

EÖTVÖS LORÁND TUDOMÁNYEGYETEM
TERMÉSZETTUDOMÁNYI KAR
FÖLDRAJZ- ÉS FÖLDTUDOMÁNYI INTÉZET
TERMÉSZETFÖLDRAJZI TANSZÉK

Az Aletsch-gleccser mozgásának vizsgálata távérzékeléses és térinformatikai módszerekkel

DIPLOMAMUNKA

Készítette:

SZABÓ PETRA KAMILLA
GEOGRÁFUS MESTERSZAK

Témavezetők:

DR. TELBISZ TAMÁS
EGYETEMI DOCENS

JÓ VIVIÁNA
PHD HALLGATÓ



Budapest, 2023

NYILATKOZAT

Név: Szabó Petra Kamilla

ELTE Természettudományi Kar, szak: Geográfus MSc

NEPTUN azonosító: US4DVF

Diplomamunka címe:

Az Aletsch-geleccser mozgásának vizsgálata távérzékeléses és térinformatikai módszerekkel

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, 2023.05.29

Szabó Petra Kamilla

a hallgató aláírása

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	5
2. Szakirodalmi áttekintés	7
2.1. A gleccserek tulajdonságai	7
2.2. A völgyi gleccserek	9
2.3. A gleccserek mozgása	11
2.3.1. <i>A gleccserek mozgásformái</i>	12
2.3.2. <i>A gleccserek mozgási sebessége</i>	14
2.3.3. <i>A szubglaciális vízhálózat</i>	16
3. Adatok és módszerek	18
3.1. A gleccserek sebességének meghatározása	18
3.1.1. <i>Feature és Speckle Tracking</i>	18
3.1.2. <i>ITS_LIVE adatbázis</i>	19
3.1.3. <i>Sebességadatok szűrése és feldolgozása</i>	22
3.2. Egyéb adatbázisok	22
3.2.1. <i>MeteoSwiss adatbázis</i>	22
3.2.2. <i>GLIMS adatbázis</i>	23
3.2.3. <i>Jégvastagságadatok és Tracking módszerekkel mért sebességadatok</i>	24
3.3. Adatok kiértékelése	25
3.4. Webtérkép készítése	28
4. Vizsgált terület	32
4.1. Az Alpok	32
4.2. Eljegesedés, utolsó glaciális maximum	34
4.3. Aletsch-gleccser területi adottságai	35

4.3.1. Az Aletsch-gleccser elhelyezkedése.....	35
4.3.2. Az Aletsch-gleccser és környezetének éghajlata	38
4.3.3. Az Aletsch-gleccser mozgása	39
5. Eredmények.....	43
5.1. Domborzatmodell alapú területi kiértékelés.....	43
5.2. Az Aletsch-gleccser sebességének vizsgálata	45
5.2.1. Vizsgálati időszak.....	45
5.2.2. Mért sebességek	46
5.3. Webtérkép	54
6. Diskusszió és következtetések	57
6.1. Az éghajlati tényezők és a sebesség összefüggései.....	57
6.2. Domborzati paraméterek hatása az Aletsch-gleccser sebességére	60
6.2.1. Az Aletsch-gleccser jégvastagsága és sebessége közötti összefüggés	60
6.2.2. Az Aletsch-gleccser lejtőszöge és sebessége közötti összefüggés	61
6.2.3. Az Aletsch-gleccser éves átlagsebessége	63
6.3. Korábbi kutatások összehasonlítása az ITS_LIVE adatbázis eredményeivel	64
7. Összefoglalás.....	67
8. Summary.....	69
9. Köszönetnyilvánítás	71
10. Irodalomjegyzék.....	72
11. Internetes források	79
12. Ábrajegyzék.....	81
13. Függelék.....	83

1. Bevezetés

A gleccserek Földünk egyik legérdekesebb képződményei, melyek számos információval szolgálnak. Mindamellett, hogy vizsgálhatjuk általuk a múlt klímáját és nyomon követhetjük egykori kiterjedésük változását - *mely lehetővé teszi az egykori környezet rekonstrukcióját* -, jövőbeli állapotuk felmérése éppoly jelentős az emberiség jövője szempontjából. Átalakulásuk nyomon követése és állapotuk felmérése rendkívül fontos feladat, hiszen a gleccserek Földünk édesvízkészletének lényeges részét raktározzák így elolvadásuk komoly problémákat okozhat az ivóvíz ellátásban vagy éppen a mezőgazdaságban. Az Alpok gleccserekkel kitöltött völgyeiben például számos település található, melyekre akár már rövid időn belül hatással lehet - *a népességre, kultúrára, turizmusra és gazdaságra* - olvadásuk (BOSSON, J.B. et al. 2019; JOUVET, G., HUSS, M. 2019).

Kutatásom középpontjában az Alpok legnagyobb, a svájci Berni-Alpok ikonikus Aletsch-gleccsere áll. A vizsgált terület kiválasztásánál fontos szerepet játszott a gleccser mérete (ez a felhasznált adatbázis szempontjából volt jelentős), a rendelkezésre álló meteorológia adatok megléte és a korábbi mozgásra koncentrált kutatások eredményeinek részletessége és időbeli lefedettsége. Habár az Aletsch-gleccser számos kutatás tárgyát képezte és képzí napjainkban is, sebességének jellemzőit és változékonyságát közel sem ismerjük elég részletesen. Ez lehetőséget adott rá, hogy egy olyan gleccsersebesség-adatbázis alapján vizsgáljam, amely felhasználásával korábban még nem elemezték sebességét, továbbá, hogy a már meglévő ismeretünket bővítsük a társadalmi szempontból is jelentős Aletsch-gleccserről. Amellett, hogy az Aletsch-gleccser az UNESCO Világörökség részét is képzí, ez Európa legnagyobb jégára, mely a méretéből fakadóan jelentős mennyiségű édesvizet raktároz. Mindezek alapján elmondható, hogy a gleccser megóvása társadalmi és természeti szempontból is jelentős, melyhez minden, az állapotának és élettartamának felmérést célzó kutatás hozzájárulhat.

Mindezek alapján kutatásom célkitűzései a következők voltak: **I.** meghatározni a NASA ITS_LIVE adatbázis felhasználásával az Aletsch-gleccser sebességét és annak jellegzetességeit, amivel korábban még nem vizsgálták a területet; **II.** feltárjam az

Aletsch-gleccser mozgását befolyásoló domborzati és éghajlati paramétereket vagy éppen kizárjam azokat, amelyek nem vagy csak kis mértékben befolyásolják sebességét; **III.** összehasonlítsam eredményeimet korábbi, azonos módszerrel és vizsgálati időszakra készült sebességmérések eredményeivel, mely rávilágít a módszer megbízhatóságára és az Aletsch-gleccser jelenlegi állapotára; **IV.** továbbá, hogy eredményeimet egy webtérkép segítségével megjelenítsem, mely segíti azok értelmezését és felhívja a figyelmet a gleccserekre vonatkozó kutatások fontosságára. A diplomamunkám első felében a kutatásom alapját képező szakirodalmi áttekintésben a gleccserekhez kapcsolódó fogalmakat, folyamatokat ismertetem. Ezt követi a felhasznált adatbázisok és módszerek bemutatása, majd a vizsgált terület jellemzése. A dolgozat második felében ábrákkal és táblázatokkal mutatom be eredményeimet, majd értelmezem azokat és levonom következtetéseimet. A diplomamunkám a kutatásom összefoglalójával zárul, az azt követő függelékben pedig megtalálhatók a dolgozatban be nem mutatott, de az értelmezést segítő további táblázatok.

2. Szakirodalmi áttekintés

A gleccsereknek számos olyan tulajdonsága van, melyeket fontos tisztázni mozgásuk vizsgálatának szempontjából. Alább az általános jellemzőiken túl, kifejezetten a völgyi gleccserek tulajdonságait gyűjtöttem össze, amilyen az általam vizsgált Aletsch-gleccser is.

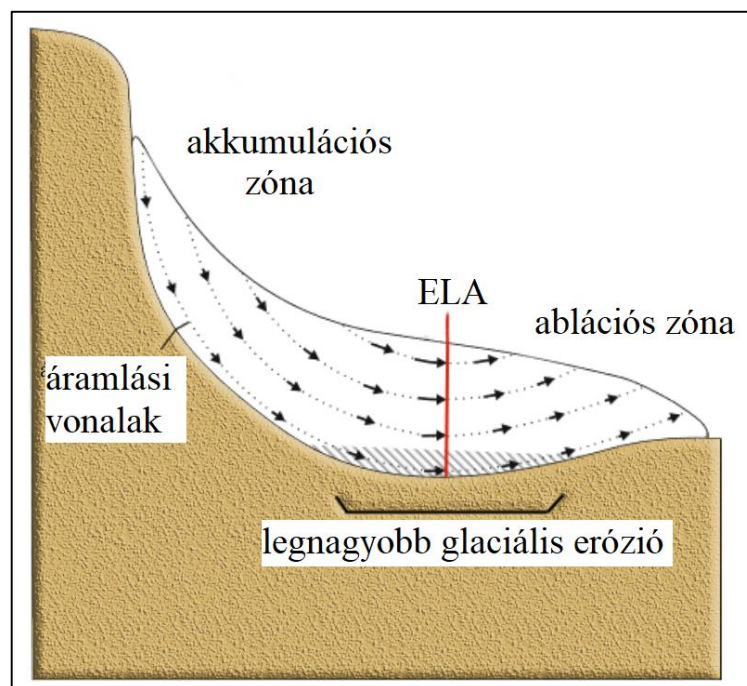
2.1. A gleccserek tulajdonságai

Általánosságban a gleccser definíciója kimondja, hogy a gleccser olyan állandó, két évnél régebb óta fennálló jégtömeg, amely a szárazföld felszínén hó vagy más szilárd csapadék átkristályosodásával jött létre és múltbeli vagy jelenlegi áramlást mutat (COGLEY, J.G. et al. 2011). Az átkristályosodás folyamatát, tehát a gleccserjég kialakulását firnesedésnek nevezi a szakirodalom, amely során a hó tömörödik a saját súlyának nyomása alatt. Ezt a folyamatot egészíti ki a melegebb nappalok és hidegebb éjszakák hatására fellépő olvadás-fagyás váltakozása, mely további kompaktációt okoz (COGLEY, J.G. et al. 2011).

A gleccser mozgását vizsgálva fontos megemlíteni a tömegháztartási tulajdonságokat. A gleccser két részre osztható, akkumulációs és ablációs területekre. A felhalmozódási (akkumulációs) és olvadási (ablációs) területet éves periódusokban érdemes vizsgálni. COGLEY, J.G. et al. (2011) meghatározása szerint az ablációs zóna az, ahol a jégolvadás meghaladja a jégfelhalmozódás mértékét, tehát összességében fogyás megy végbe a területen, így a tömegmérleg negatív lesz. Az akkumulációs zónában ennek fordítottja igaz, tehát a hófelhalmozódás lesz jelentősebb, így a tömegmérleg pozitív lesz. A tömegegyensúly a két terület találkozásánál nullával egyenlő, ez a szakasz jelöli ki a gleccser tömegegyensúlyi vonalát (ELA: Equilibrium Line Altitude) [*1. ábra*] (CUFFEY, K.M., PATERSON, W.S.B. 2010; COGLEY, J.G. et al. 2011). A gleccserek fejlődése és az éghajlati változásra adott válaszuk a tömegmérleg változásával magyarázható (HAEBERLI, W., HOELZLE, M. 1995). Az ELA változása egyfajta proxyként alkalmazható a klímaváltozásban, így ha az ELA a magasabban fekvő területek irányába eltolódik, egyértelműen az éghajlat melegekedését jelzi (CUFFEY, K.M., PATERSON, W.S.B. 2010). Az

ELA magassági változását glaciológiai, terepi és távérzékelési módszerekkel mérik (COGLEY, J.G. et al. 2011). Mindezek mellett megemlítendő a hóhatár, ami a melegtalpú gleccserek esetében egybeesik az ELA vonalával. Alapvetően időjárási viszonyoktól függően, éves szinten változó, hóval borított területek határát jelöli (COGLEY, J.G. et al. 2011).

A paleogleccserek tömegegyensúlyi vonalát, a pELA-t (paleo Equilibrium Line Altitude) más módszerekkel becsülik, mint a jelenkori gleccserek ELA értékét. A pELA-hoz szükséges megismerni a jelenkori gleccserek dinamikai, morfológiai tulajdonságait, amelyekkel rekonstruálhatják a paleogleccserek egykori kiterjedését és a pELA értékét. Számos módszer ismert a paleoglaciológiában, amelyekkel a paleogleccserek egykori jégkiterjedését meghatározhatják. Néhányat megemlítve becsülhető terepi adatokból, például az oldalmorénák maximális magasságából (KERSCHNER, H. 1990) vagy az egykori jég magasságát jelölő magassági arányszámából (NESJE, A. 2007). Ezek mellett alkalmazható területi paraméterekből becsült arányszámok is, erre példa az akkumulációs terület becsült méretével és tulajdonságaival súlyozott érték (MEIER, M.F., POST, A.S. 1962).



