológiai Szolgálat Meteorológiai Adattára

[7 – agromo.atk.hu] – <http://agromo.atk.hu> – Az AgroMo projekt weboldala

[8 – [graw.de](https://www.graw.de)] – <https://www.graw.de/products/radiosondes/dfm-09/> – a GRAW DFM-09 rádiószonda adatais

[9 – teltonika-networks.com] <https://teltonika-networks.com/product/rut955/> – A Teltonika RUT955 router weboldala

[10 – [cost.eu](https://www.cost.eu)] – <https://www.cost.eu/actions/CA20108/> – A CA20108 FAIRNESS program weboldala

[11 – eltehu.sharepoint.com] – <https://eltehu.sharepoint.com/sites/micromet> – A mikrometeorológiai expedíciók adatainak csoportwebhelye

7. Függelék

5. táblázat – A PABLS'15 mérési expedíció műszerezettsége

Műszer / eszköz neve	Állapothatározó	Elhelyezés	Mintavételi gyakoriság	Rögzítés frekvenciája
METEK USA-1	u, v, w , szónikus hőmérséklet, (T_s)	2,6 m magasságban	10 Hz	10 Hz
Campbell Windsonic 4-L (2 db)	u, v , szónikus hőmérséklet (T_s)	20 cm és 2 m magasságban	1 Hz	1 perc
Vaisala HMP- 45C (2 db)	hőmérséklet, relatív nedvesség (T, RH)	0,5 m és 2 m magasságban	1 Hz	1 perc
Schenk Star- pyranometer (2 db)	rövidhullámú sugárzás ($G\uparrow, G\downarrow$)	1 m magasságban	1 Hz	1 perc
Q 7.1-L REBS	sugárzásegyenleg (Q_n)	1 m magasságban	1 Hz	1 perc
Kipp & Zonen PQS1 PAR szenzor (2 db)	fotoszintetikusan aktív sugárzás (PAR)	1 m magasságban	1 Hz	1 perc
Campbell CSAT-3 + LiCor EC150	u, v, w , τ, H, LE, CO_2 , + p (légnymás)	2 m magasságban	10 Hz	10 Hz, számított fluxusok 1 percenként
Campbell CS616 (3 db)	térfogati talaj- nedvesség (VWC)	–5 cm, –10 cm és –20 cm	1 Hz	1 perc
Campbell 107 (4 db)	talajhőmérséklet (T_{soil})	–2 cm, –5 cm, –10 cm és –20 cm	1 Hz	1 perc
Hukseflux HFP01SC-L (2 db) (self- calibrating)	talajhőáram (G_s)	–8 cm, egymástól 10 cm távol	1 Hz	1 perc
Campbell 237-L	levélnedvesség	10 cm magasságban	1 Hz	1 perc
Young 52202	csapadékmennyiség	1 m magasságban	1 Hz	1 perc
Campbell 107 (9 db) + Young 43502 aspirált árnyékoló (6 db)	hőmérséklet (T) (profilmérés)	talaj felett 5, 10, 30, 50, 100 és 200 cm + 3 különböző felszínborítás alatt 1 cm-rel	1 Hz	1 perc
Campbell CR23X, CR 1000 és CR 3000	mérésadatgyűjtők	vízálló, szigetelt műszerdobozo kban		

6. táblázat – A 2016-os ATACAMA expedíció műszerezettség

Műszer / eszköz neve	Állapothatározó	Elhelyezés
Campbell CR 23X adatgyűjtő (1 db)		vízálló műszerdobozban
E-típusú termoelem (1 db)	Referencia hőmérséklet (T_{ref})	Vízálló műszerdobozban
Campbell Q7.1-L REBS sugárzásegyenlegmérő (1 db)	Sugárzásegyenleg (R_n)	0,6 m magasságban
Schenk Star piranométer (1 db)	Globálsugárzás (G)	1 m magasságban
Campbell PQS1 PAR szenzor (2 db)	Fotoszintetikusan aktív sugárzás (PAR)	mindkettő 1 m magasságban, bejövő és visszavert
Campbell IRTS-P termoelemes infrahőmérő (1 db)	Felszínhőmérséklet (T_{sf})	1 m magasságban
Campbell 107 termisztor (4 db)	Talajhőmérséklet (T_s)	–5, –10, –20 és –35 cm
Campbell CS616 Talajnedvesség szenzor (2 db)	Talajnedvesség (Sw)	–1 és –35 cm
Campbell 237-L Levélnedvesség Szenzor (1 db)	Levélnedvesség (páralecsapódás)	Talajfelszínen
Young Wind monitor 05103 propelleres szélesebesség és szélirány mérő (1 db)	Szélesebesség, szélirány (U, DIR)	1,8 m magasságban
Vaisala WA15 forgókanalas szélesebesség mérő (1 db)	Szélesebesség (U)	0,6 m magasságban
Vaisala HMP-45 (2 db)	Hőmérséklet, relatív nedvesség (T, Rh)	0,6 illetve 1,2 m magasságokban, árnyékolva
Campbell HFP01SC-L önkalibráló talajhőáram-mérő lapka (2 db)	Talajhőáram (G_s)	Mindkettő a felszín alatt 15 cm mélységben

