

Légköri események hatása az inverziós légrétegződésre a Bükk-fennsíki Mohos-töbör eseti példáin keresztül

The impact of meteorological events on the development of temporal inversion in the Mohos sinkhole, Bükk Plateau

DOBOS András, DOBOS Endre

Miskolci Egyetem, Földrajz-Geoinformatika Intézet, H-3515 Miskolc-Egyetemváros, HU,
tel: +36-305285901, dobosbandi@hotmail.com

Abstract

The microclimate of the sinkholes still holds many unanswered questions due to the complex behavior of the emerging cold air pools. Furthermore, weather events also have a great impact on the periodic evolution of the temperature inversion in the sinkholes. The different weather effects on the cold air pool development and collapse are presented using as an example the Mohos sinkhole located on the Bükk Plateau.

Keywords: sinkhole, microclimate, weather, cold air pool, temperature inversion

Kulcsszavak: töbör, mikroklima, időjárás, hideg légmedence, fordított légrétegződés

1. BEVEZETŐ

A töbrökben létrejövő felszínközeli inverzió kialakulásában, fejlődésében és összeomlásában meghatározó szerepe van a különböző időjárási eseményeknek. Az inverziós légrétegre ható, a töbrök által generált mikroklimát befolyásoló, mikroklimatikus és általános légköri folyamatok alakítják az inverzió tér és időbeli fejlődését, befolyásolják annak minőségét [1].

Jelen tanulmányban a Mohos-töbör esetfejlődési leírásait korreláljuk az irodalmi típusesetekkel, így a Bécsi Egyetem és a Utahi Egyetem közös kutatásának következtetéseire és a Miskolci Egyetem Földrajz-Geoinformatika Intézetének saját méréseire alapozva mutatjuk be a meteorológiai események fordított légrétegződésre tett hatásait, mindezt eseti példákon keresztül, a Bükk-fennsíki Mohos-töbörben rögzített hőmérsékleti inverziók fejlődési típusaiból válogatva.