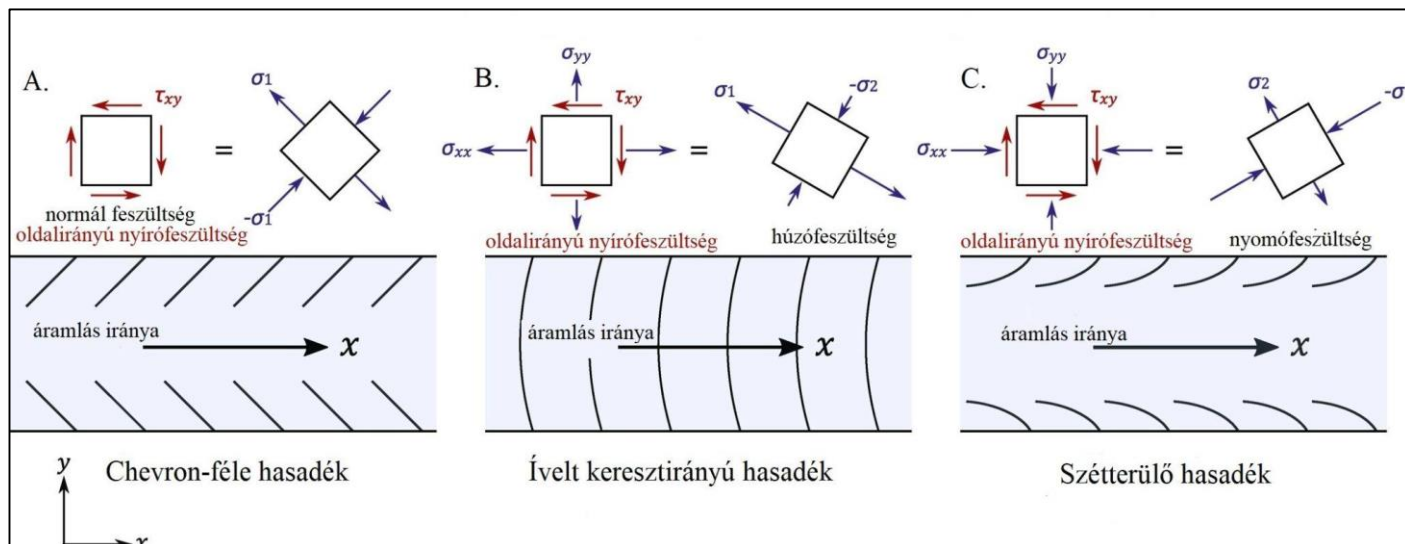
1. ábra. Tömegegyensúly és a hozzá kapcsolódó fogalmak. (BAKKE, J., NESJE, A. (2011) után szerkesztve)

2.2. A völgyi gleccserek

A völgyi gleccserek hegyvidéki területeken alakulnak ki, jól lehatárolható cirkuszvölgyekhez kötődően, amelyekben megkezdődik a hó felhalmozódása és ennek hatására megindul a firnesedés folyamata. A jég a gravitáció hatására egy idő után lejtő irányú mozgásba kezd, így a gleccser nyelve a völgyeket feltölti és abban tovább, lefelé áramlik (COGLEY, J.G. et al. 2011). A mozgás következtében (különösen ha az nagy sebességgel történik), a hegyvidéki völgyek és a táj jellege teljesen átalakul a jég erodáló hatására (HERMAN, F. et al. 2015). A negyedidőszakban a gleccserek jelentős szerepet játszottak Európa közép- és magashegységi morfológiájának kialakításában is (HERMAN, F. et al. 2015).

A völgyi gleccsereken is kialakulhatnak olyan jégfelszíni formák, melyek az objektumkövető mozgásdetektálási - *Tracking* - módszer alkalmazhatóságához hozzájárulnak. Mivel ezek a formák fizikai erők hatására folyamatosan deformálódnak és elmozdulnak, így a sebesség detektálásakor megadják azt, hogy a korábbi pozíciójukhoz képest mekkora utat tettek meg. (COGLEY, J.G. et al. 2011; CUFFEY, K.M., PATERSON, W.S.B. 2010). Ilyen terepi objektumok a *gleccserhasadékok*, vagy a gleccser felszínén elhelyezkedő *morénaanyag*.

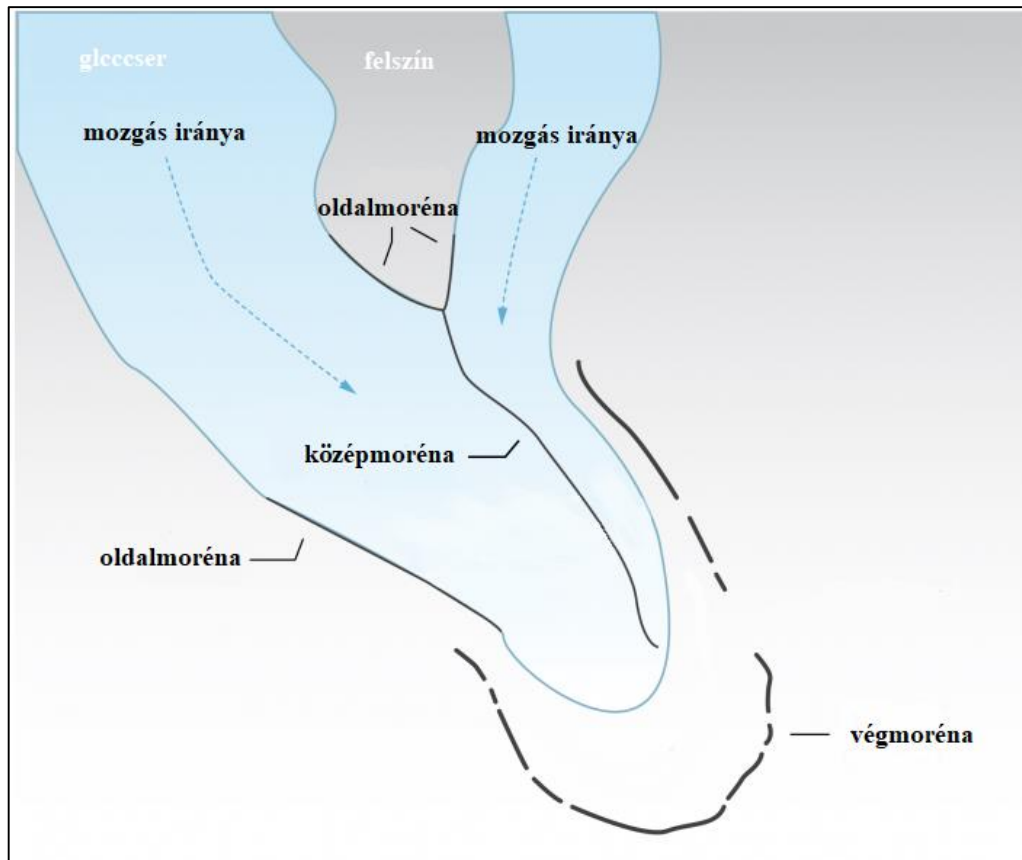
1.) *Gleccserhasadék*: A gleccserben akkor keletkezik hasadék, amikor a húzófeszültség meghaladja a jég húzószilárdságát. A húzófeszültség és a jég húzószilárdsága változó értékű, ezeket a fizikai tulajdonságokat a mélyben lévő nyomófeszültség úgy befolyásolja, hogy a felszíni hasadék formáját [2. *ábra*], irányát és terjedési mélységét szabályozza. Továbbá a felszíni olvadékvíz mélybe jutásának egyik útját adja meg, tehát az olvadás során a hasadék mérete jelentősen megnőhet, így akár elérheti a néhány tíz méteres mélységet is. (COGLEY, J.G. et al. 2011). A hasadékok formájukat és méretüket tekintve egyedi, tökéletes azonosítási objektumként szolgálnak a gleccser elmozdulásának nyomon követésében, mivel azok a jégáramlással együtt mozgásban vannak.



2. ábra. Gleccserhasadékok kialakulása nyíró-, húzó- és nyomófeszültség hatására. A gleccserre ható energiákat szemlélteti a négyzetes rajz. A normál- (σ) és nyírófeszültséget (τ) kék és piros nyilak jelölik (bal oldali négyzet). A kialakult fő feszültségeket: húzó- (σ) és nyomó- ($-\sigma$) feszültségeket a jobb oldali négyzet ábrázolja. (A.) Oldalirányú nyírófeszültségek és egyenlő mértékű nyomó- és húzófeszültségek hatására képződött Chevron-féle hasadékok; (B.) Oldalirányú nyírófeszültségekből és hosszirányú húzófeszültségekből eredő ívelt keresztirányú hasadékok. (C.) Oldalirányú nyírófeszültségek és hosszirányú nyomófeszültségek kombinációjából eredő szétterülő hasadékok. (NYE, J.F. 1952; JENNINGS, S.J.A., HAMBREY, M.J. 2021 után szerkesztve)

2.) *Moréna*: Elhelyezkedésétől függően több típusát is megkülönböztetjük a morénaanyagnak [3. ábra], mely a jég által szállított hordalékot jelenti. Két gleccser találkozásánál *középmoréna* keletkezik, amely a találkozási zónától már egy összeolvadt gleccsernyelvként tovább haladó jég középvonalaiban, hosszanti irányban feltorlódozó hordalékot képez. Több akkumulációs területtel rendelkező gleccserek vagy összeolvadó gleccserek esetén jellemző forma (CUFFEY, K.M., PATERSON, W.S.B. 2010). A *végmoréna* anyagát a gleccser frontja maga előtt tolja, így maximális kiterjedésének mértékét tudjuk feltérképezni segítségével. A végmoréna a jég visszahúzódását követően helyben marad, így a jégár egykori kiterjedését mutatja meg, bár a jelenkori sebesség detektáláshoz nem járul hozzá, mivel nem a jég felszínén helyezkedik el (VAN DER VEEN, C.J. 2013). A gleccservölgy peremén kialakult *oldalmoréna* az ELA alatti területen jön létre, a gleccsernyelv végpontjához közel helyezkedik el. Ez a jelenség tömeggyensúlyi folyamatok hatására képződik az ablációs zónában. Így a gleccser lefelé áramlásával, a

mozgási energia hatására a kőzetanyagot koptatja és törmelékét felhalmozza (CUFFEY, K.M., PATERSON, W.S.B. 2010).



3. ábra. Morénatípusok. (<https://www.antarcticglaciers.org/> forrásból szerkesztve).

2.3. A gleccserek mozgása

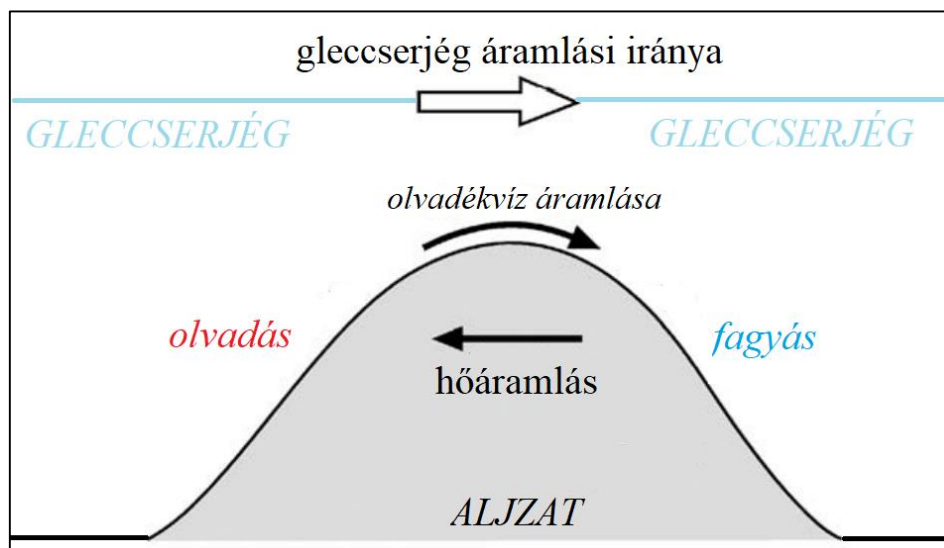
A gleccserek mozgását számos tényező befolyásolja. Ilyen például a nyírófeszültség a jég és az alapkőzet találkozásánál, a mederjellemezők (víznyomás, vízmennyiség), a domborzat vagy a rendszerben lévő olvadékvíz által szállított üledék mennyisége és minősége (CUFFEY, K.M., PATERSON, W.S.B. 2010). A következőkben a gleccserek mozgásának típusait, a gleccser sebességét és annak kutatástörténeti előzményét jellemzem. Végül a szubglaciális vízhálózat működését és tulajdonságait írom le, melynek állapota az egyik legfontosabb befolyásoló tényező egy gleccser mozgásában.

2.3.1. A gleccserek mozgásformái

1.) A **plasztikus folyás** a legjellemzőbb mozgásforma gleccserek tekintetében. A gleccser a saját tömege által kialakult nyomás következtében mozgásnak indul. A megnövekedett nyomás során a feszültség csökkentése céljából és a gravitáció hatására a gleccser lejtőirányú mozgásba kezd (VAN DER VEEN, C.J. 2013).