7. táblázat – A 2016-os szegedi határréteg-mérési expedíció műszerezettség

Műszer / eszköz neve	Állapothatározó	Elhelyezés
Campbell CR 23X adatgyűjtő (1 db)		vízálló műszerdobozban
Campbell AM 416 relés multiplexer (1 db)		vízálló műszerdobozban
E-típusú termoelem (1 db)	Referencia hőmérséklet	vízálló műszerdobozban
Kipp & Zonen CNR-1 (1 db)	Sugárzásegyenleg komponensei (4)	120 cm magasságban
Campbell Q7.1-L REBS sugárzásegyenlegmérő (2 db)	Sugárzásegyenleg (R_n)	120 cm magasságban
Schenk Star piranométer (2 db)	Direkt és diffúz globálsugárzás (G)	120 cm magasságban
Campbell PQS1 PAR szenzor (2 db)	PAR – direkt és diffúz	120 cm magasságban
Campbell 107 termisztor (1 db)	Talajhőmérséklet (T_s)	felszín alatt 2 cm mélyen
Vaisala HMP-45 (1 db)	Lég hőmérséklet, relatív légnedvesség (T , RH)	árnyékolóban, 180 cm magasságban

8. táblázat – A Gellért-tározó kísérlet műszerezettségé

Műszer / eszköz neve	Állapothatározó	Elhelyezés
Campbell CR 23X adatgyűjtő (1 db)		Vízálló műszerdobozban
E-típusú termoelem (1 db)	Referencia hőmérséklet	Vízálló műszerdobozban
Campbell Q7.1-L REBS sugárzásegyenlegmérő (1 db)	Sugárzásegyenleg (R_n)	Állványon, 1 m
Campbell IRTS-P termoelemes infrahőmérő (1 db)	Alagút falának hőmérséklete (T_{wall})	Állványon, 0,6 m
Campbell 107 termisztor (3 db)	Vízhőmérséklet, csatorna hőmérséklete, törmelék hőmérséklete (T_{s1} , T_{s2} , T_{s3})	- A zsomp alján (~ 30 cm) - A csatornában, rögzítve (felszínen) - A törmelék alatt ~2 cm mélyen
Vaisala HMP-45C (1 db)	Hőmérséklet, relatív nedvesség (T , RH)	Oszlopon, árnyékolva 0,5 és 2 m
Campbell HFP01SC-L önkalibráló talajhőáram-mérő lapka (2 db)	Hőáram a zsomp alján, hőáram a törmelék alatt	A zsomp alján (30 cm mélyen) és a törmelék alatt 2 cm mélységben
Li-Cor LI 840A (1 db)	H ₂ O és CO ₂ koncentráció	Műszerdobozban, mintavételezés 0,5 és 2 m szinteken
Voltcraft DL-120TH (Sensirion SHT11 szenzorral) (2 db)	Hőmérséklet, relatív páratartalom (T , RH)	60 cm magasan, a mérőoszloptól 2 és 100 m távolságban. Mozgómérések esetén a felszínen.