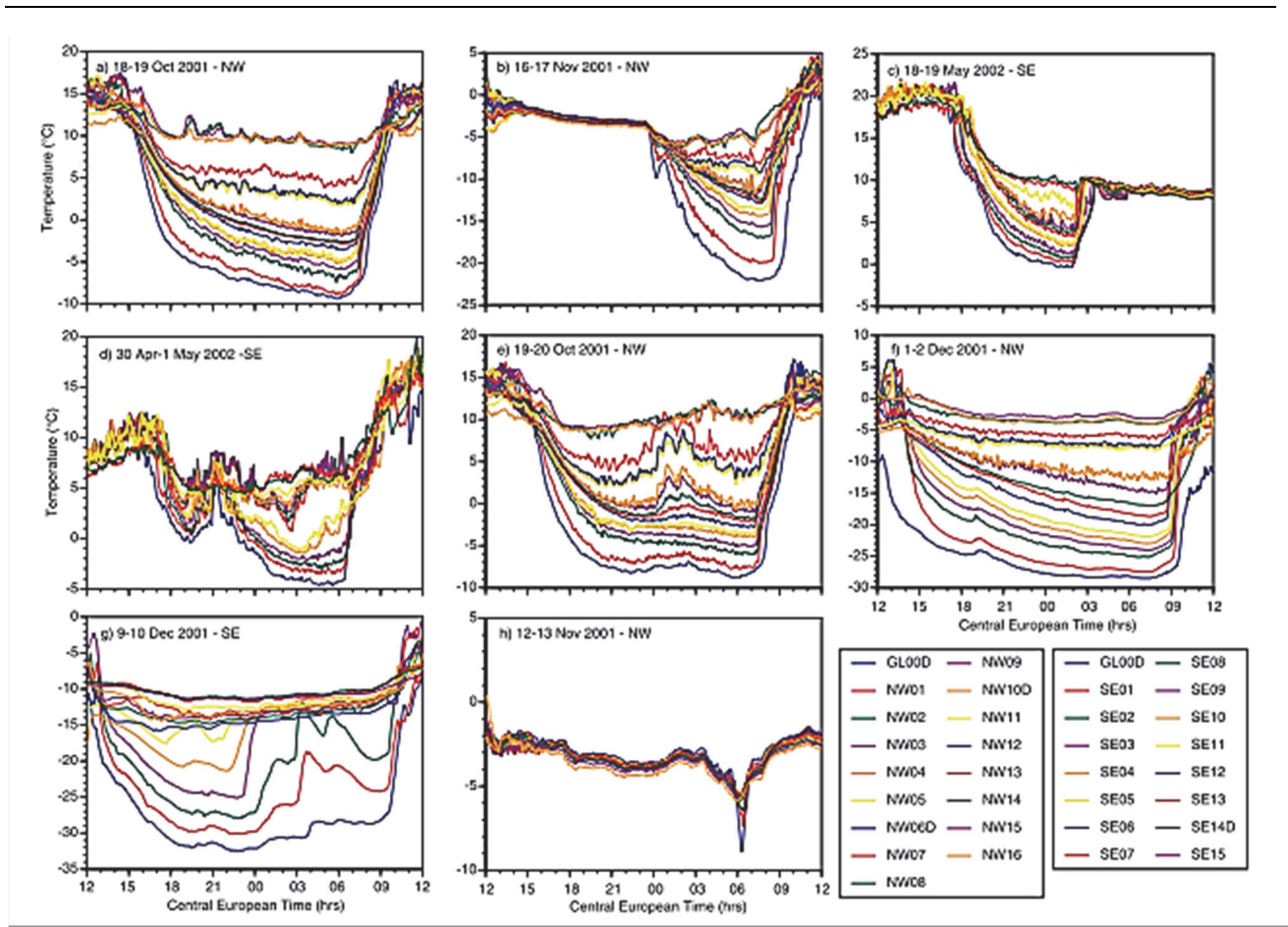
2. AZ INVERZIÓS LÉGRÉTEGZÖDÉS ERÓZIÓJÁNAK JELLEMZÉSE

A különböző turbulens légáramlatok jelenléte jelentős hatótényező az inverziós légréteg felszámolásában. Ennek esetleges végbemenetele a hideg légmedence stabilitásával és a turbulens légáramlatok, a függőleges szélnyírás felhajtó erejével arányos. A hőmérsékleti inverzióra hatni képes légáramlatok lehetséges behatása a Richardson (R_B) számmal írható le [2].

$$R_B = \frac{\frac{g}{T_V} \frac{\Delta\Theta_V}{\Delta z}}{\left(\frac{\Delta u}{\Delta z}\right)^2 + \left(\frac{\Delta v}{\Delta z}\right)^2} = \frac{\frac{g}{T_V} \Delta\Theta_V \Delta z}{(\Delta u)^2 + (\Delta v)^2}$$

1. ábra. A Richardson szám egyenlete [2]

A Richardson érték kiszámítása (lásd 1. ábra), ahol a g a gravitációs gyorsulás, T_V a virtuális abszolút hőmérséklet, Δz a turbulens eróziós zóna vastagsága, Δu és Δv a vertikális szélnyírás komponensek és a $\Delta\Theta_V$ az adott légréteg vertikális virtuális potenciális hőmérsékleti gradiense. Az egyensúlyi hatás felborításának küszöbe a Richardson féle kritikus érték ($R_C = 0.25$), amely már képes erodálni a fordított légrétegződést [1] [2] [4]. Az inverziós légrétegződés fejlődésének típuseseteit az 2. ábra mutatja be.