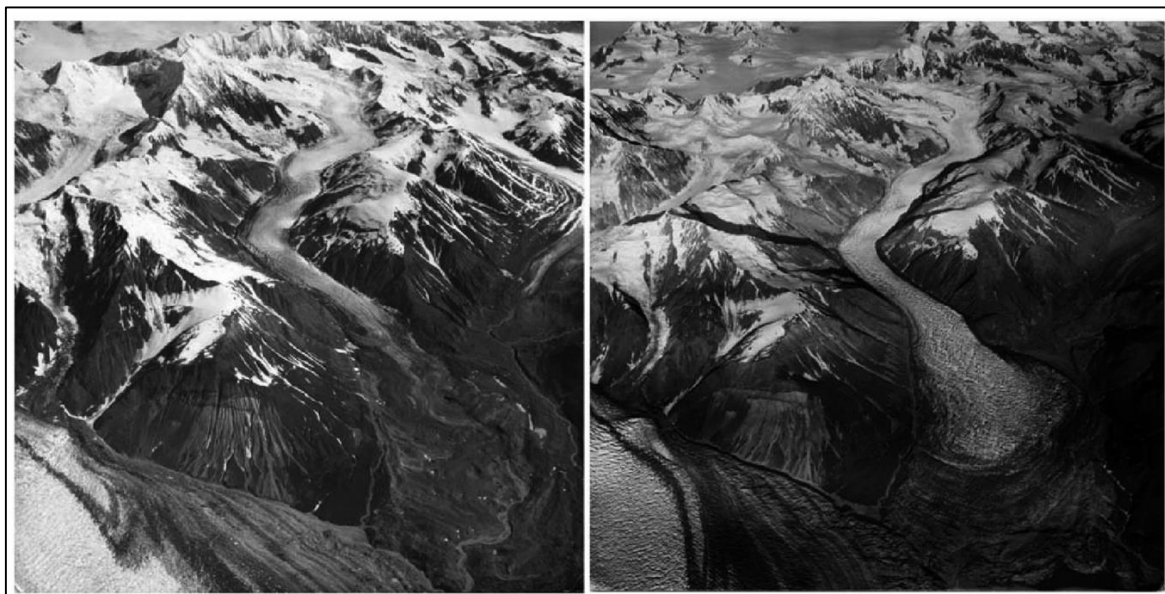
2.) A **talpi csúszás** akkor valósul meg, amikor a hasadékokon és gleccsermalmokon keresztül leszivárgó olvadékvíz a gleccseraljzat felületének átmedvesítésével csökkenti a súrlódást és lehetővé teszi a gleccser számára, hogy a mederben csússzon. A meleg talpú gleccsereknél jelentős ez a mozgás típus, mivel nagy mennyiségű olvadékvíz keletkezik (COGLEY, J.G. et al. 2011). A fejlett szubglaciális vízhálózat következtében kialakuló mozgásforma során a magas víznyomás hatására csökken a jégár felületi nyomása, így teljes tömegével csúszik a medrében (VAN DER VEEN, C.J. 2013).

3.) A jégár medre általában egyenetlen, amely fokozza a gleccserjég kompresszióját. Ez a nyomás elősegíti a gleccser olvadását azokon a pontokon, ahol valamilyen terepi akadályba ütközik. Az akadálnál kialakuló magas nyomás hatására a jég olvadási pontja megnő, ezáltal megolvad. Az olvadék megkerülve az akadályt, eléri annak túloldalát, ahol a nyomás újra lecsökken, így olvadáspontja is és ez által újra megfagy [4. ábra]. A folyamatot **regelációnak** nevezzük, melynek során az olvadás és újrafagyás következtében mozdul arrébb a jég. A folyamat kisebb, 1 méternél nem nagyobb átmérőjű akadályok esetén valósul meg (CUFFEY, K.M., PATERSON, W.S.B. 2010).



4. ábra. A regeláció folyamata. A gleccseraljzati egyenetlenség hatására megolvad a gleccserjég, így olvadékvíz formájában az akadály túloldalán megfagy. (CUFFEY, K.M., PATERSON, W.S.B. (2010) után szerkesztve)

4.) A **'surge'** (más néven lezúdulás), folyamata során a gleccser szokatlanul gyors mozgásba lendül, ilyenkor a gleccser nyelve jelentősen előrenyomulhat, akár néhány hónaptól néhány évig tartó időintervallum alatt. Ezt a folyamatot figyelhetjük meg többek között az alaskai Variegated-gleccseren, ahol 1964-ről 1965-re, egy éven belül lezajlott a lezúdulás [5. ábra]. Egy 'surge' típusú mozgásba lendülő gleccser akár néhány évtizedig tartó nyugalmi időszakot is mutathat a mozgásba lendülést megelőzően, ekkor sebessége alacsonyabb is lehet egy olyan gleccsernél, amelyen nem megy végbe a folyamat. A lezúdulást megelőző szakaszban a jégár felső része megvastagszik, az alsó része pedig elvékonyodik. A folyamat során nagy mennyiségű jég szállítódik át (nagyobb sebességgel, mint korábban) a megvastagodott felső rész területéről, az elvékonyodott alsó rész területére. A folyamat a két rész vastagságának kiegyenlítéséig tart, addig a gleccser kibillen egyensúlyából. A 'surge' akár periodikusan is ismétlődhet egy gleccseren, ez elhelyezkedéstől függően változhat. A különleges mozgásforma mögött álló fizikai és egyéb okok kevésbé ismertek. Egyes kutatások a gleccser alatti hidrológiai rendszer változásait és az éghajlati ingadozásokat tartják a legfontosabb tényezőknek a mozgásforma kialakulásában (COGLEY, J.G. et al. 2011).



5. ábra. Az alaskai *Variegated-gleccser nyugalmi állapotában 1964-ben* (balra) és a *'surge' folyamat után 1965-ben* (jobbra). A két felvétel között majdnem egy év telt el (CUFFEY, K.M., PATERSON, W.S.B. 2010).

2.3.2. A gleccserek mozgási sebessége

A völgyi gleccserek sebességének meghatározásával számos kutatás foglalkozott már (például NYE, J. F. 1952; SHARP, R.P. 1954; MATHEWS, W.H. 1964; HODGE, S. 1979; NIENOW, P.W. et al. 2005; DAVISON, B.J. et al. 2019). Az 1950-es évektől kezdve elfogadottá vált a gleccserek fizikai erőkön alapuló mozgásának meghatározása, amely tehát a gravitációs erővel, nyíró-, húzó- és nyomófeszültséggel jellemezhető (NYE, J. F. 1952; SHARP, R.P. 1954). Aztán a 60-as évek elején más fizikai paramétereket is felfedeztek, amelyek befolyásolják a gleccserek felszíni mozgását. Ilyen a belső deformáció, továbbá a bazális csúszás és a gleccser alatti üledék közötti összetett kölcsönhatás, amit a szubglaciális vízhálózat határoz meg (MATHEWS, W.H. 1964; HODGE, S. 1979; NIENOW, P.W. et al. 2005).

Jelenlegi ismereteink szerint egy gleccser mozgási sebességének meghatározását kétféle megközelítéssel vizsgálhatjuk (CUFFEY, K.M., PATERSON, W.S.B. 2010). A fizikai alapú megközelítés kimondja, hogy a gleccser a gravitációs erő hatására lejtőirányú mozgásba kezd, mely a jeget áramlásra készíti. Ezt az áramlást a jég belsejében és a kőzettel való találkozási határok mentén fellépő ellenállási erők szabályozzák. Az, hogy

egy adott áramlási sebességből mekkora ellenállási erő származik, a jég és a befoglaló közet tulajdonságaitól, továbbá a gleccser geometriájától is függ. Ez a megközelítés mindig érvényes, a gleccser mozgási sebességének értelmezéshez elengedhetetlen, azonban önmagában nem elegendő annak pontos felmérésére. A második megközelítés alapja a tömegegyensúly állandósulásán alapszik. A szilárd halmazállapotú csapadék felhalmozódásával a jég gyarapszik (akkumuláció), amely végül olvadékvíz formájában elvész (abláció). A jég nyomás hatására a felhalmozódási területről az ablációs területre szállítódik. Megfelelő nyomás nélkül a jég nem szállítódik tovább, hanem helyben felhalmozódik. Ekkor a fizikai erők és a jégvastagság addig növekszik, amíg a szállítási sebesség el nem éri azt az értéket, hogy az akkumulációs zónában felhalmozódó hó tömegét képes legyen mozgásba lendíteni. Így az áramlást általában a gleccser tömege (hófelhalmozódás és olvadás mértéke, medence geometriájának függvénye) és a kiáramlási zóna geometriája határozza meg, amely akár akadályozhatja is a mozgás beindulását. Ez a megközelítés nem teljesül, ha a gleccser kibillen az egyensúlyi állapotából, például a 'surge' folyamata vagy gyors éghajlatváltozás hatására (CUFFEY, K.M., PATERSON, W.S.B. 2010).

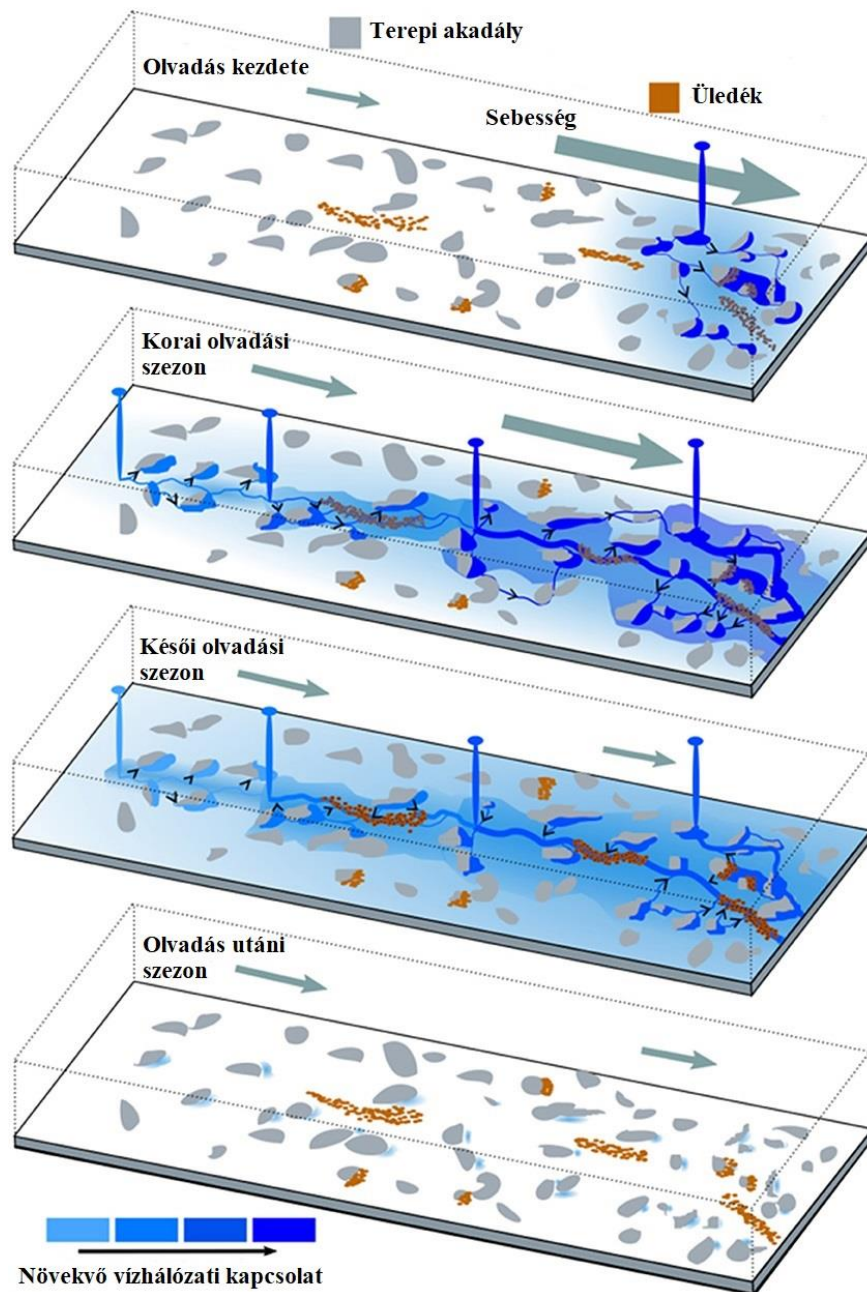
A gleccserek felszíni sebességének meghatározását már a műholdfelvétel-alapú vizsgálatok feltalálása előtt is kutatták, mely akkor még hosszadalmas terepi munkát igényelt (például MEIER, M.F., TANGBORN, W.V. 1965; HOOKE, R.L. et al. 1989). A műholdas távérzékelés széleskörű megjelenésével új távlatok nyíltak a gleccserek sebességének mérésében, fokozott figyelmet kapott az új módszerek kidolgozása, tehát a jég felszíni elmozdulásának gyorsabb és hatékonyabb meghatározása. Így a 90-es években a terepi munkát kiegészítette, vagy adott esetben felváltotta egy sokkal gyorsabb módszer, amihez egy számítógépre és egy olyan programra volt szükség, amely több műholdkép hasonlóságát volt képes meghatározni matematikai egyenletek alapján. A hasonlóságok egymáshoz viszonyított elmozdulása alapján a jég elmozdulásának mértékét is képesek voltak már meghatározni (például BINDSCHADLER, R.A., SCAMBOS, T.A. 1991; SCAMBOS, T.A. et al. 1992). Ma már számos olyan számítógépes objektumkövető algoritmus létezik, amellyel viszonylag könnyen készíthetünk gleccserekről sebességtérképeket, melyek radar vagy optikai műholdfelvételek alapján határozzák meg annak mozgását (például HEID, F., KÄÄB, A. 2012; FAHNESTOCK, M. et

al. 2016). Az ingyenesen hozzáférhető Landsat és a Sentinel műholdfelvételek arra is lehetőséget adtak, hogy globálisan is feltérképezzék a gleccserek sebességét (például GARDNER, A.S. et al. 2018; MILLAN, R. et al. 2022), viszont ehhez hatalmas munkaerő és gépigény szükséges, ami a globális lefedettségű sebességmérések számának növekedését hátráltatja.