9. táblázat – A Jakabszállási kísérleti állomás műszerezettsége

Műszer gyártója	Típusa (sorozatszám)	Műszer elhelyezése	Mért állapothatározó(k)
Schenk	Star Pyranometer (912)	60 cm, állvány	$G \downarrow$ (globálsugárzás) (min, max, std) (Wm^{-2})
Vaisala	HMP-45C	1 m, árnyékoló	T , ($^{\circ}\text{C}$), RH (%)
Young	Wind Monitor Model 05103	2 m	Szélesség (m/s), szélirány (fok) (S , U , DU , SDU)
Kipp & Zonen	Q7.1-L: REBS Sugárzásegyenleg-mérő	60 cm, állvány	R_n (sugárzásegyenleg) (Wm^{-2})
Campbell Scientific	107	5 cm mélyen	T_{soil} ($^{\circ}\text{C}$)
Campbell Scientific	107	10 cm mélyen	T_{soil} ($^{\circ}\text{C}$)
Campbell Scientific	CS616 Water Content Reflectometer	10 cm mélyen	VWC (m^3/m^3) Volumetric Water Content = térfogati víztartalom
Campbell Scientific	237L Levélnedvesség szenzor	Talajfelszín felett 5 cm-re	Levélnedvesség (ellenállás, $\text{k}\Omega$)

10. táblázat: A Villányi kísérleti állomás műszerezettsége

Műszer gyártója	Típusa (sorozatszám)	Műszer elhelyezése	Mért állapothatározó(k)
	Thermocouple Type-E	műszerdobozban	T_{ref} ($^{\circ}\text{C}$)
Schenk	Star Pyranometer (1040)	1 m (D-i oldal)	$G \downarrow$ (globálsugárzás) (min, max, std) (Wm^{-2})
Campbell Scientific	ASPTC-L Aspirált Hőelem	1 m (É-i oldal)	T ($^{\circ}\text{C}$),
Young	Wind Monitor Model 05103	2,5 m	Szélesség (m/s), szélirány (fok) (S , U , DU , SDU)

2018 eleje

11. táblázat – A 2018 eleji köd-mikrofizikai mérés műszerezettsége (Pestszentlőrinc)

Műszer	Magasság	Mért paraméterek	Felbontás
Campbell Scientific CSAT 3 + EC150	2,5 m	$u, v, w, T_s, \tau, H, LE, u^*,$ CO ₂ és H ₂ O fluxusok	10 Hz
Vaisala HMP-45C	2 m	T, RH	1 min
Vaisala HMP-45C	1 m	T, RH	1 min
Gill Windsonic	1 m	szélsebesség, szélirány	1 min
Campbell Scientific T107	–10 cm	T_{soil} (talajhőmérséklet)	1 min
Campbell Scientific T107	–5 cm	T_{soil} (talajhőmérséklet)	1 min
Campbell Scientific T107	–2 cm	T_{soil} (talajhőmérséklet)	1 min
Campbell Scientific CS616	–5 cm	VWC (Térfogati talajnedvesség-koncentráció)	1 min
Hukseflux HFP01	–8 cm	talajhőáram	1 min
Campbell Scientific 237 Leaf-Wetness Sensor	5 cm	levélnedvesség ($k\Omega$)	1 min

12. táblázat – A 2018-2019-es köd-mikrofizikai mérés műszerezettsége (Pestszentlőrinc, BGME oszlop)

Műszer	Magasság	Mért paraméterek	Felbontás
Campbell Scientific CSAT 3 + EC150	2 m	$u, v, w, T_s, \tau, H, LE, u^*$, CO ₂ és H ₂ O fluxusok	10 Hz
Vaisala HMP-45C	4 m	T, RH	1 min
Gill Windsonic	4 m	szélsebesség, szélirány	1 min
Vaisala HMP-45C	0,7 m	T, RH	1 min
Gill Windsonic	0,7 m	szélsebesség, szélirány	1 min
Campbell Scientific T107	–10 cm	T_{soil} (talajhőmérséklet)	1 min
Campbell Scientific T107	–5 cm	T_{soil} (talajhőmérséklet)	1 min
Campbell Scientific T107	–2 cm	T_{soil} (talajhőmérséklet)	1 min
Campbell Scientific CS616	–5 cm	VWC (Térfogati talajnedvesség-koncentráció)	1 min
Campbell Scientific CS616	–10 cm	VWC (Térfogati talajnedvesség-koncentráció)	1 min
Hukseflux HFP01	–8 cm	talajhőáram	1 min
Hukseflux HFP01	–8 cm	talajhőáram	1 min
Kipp & Zonen CNR4	1 m	rövid-és hosszúhullámú sug. komponensek	1 min

13. táblázat – A 2018-2019-es köd-mikrofizikai mérés műszerezettsége (Siójut, ELTE oszlop)