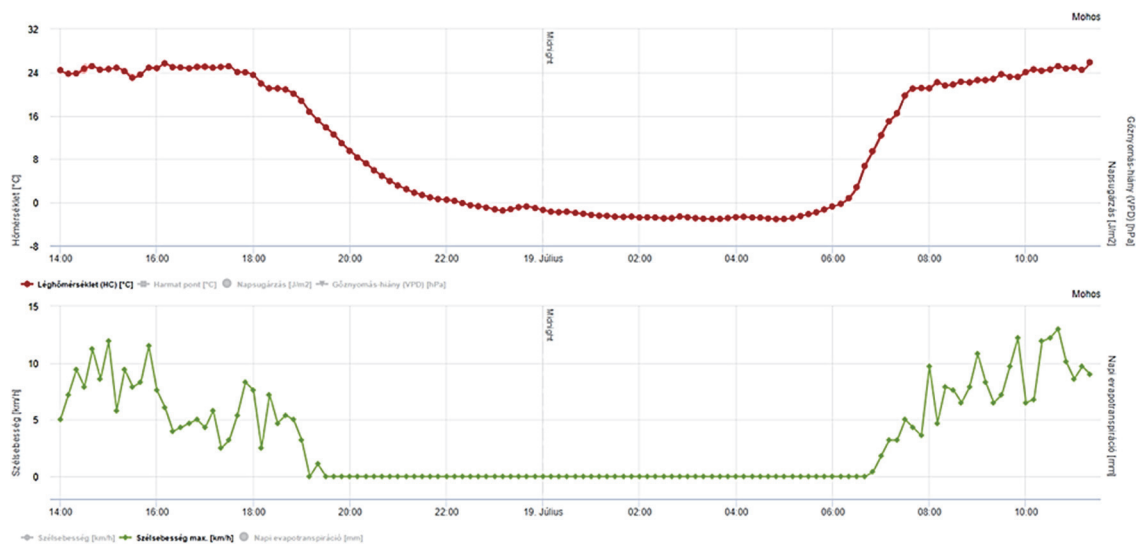
2. ábra. Példák az inverziós légréteg fejlődési kategóriáira, különböző magasságokban lévő hőmérsékleti adatgyűjtők hőmérsékleti idősorait használva a Grünloch-töbör északnyugati és délkeleti lejtőoldalain (a) zavartalan fejlődés, (b) késői felépülés, (c) korai felbomlás, (d) keverő esemény, (e) felső zavarás, (f) alsó zavarás, (g) réteges erózió és (h) inverziós medence ablak [1].

3. A HŐMÉRSÉKLETI INVERZIÓ FEJLŐDÉSÉNEK ÉS ÖSSZEOMLÁSÁNAK TÍPUSAI A TÖBRÖK VISZONYLATÁBAN

3.1. Hideg légmedence (inverziós légrétegződés) zavartalan fejlődés

A zavartalan fejlődés (ang. *undisturbed evolution*) előfordulásának feltétele a derült, szélcsendes időjárás (például anticiklonok esetén), mely a teljes potenciális kisugárzási periódus alatt zavartalanul fennáll. Azaz az önárnyékba kerülés, vagy napnyugta időpontjától napkeltéig, vagy az önárnyék megszűnéséig kell tartania. Ebből kifolyólag a besugárzás csökkenése, majd megszűnése (naplemente, önárnyékolás) után gyors hőmérsékletcsökkenés kezdődik, melynek mértéke és rátája, a felszíntől távolodva csökken. A hőmérsékletcsökkenés az éjszaka előrehaladtával tendenciálisan lassul, de folyamatos marad. A zavartalan hőmérsékleti görbe esetében is, időszakosan minimális oszcilláció figyelhető meg, ami a töböroldalbeli áramlások hatásával magyarázható. Az ingadozás azonban nem töri meg az átlaghőmérséklet csökkenését [1].

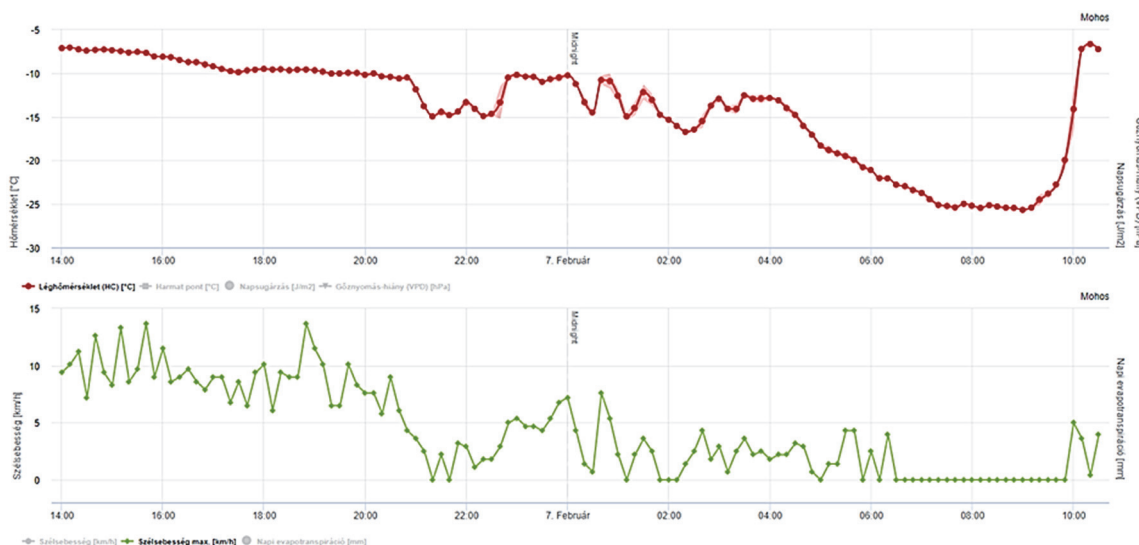
A páratartalom hatása a hőmérsékleti görbére a kondenzációs küszöb eléréséig nem számottevő, zavartalan esetben ködképződés nem áll fenn, ugyanis anticiklonális körülmények között a levegő páratartalma potenciálisan alacsony, a napi legalacsonyabb léghőmérséklet beálltakor sem feltétlenül éri el a kicsapódási határt. Tapasztalataink szerint az előrehaladott fejlődési fázis esetén még a 3–5 ms⁻¹-os fuvallatok sem bontják meg az inverziót. Amikor a töbörálj újra nap sugárzás hatása alá kerül, a fordított légrétegződés felborul és normál légrétegződés mellett újra növekedni kezd a hőmérséklet [1]. Egyéb esetben az inverzió a töböráljban megmarad és a konvekció a sűrűbb légréteg felszínén kezdődik meg, mint egyfajta másodlagos felszínen [7]. Ezt az esetfejlődési folyamatot a Mohos-töbörben 2022.07.18.-ról 19.-re virradó éjszakán, 2 méteresen mért adatok jól jellemzik (3. ábra).