2.3.3. A szubglaciális vízhálózat

CUFFEY, K.M., PATERSON, W.S.B. (2010) a gleccsermozgásról szóló tömegegyensúly állandósulásán alapuló megközelítése az olvadékvíz jelenlétét is magába foglalja. Az olvadékvíz szabálytalan lefolyása kanyargós csatornákat alakít ki a jég és az aljzat találkozásánál, ekkor magas víznyomás alakul ki, ami csökkenti a gleccserfenékre ható tényleges nyomást, ezáltal növeli a talpi csúszás sebességét és csökkenti a súrlódást (VAN DER VEEN, C.J. 2013). Számos elemzés és sok terepi megfigyelés ellenére sokáig nem született egyetértés a szubglaciális vízhálózat és a sebesség összefüggésére (VAN DER VEEN, C.J. 2013), mígnem DAVISON, B.J. et al. (2019) meghatároztak egy általános elméletet az olvadékvizek hatásairól a jégárakban bekövetkező mozgásokra. A jég felszíni oladásából keletkező olvadékvizek akkor okoznak átmeneti jégmozgásokat, amikor az oladási szezon kezdete során a gleccsermalmokon és hasadékokon keresztül leszivárognak az aljzatra [6. ábra]. Ekkor még fejletlen vízhálózat alakul ki, hézagokban, keskeny csatornában halad tovább az olvadékvíz. Az aljzaton átnedvesítő leszivárgott víz és magas nyomás hatására a gleccser sebessége megnő. A korai oladási szezon végére a gleccser ablációs területének aljzatán komplex vízvezető rendszer alakul ki, a hézagok nagy csatornává fejlődnek és üledék áthelyeződés történik a gyors vízmozgás és nyomáscsökkenés hatására. A magas nyomású területről a kisebb nyomású terület felé áramlik a víz, amellyel súrlódási felületet képez a gleccser alján, így a jégár sebessége csökken. A késői oladási időszakban, az ablációs terület csökkenő olvadékvíz-ellátottsága idején a víznyomás regionálisan csökken, így a jégár súrlódása megnő, amellyel a gleccser sebessége fokozottan lassul. Ez a folyamat addig tart, amíg az olvadékvíz feltöltődésének mértéke nem haladja meg az olvadást. Ezt követően újra az oladási időszak előtti állapotba tér vissza a gleccser. Ekkor az olvadékvíz-hálózat nagy

csatornái befagynak, és a kis hézagokba újra víz áramlik. Az évszakokhoz köthető szubglaciális vízhálózat ciklikussága jelentős szerepet játszik a gleccser mozgásában bekövetkező változásokban (DAVISON, B.J. et al. 2019). Jelenleg is még további kutatásra váró terület a szubglaciális vízhálózat és a gleccser sebességének kapcsolata. (DAVISON, B.J. et al. 2019).



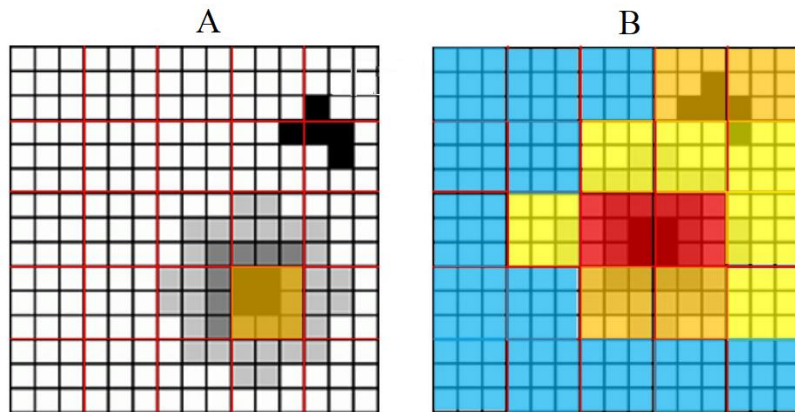
6. ábra. Szubglaciális vízhálózat egy éves fejlődési ciklusa. (DAVISON, B.J. et al. (2019) után szerkesztve)

3. Adatok és módszerek

3.1. A gleccserek sebességének meghatározása

3.1.1. *Feature és Speckle Tracking*

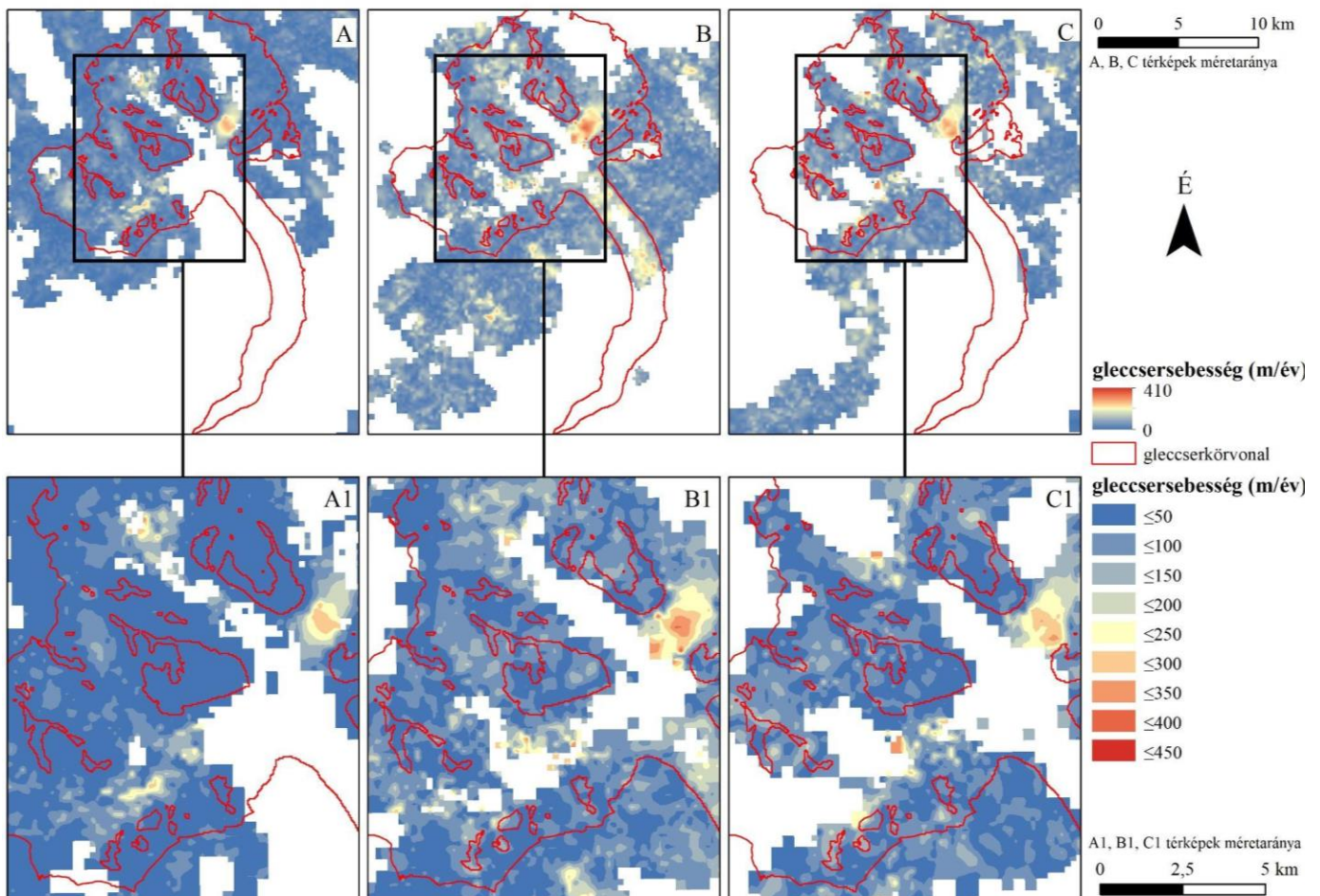
A 2.3.2. *A gleccserek mozgási sebessége* fejezetet folytatva, kitérnék a *Feature és Speckle Tracking* módszerekre, amelyek optikai illetve radaros műholdképek alapján detektálnak mozgást a gleccsereken (HEID, F., KÄÄB, A. 2012; FAHNESTOCK, M. et al. 2016). Mind a két módszer két kép kereszkkorrelációján alapszik, melyek során azonos képpontokat [7. ábra], objektumokat keres az algoritmus a felvételeken és ezek elmozdulását tudja detektálni. Az elmozdulás mértéke és a képek készítésének ideje alapján generálódik a sebesség. A *Feature Tracking* során az azonos képpontokat optikai műholdfelvételeken keresik, ebben az esetben a detektálható objektumok lehetnek hasadékok, törmelékek, morénák, tehát tereptárgyak, éppen ezért hómentes időszakban lehet használni ezt a módszert (SCAMBOS, T.A. et al. 1992). A *Speckle Tracking* során radaralapú műholdfelvételek alapján vizsgálják az elmozdulást. A módszer ugyanaz, mint a *Feature Tracking*-nél, viszont a radarfelvételek alapján számolt fizikai paraméterek változását vizsgálják, így téli időszakban érdekesebb használni. Ennek oka, hogy télen csak a hó van jelen és az olvadákvíz nem zavarja meg a nedvességtartalmat vagy a hőmérsékleti adatokat - *melyek azonosítási pontként szolgálnak az elmozdulás meghatározásában* - szemben a nyári, változékony időjárás esetén tapasztalható gyors változásokkal (SHORT, N.H., GRAY, A.L. 2004).



7. ábra. Tracking módszerek alapja, azaz a két kép keresztkorrelációján alapuló elmozdulás-mérés és sebességszámítás. A vizsgált terület (sárga négyzet) értékeit (A); összehasonlítja a másik kép értékeivel, így ahol a legjobban hasonlít a két kép területe ott - piros négyzettel jelölve - a legerősebb a korreláció (B) (VAN WYK DE VRIES, M. 2021).