Műszer	Magasság	Mért paraméterek	Felbontás
Vaisala WA15 anemométer	3 m	szélsebesség	1 min
Vaisala WA15 anemométer	1,25 m	szélsebesség	1 min
Vaisala HMP-45C	2,7 m	T, RH	1 min
Vaisala HMP-45C	1 m	T, RH	1 min
Campbell Scientific T107	–10 cm	T_{soil} (talajhőmérséklet)	1 min
Campbell Scientific T107	–5 cm	T_{soil} (talajhőmérséklet)	1 min
Campbell Scientific T107	–2 cm	T_{soil} (talajhőmérséklet)	1 min
Campbell Scientific CS616	–10 cm	VWC (Térfogati talajnedvesség-koncentráció)	1 min
Campbell Scientific 237 Leaf-Wetness Sensor	5 cm	levélnedvesség ($k\Omega$)	1 min
Hukseflux HFP01SC	–8 cm	talajhőáram	1 min
Hukseflux HFP01SC	–8 cm	talajhőáram	1 min
Kipp & Zonen CNR4	1 m	rövid-és hosszúhullámú sug. komponensek	1 min
Gill Windmaster 3D	3,5 m	u, v, w, Ts	10 Hz

14. táblázat – A 2018-2019-es köd-mikrofizikai mérés műszerezettsége (Pestszentlőrinc, toronymérések)

Műszer	Magasság	Mért paraméterek	Felbontás
Vaisala WA15 anemométer	30 m	szélsebesség	1 min
Vaisala WA15 anemométer	10 m	szélsebesség	1 min
Vaisala HMP-45C	30 m	T, RH	1 min
Vaisala HMP-45C	10 m	T, RH	1 min
Gill Windmaster 3D	30 m	u, v, w, Ts	10 Hz

15. táblázat – A 2020-2021-es köd-mikrofizikai mérés műszerezettsége (Pestszentlőrinc, BGME oszlop – „KERT”)

Műszer	Magasság	Mért paraméterek	Felbontás
Campbell Scientific CSAT 3 + EC150	2,5 m	$u, v, w, T_s, \tau, H, LE, u^*$, CO ₂ és H ₂ O fluxusok	10 Hz
Gill Windsonic	5 m	szélsebesség, szélirány	1 min
Gill Windsonic	1 m	szélsebesség, szélirány	1 min
Campbell Scientific HigoVUE5	5 m	T, RH	1 min
Campbell Scientific HigoVUE5	1 m	T, RH	1 min
Kipp & Zonen CNR1	2 m	rövid-és hosszúhullámú sug. Komponensek	1 min
Campbell Scientific 237 Leaf-Wetness Sensor	0 m	levélnedvesség (kΩ)	1 min
Campbell Scientific T107	–10 cm	T_{soil} (talajhőmérséklet)	1 min
Campbell Scientific T107	–5cm	T_{soil} (talajhőmérséklet)	1 min
Campbell Scientific T107	–2 cm	T_{soil} (talajhőmérséklet)	1 min
Campbell Scientific CS616	–10 cm	VWC (Térfogati talajnedvesség- koncentráció)	1 min
Campbell Scientific CS616	–5 cm	VWC (Térfogati talajnedvesség- koncentráció)	1 min
Hukseflux HFP01	–8 cm	talajhőáram	1 min
Hukseflux HFP01	–8 cm	talajhőáram	1 min

16. táblázat – A 2020-2021-es köd-mikrofizikai mérés műszerezettség (Pestszentlőrinc, toronymérések)

Műszer	Magasság	Mért paraméterek	Felbontás
Vaisala HMP-45C	30 m	T, RH	10 sec, 1 min, 10 min
Vaisala HMP-45C	22 m	T, RH	10 sec, 1 min, 10 min
Vaisala WA15 anemométer	22 m	szélsebesség	10 sec, 1 min, 10 min
Vaisala WA15 anemométer	9,2 m	szélsebesség	10 sec, 1 min, 10 min
Gill Windmaster 3D	9,2 m	u, v, w, Ts	10 Hz

17. táblázat – A 2020-2021-es köd-mikrofizikai mérés műszerezettség (Pestszentlőrinc, „TETŐ”)

Műszer	Magasság	Mért paraméterek	Felbontás
	g		s
Gill Windsonic	6 m	szélsebesség, szélirány	1 min
Vaisala HMP-45C	6 m	T, RH	1 min
METEK USA-1 szónikus anemométer	6 m	u, v, w, Ts	10 Hz
Vaisala HMP-45D	6 m	T, RH	1 min