3. ábra. Inverziós légrétegződés zavartalan fejlődése a Mohos-töbörben 2 méteren

3.2. Hideg légmedence (inverziós légrétegződés) késői fejlődése

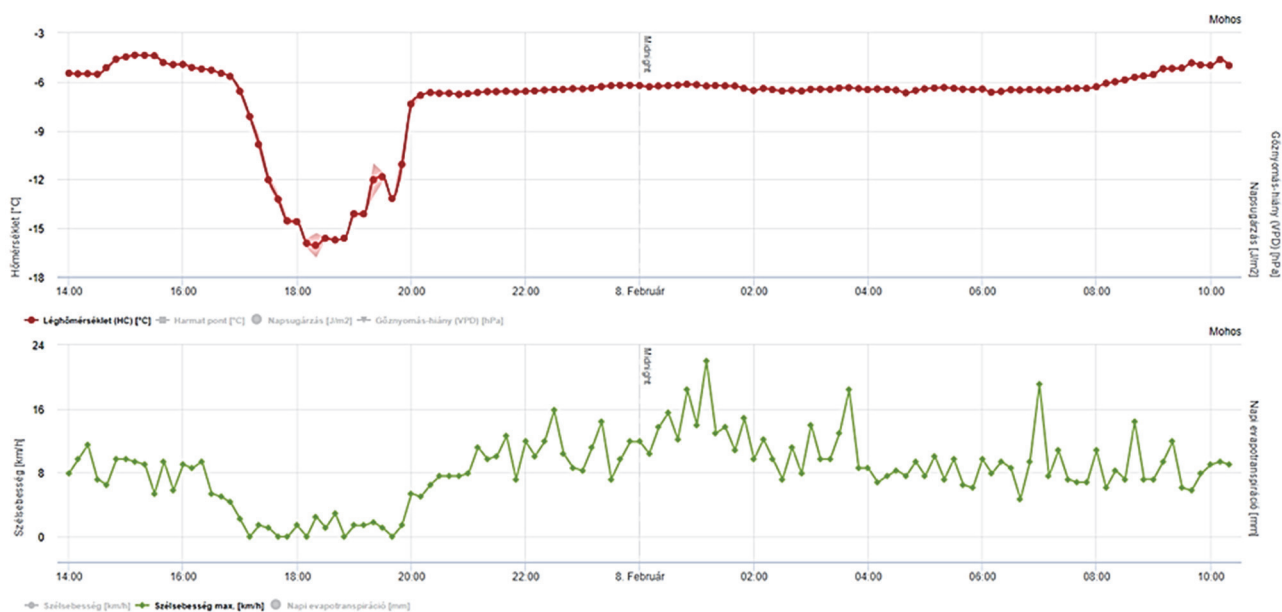
A késői hőmérsékleti inverzió (ang. *late buildup*) főbb okai általában az éjszaka második felében feloszló felhőzet vagy elálló szél, amelyek addig akadályozták a fordított légrétegződés kialakulását. A felhőzet gátolja az éjszakai kisugárzást, a szél pedig homogenizálja a légrétegeket a felszín közelében is. Ezen gátló tényezők megszűnését követően az inverzió kiépülése a zavartalan fejlődési dinamikához hasonlóan zajlik, azzal a különbséggel, hogy a gyors hőmérséklet csökkenés a későbbi órákban kezdődik meg, mint azt a nap-járás potenciálisan lehetővé tenné [1]. Ezt az esetfejlődési folyamatot a Mohos-töbörben 2023.02.06.-ról 07.-re virradó éjszakán, 2 méteren mért adatok jellemzik (4. ábra).