3.1.2. ITS_LIVE adatbázis

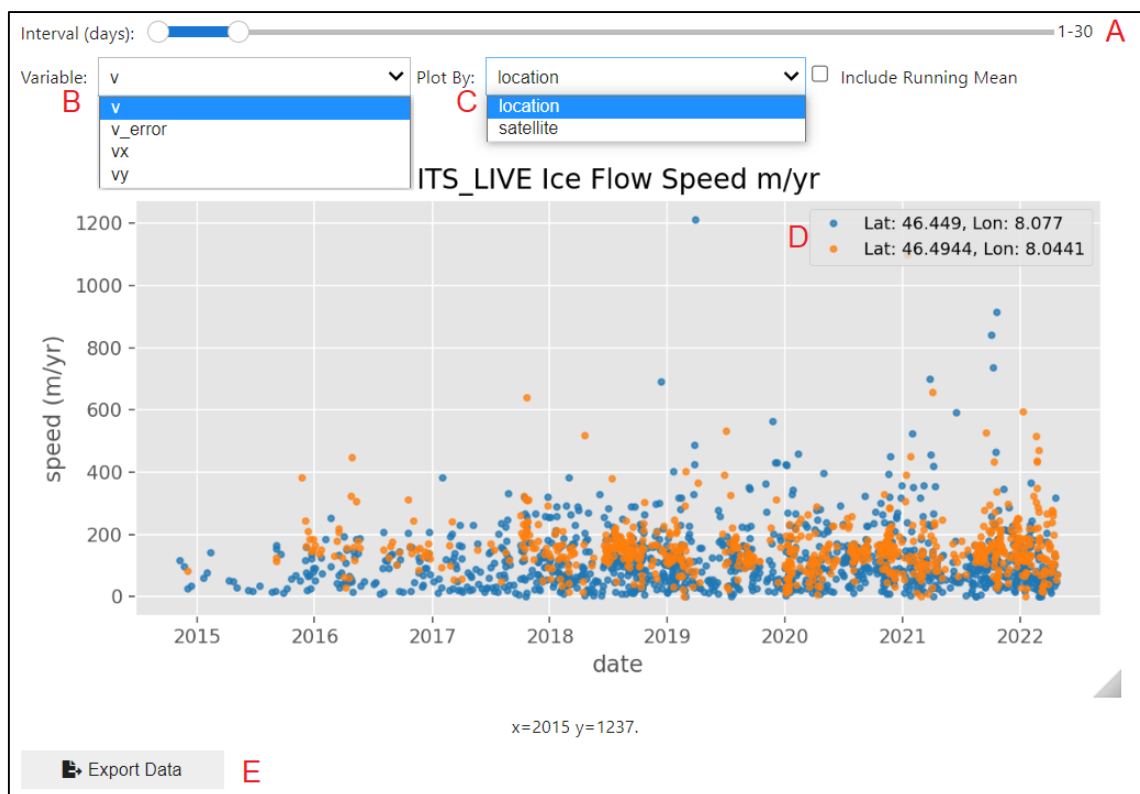
Az ITS_LIVE (<https://its-live.jpl.nasa.gov/>), vagyis a NASA MEaSURES projekt részét képező Intermission Time Series of Land Ice Velocity and Elevation projekt a gleccserek és jégtakarók globális felszíni sebességének és magasságának változását vizsgálja. A projekt kezdetén, 1985-ben csak Landsat műholdfelvételeket használtak, ma már Sentinel radar és optikai műholdfelvételekkel is dolgoznak. A sebességtérképek előállításához Feature és/vagy Speckle Tracking módszert használnak, az ismert algoritmusok közül, az Auto-RIFT eszközzel generálják a térképeket, ami egy Python nyelven írt algoritmuson alapszik (GARDENER, A.S. et al. 2018). Ezeket a térképeket az ITS_LIVE ‘Global Ice Velocities’ applikációja (<https://nsidc.org/apps/itslive/>) szolgáltatja, mely ingyenesen hozzáférhető. Az applikáció a legfrissebben mért gleccsersebesség-adatokat és magasságváltozás adatokat is tartalmazza, a folyamatos bővítésnek köszönhetően, így jelenleg a 2023-as év elejéig kérdezhető le a mérési eredmények. A sebességtérképek felbontását meghatározza az alkalmazott módszer, amellyel törekednek a pontosságra és a gyors adatgenerálásra, így 120 és 240 méter felbontású NetCDF fájlformátumú térképeket szolgáltatnak [8. ábra]. A térképek az applikáción keresztül kapott URL kóddal letölthetők. A Sentinel felvételekből készített térképek csak a ‘Version 2’ bővített adatbázisban érhetőek el (<https://nsidc.org/apps/itslive/>).



8. ábra. Az ITS_LIVE adatbázis NetCDF fájlformátumú 120 méter felbontású, Sentinel-2 műholdképek alapján készült sebességtérképei az Aletsch-gleccser területéről. Az A, B és C térképek a nyers adatokat, az A1, B1 és C1 térképek a nyers térképekből készített 50 méter intervallumú kontúrvonalas sebességtérképeket ábrázolják. A és A1: 2020.04.24-én és 2020.06.13-án; B és B1: 2020.05.06-án és 2020.05.31-én; C és C1: 2020.04.29-én és 2020.05.29-én készült műholdfelvételek keresztkorrelációjával készült sebességtérképek. A fehér területeken a módszernek nem sikerült sebességet mérnie (<https://nsidc.org/apps/itslive/>).

Az ITS_LIVE applikáció mellett van egy kiegészítő online felület, amely az ITS_LIVE ‘Global Ice Velocities’ applikáció térképeiből pontokban lekérhető gleccsersebesség adatokat és az Antarktisz magasságváltozás adatait szolgáltatja. Ez a Global Glacier Velocity Point Data Access webtérkép (<https://itslive-dashboard.labs.nsidc.org/>), melynek segítségével több évre is lekérdezhető egy gleccser kijelölt pontjában mért sebesség. A vizsgálandó pontok koordinátáit szabad kézzel is felvehetjük a térképen, vagy egy térinformatikai szoftverben előre felvett pontok koordinátáit is betáplálhatjuk (CSV fájlformátumban). Az egyes pontok sebességét és

hibáját, továbbá az elmozdulás horizontális és vertikális irányának sebességét az oldalon azonnal megjeleníthetjük egy diagramon. A diagramon megjelenített eredményeket szűrhetjük a keresztkorrelált műholdfelvételek között eltelt maximális idő alapján, továbbá a sebességi értékeket csoportosíthatjuk a pontok helyzete vagy a műholdfelvételek típusa alapján is. Mindezen beállítások csak az oldalon megjelenő diagram kinézetét módosítják, mely segíti a letölteni kívánt adataink előzetes értékelését [9. ábra]. A letöltött adatbázisunk minden mérést tartalmazni fog, tényleges szűréseket csak utólag tudunk elvégezni.



9. ábra. Az ITS_LIVE webtérkép előszűrő kezelőfelülete. Ábrázolja az Aletsch-gleccseren példaként felvett, két pontban mért sebességi értékeket 2014 és 2022 között. A: keresztkorrelált műholdfelvételek között eltelt maximális idő (példában 30 nap); B: változók alapján megjeleníthető a pontokban mért sebesség (v), a sebesség hibája (v_error), és az elmozdulás horizontális (vx) és vertikális (vy) iránya; C: a megjelenített adatsorunk a pontok koordinátája vagy a műholdfelvételek típusa alapján csoportosítható; D: jelmagyarázat és pontok koordinátái; E: a pontokban felvett sebességértékek exportálása CSV formátumban (<https://itslive-dashboard.labs.nsidc.org/>).

3.1.3. Sebességadatok szűrése és feldolgozása

A statisztikai számításaimhoz szükséges sebességi adatok az ITS_LIVE webtérképének (<https://itslive-dashboard.labs.nsidc.org/>) segítségével töltöttem le. A pontok felvétele (melyekben vizsgáltam a gleccser sebességét) a gleccser sodorvonal mentén történt. Összesen 20 pontot jelöltem ki (A1-től A20-ig) [10. ábra és 1. táblázat], ezek közül 2 pontot, az A7 és A8 pontokat keresztmetszeti sebességjellemzés céljából vettem fel. A pontok a gleccser frontjától, az abláció területéről indulnak - áthaladva az ELA vonalán - és lefedik az akkumuláció területét is (utóbbi három, különálló kárfülkére különül el, melyek mindegyikén vettem fel pontokat). Az ITS_LIVE webtérképből lekért sebességeket dátum és a keresztkorrelált műholdfelvételek elkészítése között eltelt idő alapján szűrtem. Az Aletsch területére Sentinel optikai és radar műholdfelvételekkel készült, 2014 és 2022 márciusa közötti, 120 méter felbontású sebességi adatok érhetőek el. Maximum 60 napos eltéréssel készült műholdfelvételek alapján számított sebességi adatokat elemeztem számításaim során, mivel a havi és évszakos sebességváltozásokat is vizsgálni akartam. A vizsgált sebességi értékek dátumai mindig a keresztkorrelált felvételek között eltelt idő felével azonosak (például egy január 31-i sebesség 60 napos eltéréssel készült felvételek esetén valójában a január 1. és március 2. közötti időszak során végbement elmozdulást fogja tükrözni). A pontokban mért sebességeket CSV fájlformátumban lehet lekérni az adatbázisból. Excel segítségével statisztikai kimutatásokat készítettem az egyes pontok sebességi adataiból, így vizsgálva az éves és havi átlagolt értékeket, melyeket grafikonokon jelenítettem meg.

3.2. Egyéb adatbázisok

3.2.1. MeteoSwiss adatbázis

A Svájc meteorológiai hálózatával foglalkozó MeteoSwiss szervezet valós idejű és hosszútávú homogenizált időjárási adatokat egyaránt közlétesz. Ez utóbbiak közül említendő, hogy havi hőmérsékleti átlagokat és csapadékösszegeket szolgáltat országos szinten. A hosszútávú adatokat 1864-től kezdve a Swiss National Basic Climatological Network (Swiss NBCN) mérőállomásairól gyűjtik. A Swiss NBCN összesen 26

meteorológiai állomást és 46 csapadék-mérőállomást tart számon. A meteorológiai állomásokon a hőmérsékletet, csapadékmennyiséget és a napsütéses órák számát mérik. Az 1000 méternél magasabban fekvő állomásoknál azonban csak havi átlagos hőmérséklet és csapadékösszeg adatokat szolgáltatnak.

A MeteoSwiss adatbázisából (<https://www.meteoswiss.admin.ch/>) két meteorológiai állomás [10. ábra] adatait használtam fel. A vizsgált terület szempontjából legideálisabb helyen lévő mérőállomás a 3582 méter magasságban elhelyezkedő, az Aletsch-gleccser egyik kárfülkéjének csúcsán található *Jungfrau* mérőállomás volt. Innen azonban csak hőmérsékleti adatok álltak rendelkezésre. Ezért volt szükségem egy másik állomás méréseire is, ahonnan csapadékadatokat is tudtam szerezni a területről. Ehhez a második legközelebbi, a Jungfrau mérőállomástól távolabb elhelyezkedő, 1980 méteres magasságban lévő *Grimsel Hospiz* állomást választottam. Így kutatásomban a *Jungfrau* mérőállomás hőmérsékleti és a *Grimsel Hospiz* mérőállomás csapadékadatát használtam fel. A hosszútávú havi hőmérséklet átlagokat és havi csapadékösszeg adatokat az Aletsch-gleccser sebességének vizsgálati idejére (2016-2021 időszakban) elemeztem.

3.2.2. GLIMS adatbázis

A Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS) projekt a Föld gleccsereiről különböző módszerekkel készült kiterjedési adatok gyűjtőtárhelyeként jött létre, amellyel egy egységes gleccserkiterjedés adatbázist valósítottak meg (RAUP et al. 2007). A GLIMS adatbázisból (<http://glims.colorado.edu/glacierdata/>) lekérhetjük az egyes gleccserek összes, eddigi mérésekből származó vektoros körvonalát.

Hatalmas mennyiségű adatot gyűjtöttek már össze, amely egyedülálló a világon, viszont az adatbázis tartalmaz hibákat, amelyekkel számolnunk kell alkalmazása során. Globális léptékben megállja a helyét, de lokálisan a hó, törmelék, árnyékban lévő területek hibákat okoznak, melyek befolyásolják az eredményeket, és adott esetben a nem gleccserrel fedett területeket is gleccserként azonosítják (RACOVITEANU, A.E. et al. 2009). Továbbá a vektoros állományok különböző forrásokból kerülnek a GLIMS adatbázisba,

ezért a más-más módszerekkel történő gleccserkörvonal lehatárolás miatt lehetnek átfedések két gleccser körvonala között (RAUP, B.H. et al. 2007).

Kutatásomhoz az Aletsch-gleccser körvonalára volt szükségem. A GLIMS adatbázisában fellelhető legfrissebb, 2021-es körvonalat alkalmaztam [10. ábra]. Ez alapján határoztam meg három zónát a gleccseren, amelyek segítségével a domborzati paramétereket elemeztem.

3.2.3. Jégvastagságadatok és Tracking módszerekkel mért sebességadatok

MILLAN, R. et al. (2022) kutatásainak köszönhetően a világ gleccsereinek 98%-áról rendelkezésre áll sebesség és jégvastagságadat. Ez az adatbázis (<https://www.sedoo.fr/theia-publication-products/?uuid=55acbdd5-3982-4eac-89b2-46703557938c>) 2017-2018 közötti optikai (Landsat 8, Sentinel-2 és VEN μ S) és radaralapú (Sentinel-1) műholdfelvételek felhasználásával készült, amelyek alapján Tracking módszerekkel 50 méter felbontású sebességtérképeket generáltak. A radaros felvételeket azokon a területeken használták, ahol csupa hófödte, felhő borított terület és kevés detektálható objektum volt (például Izland, Patagónia területén). A gleccserek lehatárolásához a GLIMS adatbázisban tárolt Randolph Glacier Inventory (RGI) gyűjteményét vették alapul. Az elkészült sebességtérképekből és az ASTER Global, TanDEM-X és Arctic domborzatmodellekből levezetett lejtőszögterképekből modelleztek jégvastagságot. A modellüknek vannak korlátai, ilyen például, ha a vizsgált időszakban, az adott gleccseren hirtelen lezúdulás, ‘surge’ ment végbe, akkor a modell nagy hibával, akár tízszeres jégvastagságot is becsült. Mivel az Aletsch-gleccser nem esik bele az általuk feltételezett, lezúdulásra alkalmas területekbe, így a kutatásomban felhasználtam a modellezett jégvastagsági adatokat (MILLAN, R. et al. 2022).

Sokan kutatták már különböző módszerekkel az Aletsch-gleccser sebességét (PRATS, P. et al. 2009; SCHUBERT, A. et al. 2013; KÄÄB, et al. 2016; LEINSS, S., BERNHARD, P. 2021; LI, S. et al. 2021; JOUVET, G. 2022; MILLAN, R. et al. 2022; RABATEL, A. et al. 2023/a). Így a korábban mért és publikált sebességadatokat összehasonlítottam a dolgozatomban az általam vizsgált ITS_LIVE adatbázisból lekért

sebességadatokkal. Az összehasonlításra használt adatok kiválasztását befolyásolta az adatok elérhetősége és a sebesség számításánál alkalmazott módszerek típusa. A szabadon hozzáférhető és hasonló mérési módszerekkel készült publikációk és adatbázisok a következők voltak: MILLAN, R. et al. (2021) “Ice velocity and thickness of the world's glaciers” adatbázisa, melynek jégvastagsági eredményeit is felhasználtam; a RABATEL, A. et al. (2023/b) nemrégiben publikált kutatásában bemutatott adatbázis, mely az Alpok gleccsereinek átlagos sebességeredményeit tartalmazza, továbbá LEINSS, S. (2021) hosszútávú adatsorokból átlagolt sebességadatai.

RABATEL, A. et al. (2023/a) kutatásuk során Sentinel-2 10 méter felbontású optikai műholdfelvételekkel dolgoztak, így az eredmények 2015-2021 közötti időszakot fednek le. A felvételek elemzését automatizált, kép-keresztkorrelációs módszerrel hajtották végre. Az éves átlagos sebesség eredménye 50 méter felbontású TIFF fájlként tölthető le, míg a vizsgált időszak összes képpárjára számolt, rövidebb időszakokat lefedő sebességi értékek (amelyek alapján az éves átlagos sebesség is kiszámításra került) 50 méter felbontású NetCDF fájlként tölthetők le. Ezek a Recherche Data Gouv adatgyűjteményben elérhetők (<https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/dataset.xhtml?persistentId=doi:10.57745/XHQ7TL>; RABATEL, A. et al. 2023/b).

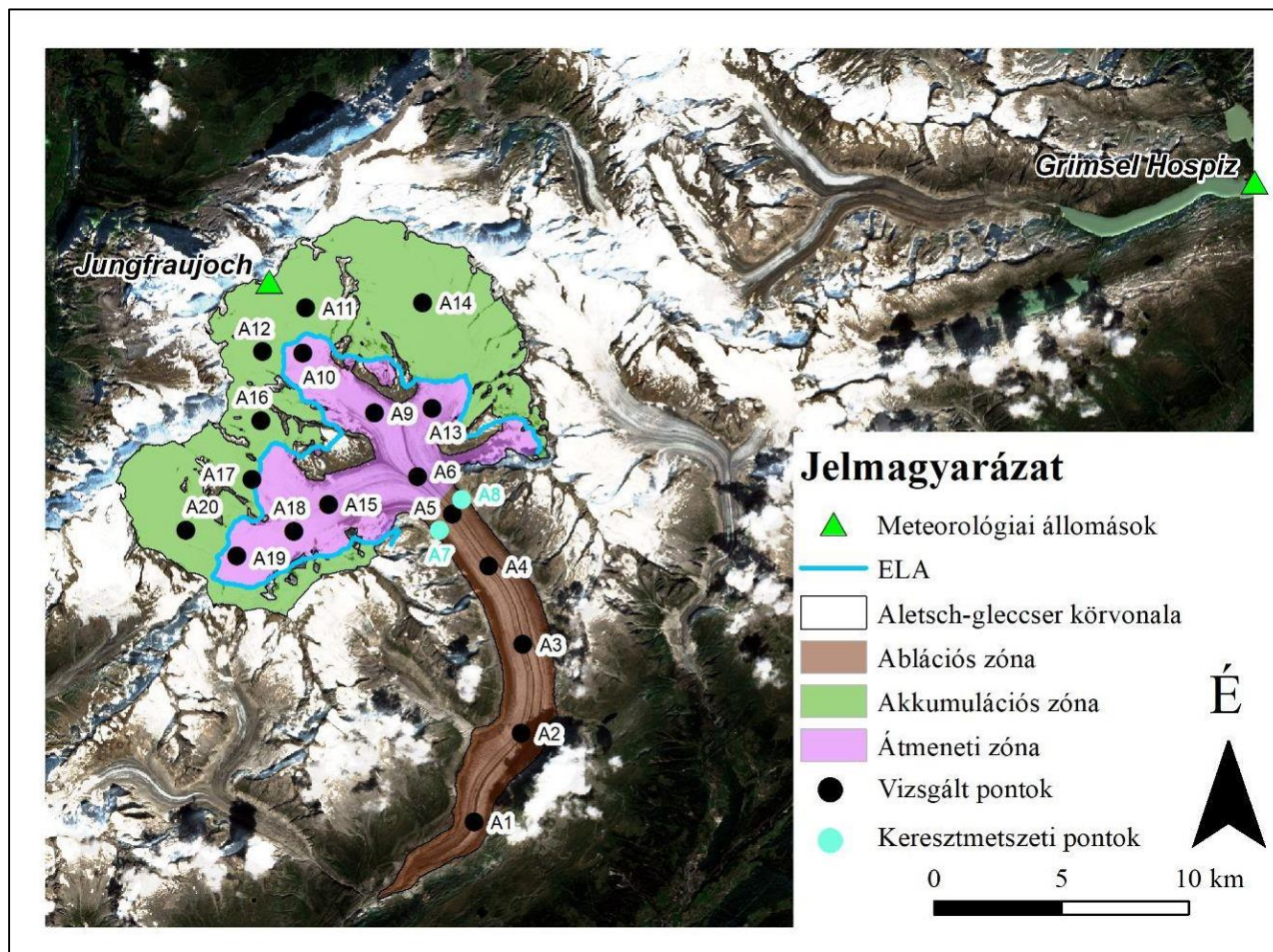
LEINSS, S., BERNHARD, P. (2021) 2011-2019 közötti időszakra vizsgálták az Aletsch-gleccser sebességét. A radaros TanDEM-X műholdfelvételekből egyedileg kódolt, automatizált Offset/Speckle Tracking módszerrel számolták ki a gleccser sebességét. Az eredményeik elérhetők a LEINSS, S. (2021) által publikált ETH Zürich adatbázisból (<https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/482456>). A letölthető 200 méter felbontású sebességtérképek RABATEL, A. et al. (2023/b) adatbázisához hasonlóan a vizsgált időszak összes képpárjára számolt, rövidebb időszakokat lefedő és a teljes időszakra vonatkozó sebesség középértékét mutatják.

3.3. Adatok kiértékelése

Tekintve, hogy az ELA alatt és fölött más a gleccserek mozgása, továbbá, hogy egy szűk völgyben lévő gleccsernyelvre további folyamatok hatnak, melyek megváltoztatják

sebességét, az Aletsch-gleccser területének zónákra való felosztását tartottam célszerűnek a mozgás dinamikai szempontból való értékeléséhez. Ehhez szükségem volt az Aletsch-gleccser ELA vonalának legutóbbi magasságára, mely a GLAMOS adatbázis (1881-2022) legutolsó, 2020-as mérés alapján 3125 méteres magasságban húzódott. MATTAVELLI, M. (2016) publikációjában az ELA nem vonalként, hanem sokkal inkább átmeneti területként értelmezendő, melyet igazol CUFFEY, K.M., PATERSON, W.S.B. (2010) megállapítása, miszerint az ELA közelében lecsillapodik a felhalmozódás, folyamatosan tömörödik a hó, jéggé alakul, majd elkezdődik az abláció. Mindezek alapján három vizsgálati zónára osztottam az Aletsch-gleccsert (a GLIMS adatbázisból lekért körvonalon belül): **akkumulációs zóna** (3125 méter fölötti terület); **átmeneti zóna** (3125 méter alatti és a gleccsernyelv (ablációs zóna) fölötti terület); **ablációs zóna** (gleccsernyelv területe). Így a felvett 20 pont, ahol a sebességet vizsgáltam, szintén 3 csoportra különíthető el, amelyek alapján értékeltem a kapott eredményeket [10. ábra].

A három zóna kijelölése többek között az SRTM alapú domborzatmodell-elemzéshez is hasznos volt. A 30 méteres felbontású SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) digitális domborzatmodelleket az Amerikai Egyesült Államok Geológiai Szolgálat (USGS) adatbázisából (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) értem el. A felületről ingyenesen letölthetők a felvételek, viszont regisztrációhoz kötött. Az SRTM projekt 2000 februárjában a NASA Endeavour űrrepülőgépekkel valósult meg, melyek az északi szélesség 60° és a déli szélesség 57° között mérték fel a Föld felszínét (RODRÍGUEZ, E. et al. 2006).



10. ábra. Az Aletsch-gleccser sebességének elemzéséhez felvett vizsgálati pontok, a gleccser dinamikai szempontból zónákra osztott területe, és az ezekhez közel eső meteorológiai állomások elhelyezkedése. Akkumulációs zóna (zöld szín): A11, A12, A16, A17, A20; Átmeneti zóna (ciklámen szín): A6, A9, A10, A13, A15, A18, A19; Ablációs zóna (barna szín): A1, A2, A3, A4, A5, A7, A8. Alaptérkép: 2021.09.01-én készült Sentinel-2-es műholdkép (<https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser>). Gleccser körvonala: GLIMS adatbázisból lekérhető 2021-ben készült körvonala (<http://glims.colorado.edu/glacierdata/>). Meteorológiai állomások: pontok koordinátáit a METEOSWISS adatbázis szolgáltatja (<https://www.meteoswiss.admin.ch/>).

Az Aletsch-gleccser területét két SRTM csempe fedi le, amelyek az északi szélesség 46° , valamint a keleti hosszúság 7° és 8° között húzódnak. A domborzatmodell-elemzéshez az ArcMap szoftver 10.8-as verziójával dolgoztam. Először az SRTM TIFF fájlformátumú csempéket összeillesztettem a *Mosaic* eszközzel. A vizsgálati zónák felosztásához és a terület lehatárolásához a GLIMS adatbázisból lekért gleccser körvonalát vettem alapul. A domborzatmodellből szintvonalas (*Contour*) térképet készítettem, ami alapján pontosan meg tudtam rajzolni az ELA elhelyezkedését, majd manuálisan a 2021.09.01-én készült Sentinel-2-es műholdkép (<https://apps.sentinel->

hub.com/eo-browser) alapján az ablációs zónát (gleccsernyelvet) is lehatároltam. Így különült el a gleccser három zónája. A terület domborzatának megismeréséhez és elemzéshez lejtőszög- (*Slope*) és lejtőkitettség- (*Aspect*) térképeket is előállítottam. A gleccseraljzat meredekségének (*Slope*) statisztikai adataira is kíváncsi voltam, amit az SRTM magasságértékeiből a *Raster Calculator* eszközzel kivont jégvastagságadatok (MILLAN, R. et al. 2021) alapján számítottam. Ezt a folyamatot megelőzte a pixelméret újramintavételezése (a *Resample* eszközzel), amivel a jégvastagság térkép pixeleit 30 méter felbontásra javítottam (az SRTM pixelméretéhez és elhelyezkedéshez igazítva). A *Zonal Statistics as Table* eszközzel a három vizsgálati zónára átlagos *magassági*, *lejtőszög* és *gleccseraljzat lejtőszög* értékeket, a magassági adatokból minimum és maximum értékeket és a lejtőszögtérképből maximum értékeket számoltam. A *lejtőkitettség* térképet *Raster Calculator* segítségével radiánba átszámoltam, így a statisztika szempontjából átlagolható értékeket kaptam. Majd a már átlagolt radián értékeket fokba átszámolva megkaptam a lejtőkitettség vizsgált területekre számolt átlagát. Végül a vizsgált (A1-A20) pontokban mért konkrét értékeket is meghatároztam a domborzatmodellből levezetett térképek alapján.

A korábbi kutatások sebességtérképeinek összehasonlításához egy mértékegységre hoztam a térképek értékeit, így LEINSS, S. (2021) adatait RABATEL, A. et al. (2023/b) és MILLAN, R. et al. (2021) adatainak mértékegységéhez igazítottam. Mivel LEINSS, S. (2021) méter/napban számolt, ezért a *Raster Calculator* eszköz segítségével 366-al felszoroztam az eredményeit, és így megkaptam méter/évben Leinss sebességtérképét.

3.4. Webtérkép készítése

A domborzatelemzés eredményeinek és az Aletsch-gleccseren mért átlagos sebességek megjelenítése céljából webes környezetben ábrázoltam az adatokat. A webtérkép a vizsgált 20 pont és a három zóna eredményeinek vizuális megjelenítését szolgálja, amely magába foglalja a tengerszint feletti magasság, jégfelszíni lejtőszög, gleccseraljzat lejtőszög, jégvastagsági és átlagos sebességi értékek megjelenítését. A poligon, pont és vonalas rétegeket a QGIS 3.26.2-es verziójában GeoJSON fájlá

alakítottam, amit a Leaflet (<https://leafletjs.com/>) - térképek megjelenítését szolgáló, nyílt forráskódú - JavaScript-könyvtár segítségével jelenítettem meg.