4. ábra. Inverziós légrétegződés kései fejlődése a Mohos-töbörben (felszín felett 2 m)

3.3. Hideg légmedence (inverziós légrétegződés) korai összeomlása

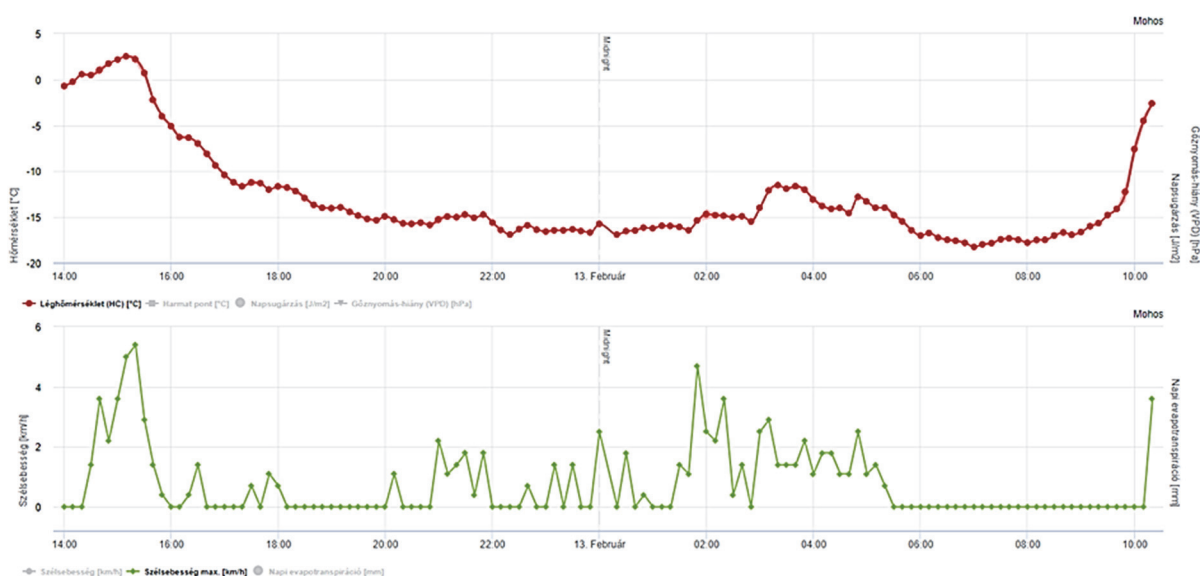
A hőmérsékleti inverzió korai felbomlásához (ang. *early breakup*) valamilyen külső behatásnak erős zavart kell okoznia a töbörben már nyugalomba jutott fordított légrétegződésben. Ennek okai gyakran a kisugárzási folyamatokat megtörő időjárási frontok, mely esetben a felhősödés és a releváns erejű állandó jellegű légmozgás egyszerre lehet jelen. A derült és szélcsendes időjárásnak köszönhetően a kisugárzás zavartalanul megkezdődik és inverziós légréteg jön létre. A légköri viszonyok azonban az időjárási front érkezésével megváltoznak és a turbulens légáramlatok kihajtják a zavartalan fejlődési periódusban létrejött izoterm légrétegeket [1]. Ezt az esetfejlődési folyamatot a Mohos-töbörben 2023.02.07.-ről 08.-ra virradó éjszakán, 2 méteren mért adatok jellemzik (5. ábra).