Először létrehoztam a webes környezet alapját, a HTML (HyperText Markup Language) nyelven írt weblapot, aminek a <head> részében meghívtam a Leaflet JavaScript-könyvtárat és a Leaflet egyik kiegészítő csomagját (Sidebar; <https://github.com/Turbo87/leaflet-sidebar>), amivel leíró szöveget tartalmazó, felugró ablakot lehet létrehozni a weblapon [11. ábra].

```
<!doctype html>
<html>
  <head>
    <title>Aletsch-gleccser</title>
    <meta charset="utf-8">
    <link rel="stylesheet" href="leaflet/leaflet.css" />
    <script src="leaflet/leaflet.js"></script>

    <link rel="stylesheet" href="leaflet-sidebar-master/src/L.Control.Sidebar.css">
    <script src="leaflet-sidebar-master/src/L.Control.Sidebar.js"></script>
```

11. ábra. Leaflet és Leaflet kiegészítő csomag (Sidebar) behívása a programkódba.

Majd CSS (Cascading Style Sheets) formázással a weblap stílusát a <style> szakaszban szerkesztettem. A már meglévő, néhány Leaflet-es osztályt módosítottam, emellett létrehoztam egyedi azonosítókat és további osztályokat. Így a weblap formázása során osztályokra és azonosítókra hivatkozva átláthatóbbá válik a kód. A CSS osztályokat több kódszakasznál meghívtam, így a program írását felgyorsítottam, és a weblap végleges kinézetét is egységesíteni tudtam [12. ábra].


```

#terkep_helye {
  width: 100%;
  height: 100%;
}

.leaflet-control-scale-line {
  font-family: Times New Roman;
  font-weight: bold;
  color: #1f1f1f;
  text-align: center;
  font-size: 14px;
  background-color: #849d7b;
  opacity: 0.85;
  cursor: auto;
}

.popup_cim {
  font-family: Times New Roman;
  font-weight: bold;
  color: #1f1f1f;
  text-align: center;
  font-size: 20px;
  cursor: auto;
}

```

12. ábra. CSS formázásra példa a programkódból. Egyedi azonosító ('#terkep_helye') és osztály ('.popup_cim') létrehozása, és az eredeti Leaflet CSS fájlban lévő osztályok módosítása ('.leaflet'-tel kezdődő osztályok).

A <body> szakasz a weblap elemeinek elrendezéséért felel, így itt megadtam az infógomb helyét, a térkép címét és pozícióját [13. ábra]. A programkód szerkezeti felépítése szerint a <body>-ban hozzuk létre a <script> törzsben szereplő függvényeket. Így ebben a szakaszban a függvényekkel és az ehhez szükséges változókkal, szótárakkal [14. ábra] a térkép felhasználóbarát funkcióit fejlesztettem.

```

<body>
  <div id="cimsor"><a>Mitől függ az Aletsch-gleccser sebessége?</a></div>
  <div id="terkep_helye"></div>
  <div id="info_gomb" onclick="infogomb()" title="Információs panel">
    i
  </div>

```

13. ábra. A programkódba megírt weblap szerkezeti felépítése (<body>).

```

function terület_szin(p) {
    let szin;
    if (p == "Ablációs zóna") szin = '#6C3C0B';
    else if (p == "Átmeneti zóna") szin = '#E010C0';
    else if (p == "Akkumulációs zóna") szin = '#50C380';
    return szin;
};

function terület_stilus(feature) {
    var szin;
    var p = feature.properties.vizsg_teru;
    szin=terület_szin(p);
    return {
        'pane': 'terület',
        'color': '#A0A0A0',
        'fillColor': szin,
        'weight': Number('1'),
        'fillOpacity': '0.7',
        'opacity': '0.8',
        'className': 'pop'
    };
};

```

14. ábra. Példa a programkódból egy komplex, függvénnyel (function terület_szin()) módosított dinamikus szótár (terület_stilus{}) létrehozására. A zónákat a GeoJson fájl attribútuma alapján színezi a program.

A kutatásomban is felhasznált poligon, vonalas, pont rétegek webes megjelenítéséhez változókat hoztam létre, így például a rétegkezelő és a felugró ablakok függvényeiben változóra hivatkozva érthetőbbé válik a programkód felépítése és logikája. A rétegek térképi nézet sorrendjét a `.createPane()` függvénnyel és `Zindex` érték növelésével rendeztem, így a pont rétegek kerültek legfelülre, középre a vonalas és legalulra a poligon rétegek.

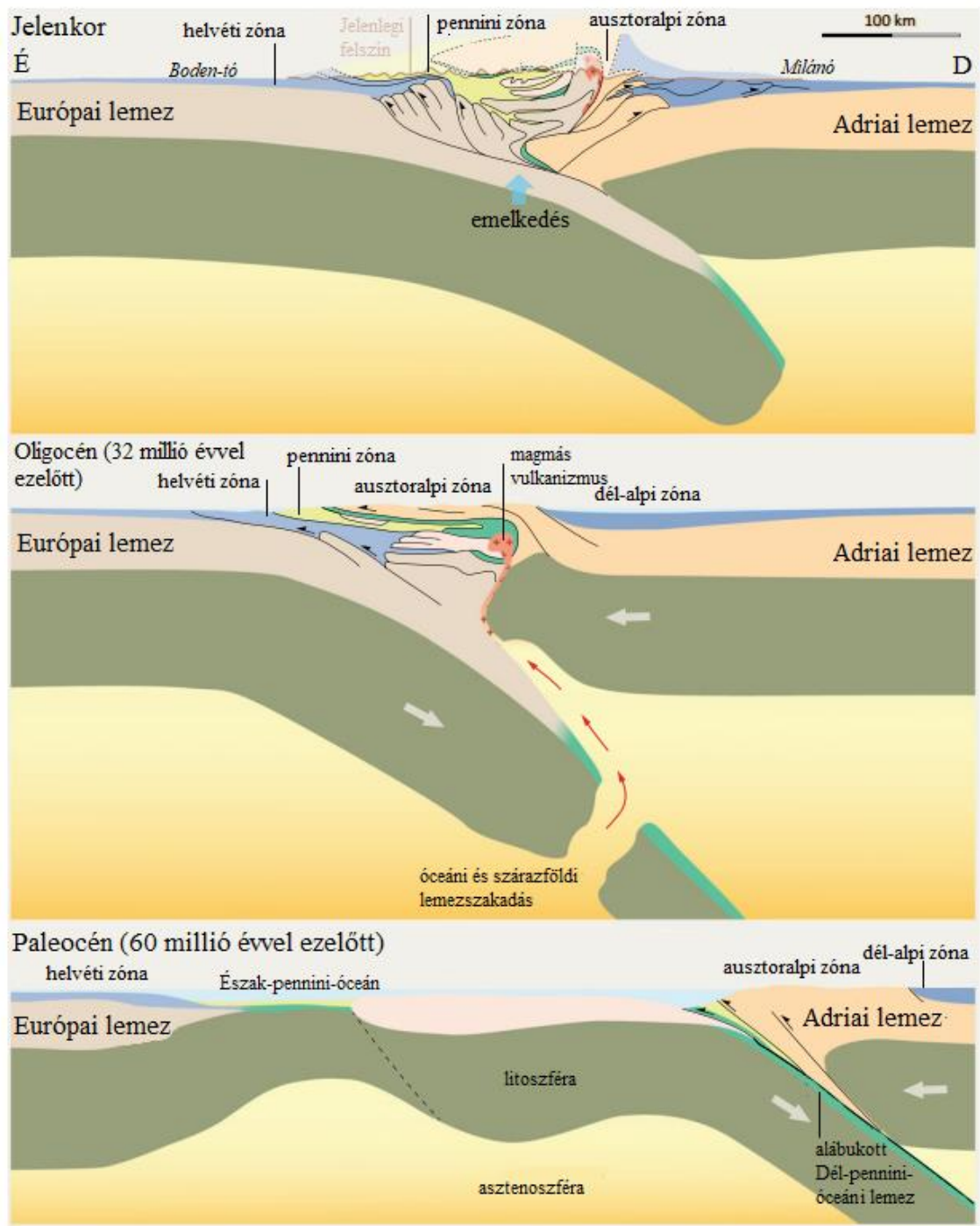
A térkép rendelkezik rétegkezelővel, ahol az alaptérképek és a rétegek ki-bekapcsolhatók. Továbbá helyet kapott egy infógomb, ami tartalmaz egy rövid leírást a térkép használatáról. Emellett a megjelenített rétegekre kattintva a számolt eredményeket vagy rövid információkat felugró ablakokon keresztül kérheti le a felhasználó.

4. Vizsgált terület

4.1. Az Alpok

Az Aletsch-gleccser területi jellemzése előtt fontos kitérni az Alpok hegységképződési folyamatára. Az Alpok takaróredős gyűrthegeység, amely magashegységi eljegesedés nyomait is magán viseli. Az Alpok tektonikus folyamatát a ‘Piedmont’ (dél-pennini) és a ‘Valais’ (észak-pennini) óceáni medencék egymást követő szétnyílása és bezáródása, valamint az ehhez kapcsolódó lemezmozgások okozták. Az óceáni medencék három részre tagolták a szárazföldi lemezt, amik a mai takarórendszereket adják. Délen kialakult az ausztroalpi–dél-alpi zóna (mai Déli-Alpok), ezt követte a pennini zóna (mai Keleti-Alpok), végül északon a helvétii zóna (mai Nyugati-Alpok) (FRISCH, W. 1979).

A variszkuszi hegységképződés után a paleozoikumban az akkori felszín a tengerszint-emelkedés hatására lepusztult, majd teret kapott a karbonátos üledékképződés. A Pennini-óceán záródása során elkezdődött a flis képződés. A fokozatos tengerszint-csökkenéssel az üledékképződés lecsillapodott és tektonikai folyamatok vették át a szerepet [15. ábra], amikor a Középső- és Nyugati-Alpok fő gyűrődési szakaszához ért a felszín alakulása, ekkor az Alpok déli szakaszán még magmás tevékenység is jelen volt (MESCHÉDE, M., WARR, L.N. 2019). A tektonikus deformációk hatására különböző szerkezettel rendelkező három nagy (ausztroalpi - dél-alpi, pennini, helvétii) takarórendszer alakult ki. Ezek a takarórendszerek két részből állnak, rendelkeznek egy alap- és egy fedőegységgel. Az alapegység óidei kőzeteit jellemzően a két főhegységképződés során végbement metamorfózis alakította át. A fedőegységet csak helyben történt tektonikus mozgás érintette, így a gyűrt középidői üledékek és a magmás képződmények megmaradtak. Ezeken kívül még további kisebb takarórendszer-egységek is vannak, ilyen például a Molassz-öv, ami Nyugati- és Keleti-Alpok északi részén húzódik (REYNARD, E. 2020).



15. ábra. *Alpok kialakulásának tektonikus folyamatai.* (MESCHEDE, M., WARR, L.N. (2019) után szerkesztve)

A hegységképződési folyamat a mai napig tart, amely MESCHEDE, M., WARR, L.N. (2019) publikációja szerint a Közép-Alpokban körülbelül 1 mm/év kiemelkedést jelent. Ezek a múltbéli tektonikus folyamatok alakították ki az Alpok legmagasabb csúcsát is, a

Nyugati-Alpokban található Mont Blanc-ot, ami eléri a 4810 méteres magasságot (MESCHÉDE, M., WARR, L.N. 2019). Jellemzően az Alpok nyugati területe a legmagasabb, legcsapadékosabb és legeljegesedettebb. A Berni-Alpok területét, a legtöbb jégárral rendelkező területként tartja számon az UNESCO adatbázis. Itt található Európa leghosszabb gleccsere, a diplomamunkámban is vizsgált Aletsch-gleccser.

4.2. Eljegesedés, utolsó glaciális maximum

Az Alpok jelenlegi geomorfológiája főként az utolsó eljegesedési időszakhoz köthető lehülésből eredő jelenségek (hó, fagy, jég) eróziós tevékenységének eredménye (MESCHÉDE, M., WARR, L.N. 2019). A pleisztocénban bekövetkezett sorozatos glaciális és interglaciális időszakok, tehát a hidegebb és melegebb periódusok váltakozása alapjaiban formálta át a hegység arculatát (RAVAZZI, C. 2003). Az Alpokban hat fő eljegesedési fázist mutattak ki, melyek időrendben a következők: biber, duna, günz, mindel, riss és würm. Európa területén a belföldi jégtakaró legnagyobb kiterjedése a MIS12 és MIS16 (Marine Isotope Stage) időszakokra tehető, 650.000-600.000 és 450.000-400.000 évvel ezelőttre (HUGHES, P.D. et al. 2006). Ezek a günz és mindel eljegesedési időszakoknak felelnek meg. Az utolsó glaciális maximum (Last Glacial Maximum – LGM), - *amikor a globális jégtakaró elérte a maximumát* - idejének meghatározására a kutatások eltérő eredményeket mutatnak. CLARK, P.U. et al. (2009) megállapításai a mai napig helytállónak mondhatók, miszerint az LGM 26500-19000 évvel ezelőtt következett be Európa területén, a legújabb eredmények figyelembevételével azonban egy tágabb időszakot fogadnak el a kutatók, a 29.000-19.000 évvel ezelőtti periódust tekintik az LGM korszakának. Ez egybeesik az Alpok területén bekövetkezett lokális eljegesedés maximumával, de bizonyos területek esetében nem feltétlen egyezik meg azzal (PALACIOS, D. et al. 2022). A Pireneusok területén radiokarbon kormeghatározási módszer segítségével például kimutatták, hogy az ottani glaciális maximum megelőzte a globális LGM-et (HUGHES, P.D. et al. 2006).