5. ábra. Inverziós légrétegződés korai összeomlása a Mohos-töbörben (felszín felett 2 m)

3.4. Hideg légmedence (inverziós légrétegződés) fejlődésére ható keverő események

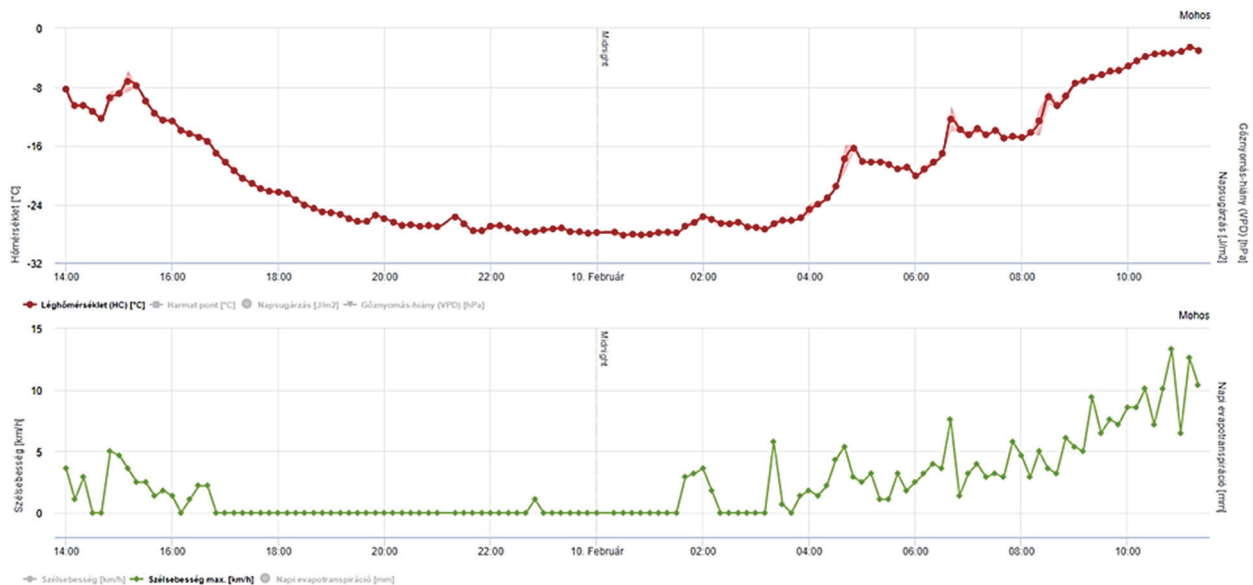
Abban az esetben, amikor olyan típusú időszakos behatások érik a töbörben kialakult inverziós légréteget, melyek nem járnak az inverzió teljes abrogációjával, keverő események (ang. *mixing event*) jönnek létre. Erős szél esetében a magasabban elhelyezkedő légrétegek lekeverődése figyelhető meg: a töbör aljában korábban kialakult inverziós légréteg zavartalansága időszakosan megszűnik. A terepviszonyok felerősíthetik a rétegzett levegő függőleges keveredését, mivel turbulens légáramlatokat hoznak létre a turbulencia pedig hatásosan van a felszínközeli légrétegekre is a töbör aljában. Feltételezhetően a keveredés sebességét több paraméter határozza meg: a horizontális légáramlatok vertikális nyírása, a szélnyírás által generált légörvények energiája, a töbör közvetlen környezetének domborzati adottságai és a hideg légmedence stabilitása a töbörön belül. Amikor a szél újra mérséklődik, a fordított légrétegződés újraépül és stabilizálódik. A folyamat előrehaladtával a hideg légmedence egyre ellenállóbb lehet a légáramlatokkal szemben. Erős hatótényező még a felhősödés, mely gátolja az inverziót, ugyanis a felhőalap visszaveri a felszín által kisugárzott energiát, és visszasugározza azt a felszín irányába. Az említett két esetben tehát a hideg légmedence nem, vagy csak részlegesen erodálódik, és a körülmények újbóli adottságával visszarendeződik a felszínközeli inverzió. A hőmérsékleti görbe pedig az ismételt fennálló gyors hűlési periódust követve a zavartalan jellegű görbék viselkedését idézi. [1] Ezt az esetfejlődési folyamatot a Mohos-töbörben 2023.02.12.-ről 13.-ra virradó éjszakán, 2 méterrel mért adatok jellemzik (6. ábra).



6. ábra. Inverziós légrétegződés fejlődésére ható keverő esemény a Mohos-töbörben (felszín felett 2 m)

3.5. Hideg légmedencét (inverziós légrétegződést) érintő réteges, turbulens erózió

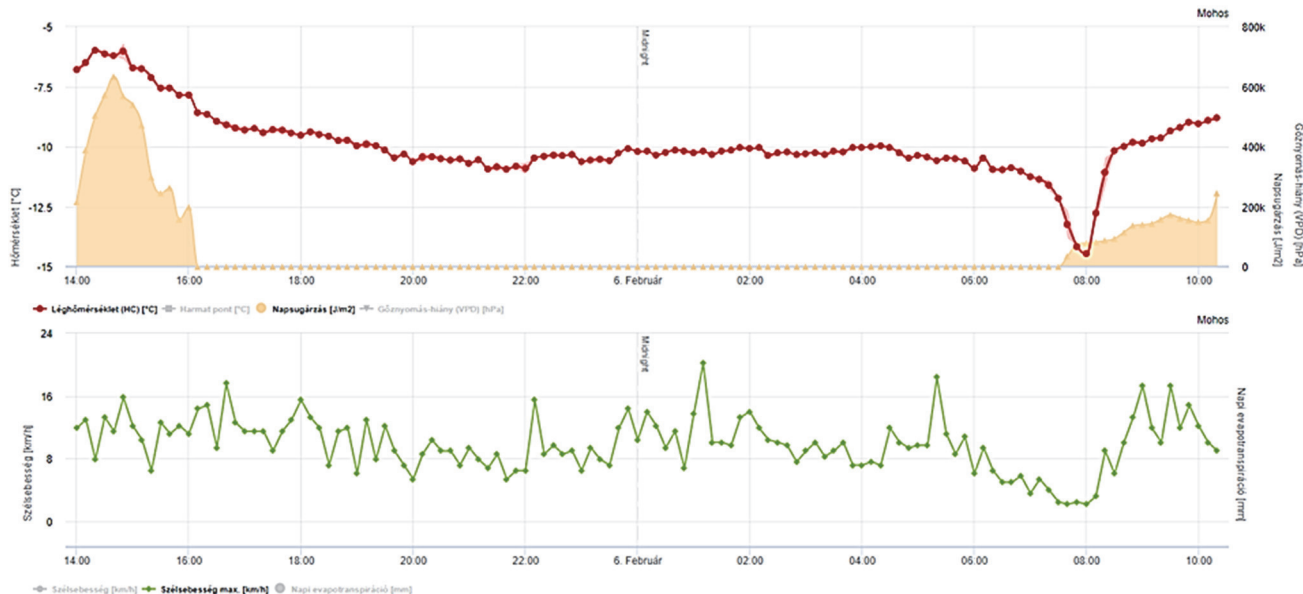
A hideg légmedencére turbulens eróziója a hideg légmedence lassú, rétegről rétegre történő teljes vagy részleges felszámolódását jelenti (ang. *layered erosion*). Okát a töbör felett, magasabban elhaladó légáramlatokban feltételezzük. Korábbi kutatások azt sugallják, hogy az inverziót érintő réteges erózió fennmaradásának feltétele a növekvő szélsébség [5], [6], [9]. Az, hogy a töbörben kialakuló fordított légrétegződésre hatással lehetnek a magasabb légrétegekben fújó szelek biztosnak tekinthető, azonban a folyamat lezajlását erősen befolyásolja a töbör kitettsége, annak környezetének domborzati paraméterei. A potenciálisan szélárnyéket nyújtó gerincek vagy a szelet lokálisan felgyorsító völgyek jelenléte, és az, hogy ezen terepadottságokhoz viszonyítva merről fúj a szél, mennyire és milyen módon tudja annak áramlását a domborzat befolyásolni [1]. Ezt az esetfejlődési folyamatot a Mohos-töbörben 2023.02.09.-ről 10.-re virradó éjszakán, 2 méteren mért adatok jellemzik (7 ábra).



7. Ábra. Réteges erózió a Mohos-töbörben (felszín felett 2 m)

3.6. Hideg légmedencét (inverziós légrétegződést) eredményező időjárási ablak

Erősen szeles és/vagy borult éjszakákon is létrejöhet rövid életű felszínközeli hőmérsékleti inverziós légrétegzetség a töbörájakban (ang. *cold-air pool window*). Ezeket erős időszakosság jellemzi. Kialakulásuk oka egy, a potenciális kisugárzási időszakon belül beálló rövid, nyugalmi fázis. A nyugalmi fázis oka egyrészt lehet a felhőréteg teljes vagy részleges periodikus felszakadozása, amikor a borult égbolt rövid időre kiderül, másrészt pedig a töbör mikroklímára hatni képes légáramlatok szintén időszakos csökkenése, elállása. A rövid ideig derült, szélcsendes idő a kisugárzási periódusban gyors hőmérsékletcsökkenéshez, hőmérsékleti inverzió kialakulásához vezet. Élettartalmuk rövid, pár (1-2) óra. Tapasztalataink szerint főleg derült, szeles éjszakákon markánsak ezeknek az időjárási ablakoknak a hatásai. A töbörökben megfigyelhető hőmérsékleti profil egyértelműen reagál a körülmények akár rövid ideig fennálló változására. [1] [8] Érdekeség, hogy a példaként hozott inverziós időjárási ablak kialakulásakor a Mohos-töbörben a felszín felett két méterrel már megkezdődött a besugárzás. Ezt az esetfejlődési folyamatot a Mohos-töbörben 2023.02.05.-ről 06.-ra virradó éjszakán, 2 méteren mért adatok jellemzik (8. ábra).



8. Ábra. Hideg légmedencét eredményező időjárási ablak a Mohos-töbörben (felszín felett 2 m)

4. ÖSSZEGZÉS

A Mohos-töbörben rögzített hőmérsékleti görbék alakulása megerősíti a szakirodalom által meghatározott hideg légmedence fejlődési folyamatokat. Az irodalom által hivatkozott típusesetek közül a felső és alsó zavarás eseteit nem tudtuk vizsgálni, mivel szenzorjaink csak két méter magasságig rögzítenek adatokat, így a hőmérsékleti inverzió magasabb légrétegeinek viselkedéséről nincsenek adataink. A Mohos-töbörben kialakult fordított légrétegződéses helyzetekre a legmarkánsabb hatással a szél és a felhőzet különböző minőségű jelenléte voltak. A korábbi kutatások szerint az inverziós légrétegződés előrehaladottsága nagyban befolyásolja a hideg légmedence ellenállóképességét a külső időjárási behatásokkal szemben. A töbörben mért adatok alapján a korábbi feltételezésekkel megegyező következtetésekre jut a cikk, melyeket a rendelkezésre álló szél és beakisugárzási adatok fényében megerősít: a töbörben kialakult inverziós légréteg ellenállóképessége a külső időjárási behatások vizsgált típusaival szemben annak kiépülési fázisának előrehaladtával növekszik.

5. IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] DORNINGER, M., WHITEMAN, C.D., BICA, B., EISENBACH, S., POSPICAL, B., STEINACKER, R., 2011: Meteorological Events Affecting Cold-Air Pools in a Small Basin. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50, 2223–2234.
- [2] GLICKMAN, T.S., (szerk.), 2000: Glossary of Meteorology. American Meteorological Society, 855 p., Boston.
- [3] KEVEINÉ-BÁRÁNY, I., 2011: Néhány adat a bükki töbrök mikroklímájához. *A Miskolci Egyetem Közleményei, A sorozat, Bányászat*, 82, 171–176.
- [4] KUNZE, E., WILLIAMS, A.J., BRISCOE, M.G., 1990: Observations of shear and vertical stability from a neutrally buoyant float. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 95, C10, 18127–18142.
- [5] PETKOVŠEK, Z., 1992: Turbulent dissipation of cold air lake in a basin. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 47, 237–245.
- [6] RAKOVEC, J., MERŠE, J., JERNEJ, S., PARADIŽ, B., 2002: Turbulent dissipation of the cold-air pool in a basin: Comparison of observed and simulated development. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 79, 195–213.
- [7] SALAVEC, P., 2012: Inverzió és légszennyezés, valamint az égetés hatása a levegő minőségére falusi környezetben. *Tolmácsi Kisbíró*, 2012. novemberi szám, 2–3.
- [8] DE WEKKER, S.F.J., WHITEMAN, C.D., 2006: On the time scale of nocturnal boundary layer cooling in valleys and basins and over plains. *Journal of Applied Meteorology*, 45, 813–820.
- [9] ZHONG, S., WHITEMAN, C.D., BIAN, X., SHAW, W.J., HUBBE, J.M., 2001: Meteorological Processes Affecting the Evolution of a Wintertime Cold Air Pool in the Columbia Basin. *Monthly Weather Review*, 129(10), 2600–2613.