Az Alpokban az utolsó, würm glaciális időszak geomorfológiai nyomai a mai napig megtalálhatók. Ezt az időszakot is folyamatos több, rövidebb felmelegedés és lehülés jellemezte (GOUDIE, A. 2004). Ekkor a gleccserek fejlődésnek, növekedésnek indultak,

így például több száz méteres vastagságú, hatalmas jég fedte területek alakult ki a Keleti-Alpokban is (IVY-OCHS, S. et al. 2005). Ennek az időszaknak az egyik hátramaradt, jellegzetes formái a gleccsernyelv tavak, mint például a Garda-tó, melyek a gleccserek visszahúzódását követően alakultak ki (RAVAZZI, C. et al. 2014). További kutatás is alátámasztja, hogy a lokális LGM a Keleti- és a Nyugati-Alpok régiókban a globális LGM-el esett egy időbe (WIRSIG, C. 2016). A Nyugat-Alpok egy részén azonban azt is kimutatták, hogy az LGM időszakában a gleccserek kiterjedése hasonló vagy kisebb volt, mint az LGM-et megelőző időszakban, amelyet egy bekövetkezett éghajlati változás következményével magyaráztak (ROATTINO, T. 2022).

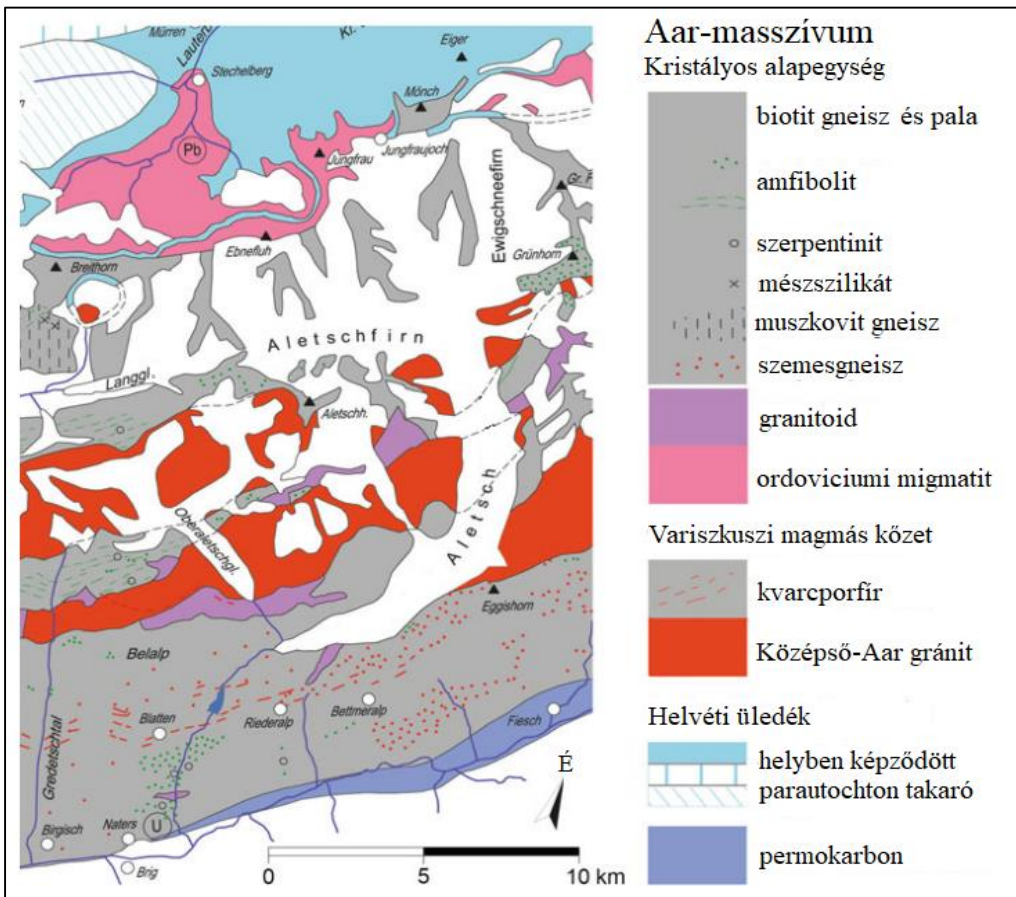
4.3. Aletsch-gleccser területi adottságai

A Magas-Alpok régiója számos különleges felszínformával büszkélkedhet, ilyenek például a kialakulásának következtében felszínre került 400 millió éves kristályos kőzetek, a völgyi gleccserek, morénák, vagy a mára már jégmentes, gleccser vájta, látványos U-alakú völgyek. Az Alpok mai legeljegesedettebb részén található az Aletsch-gleccser is, amely Európa legnagyobb és leghosszabb gleccsere (UNESCO adatbázis).

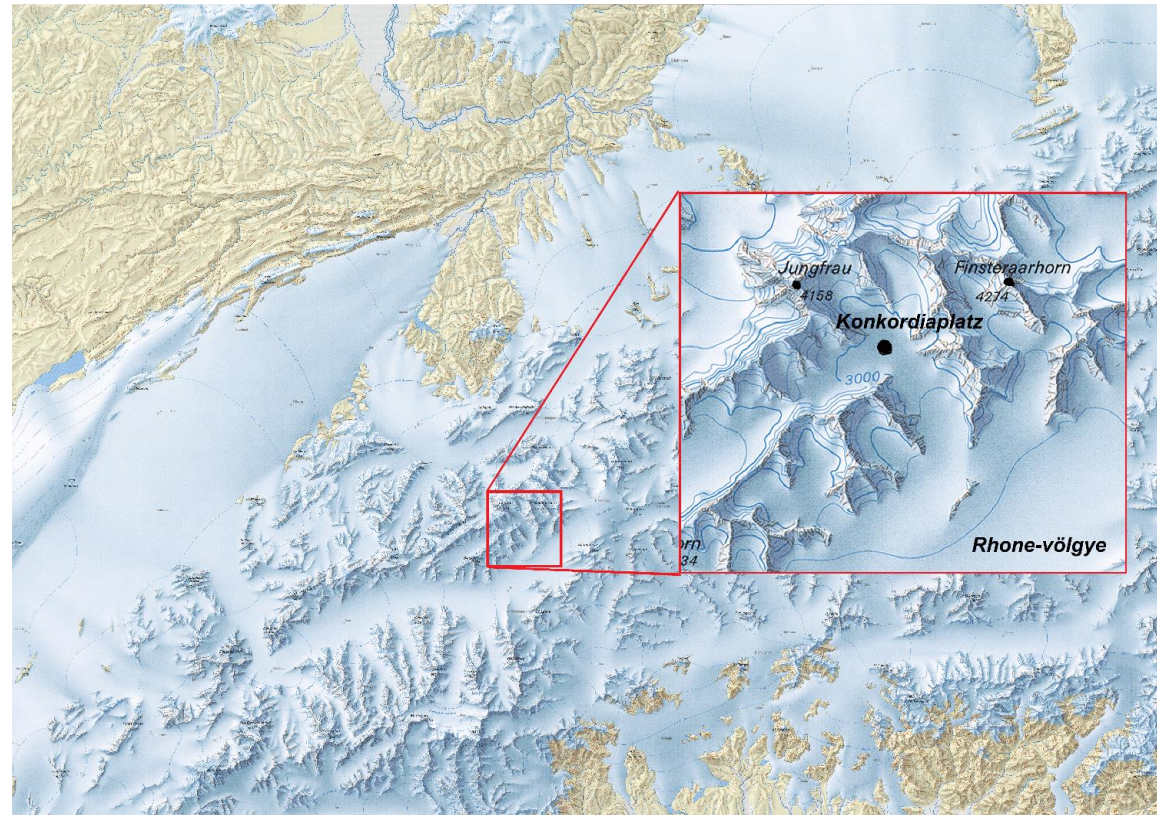
4.3.1. Az Aletsch-gleccser elhelyezkedése

Az Aletsch-gleccser (más néven: Nagy Aletsch-gleccser) Közép-Európában található, az Alpok legnagyobb gleccsere, több mint 20 km hosszú és átlagosan 800 m-es jégvastagságú. A gleccsert négy különálló cirkuszvölgy táplálja, körülbelül 80 km²-nyi területen helyezkedik el a Nyugati-Alpokban, azon belül is a Berni-Alpokban (BAUDER, A. et al. 2007; FARINOTTI, D. et al. 2009). A cirkuszvölgyek határosak a Bern-Wallis kanton határán található nevesebb csúcsokkal: Jungfrau (4158 m) és Mönch (4107 m) (AELLEN, M., RÖTHLISBERGER, H. 1981). A gleccser teljes térfogata a svájci Alpok teljes jégtérfogatának több mint 20%-át teszi ki (BAUDER, A. et al. 2007; FARINOTTI, D. et al. 2009). Így hidrológiai ciklus szempontjából is meghatározó, mivel az olvadékvizével a Rhône-folyót táplálja, így a délen elhelyezkedő vízgyűjtő területét ciklikusan szabályozza (VERBUNT, M. et al. 2003).

A gleccser és firngyűjtő területeinek alapját a fiatal üledékes kőzetek alól kibukkanó Aar-masszívum (helvétai zónában elhelyezkedő) alapkőzet képezi. A masszívum egy része metamorfózis során létrejött palákból, gneiszekből, amfibolitokból és migmatitokból áll. A másik részét Középső-Aar gránit alkotja, ami többnyire biotit gneisz, amely az Alpok hegységképződése során hatolt be a metamorf alapkőzetbe [16. ábra] (REYNARD, E. 2020). A gleccser egykori eróziója nyomot hagyott a felszínen, így a metamorf kőzet anyaga a jelenlegi gleccsornyelv völgyoldalában és elején felhalmozott morénák (oldal- és végmoréna) formájában látható ma is (KELLY, M.A. et al. 2004). Ezek jelzik a gleccser egykori kiterjedését az LGM-ben és a Kis jégkorszakban (LIA: Little Ice Age). Az LGM idején a gleccser kiterjedése elérte a Rhône völgyét [17. ábra], jégvastagsága pedig 2900 méter körül alakult a Konkordiaplatz közelében (a gleccsornyelv legfelső szakaszán) (KELLY, M.A. et al. 2004). Viszonyításképp, ezen a területen a legfrissebb modellezések körülbelül 650 méterre becsülik a jégvastagságot (MILLAN, R. et al. 2021). A belső moréna-rendszer kialakulását a Kis jégkorszak (kb. 1300-1850/60 közötti időszak) idejére datálják. Ekkora tehető a gleccser utolsó nagy kiterjedése is, amely 1856 óta csökkenést mutat (GROVE, J. 1988).



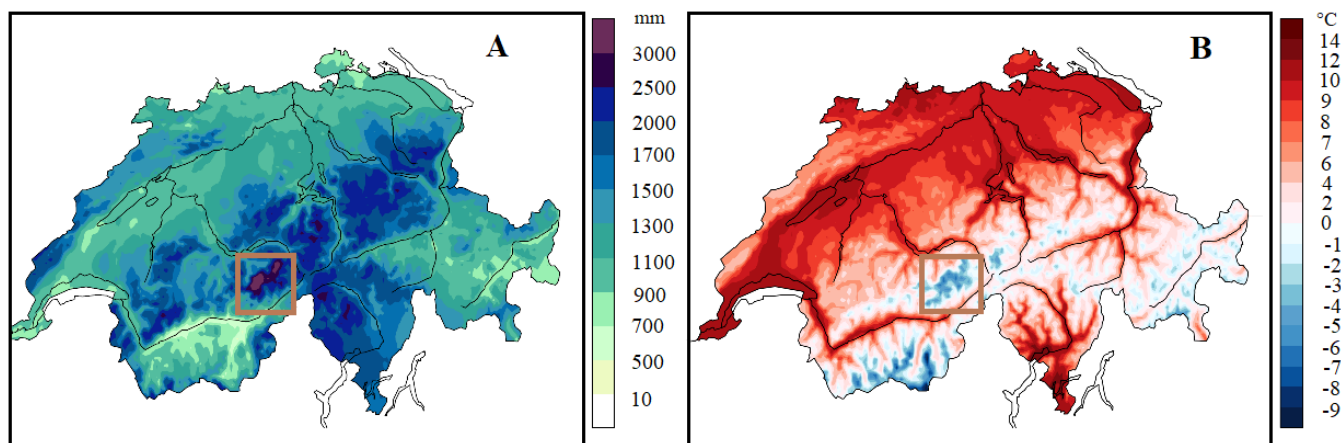
16. ábra. Az Aletsch-gleccser környezetének földtani felépítése. (REYNARD, E. (2020) után szerkesztve)



17. ábra. Svájc eljegesedésének mértéke (kékesfehérral borított területek) az LGM idején. Piros négyzet az Aletsch-gleccser területét jelöli (ötszörös nagyításban). A nagy LGM térkép méretaránya: 1:500000. (Térkép forrása: <https://opendata.swiss/en/dataset/die-schweiz-wahrend-des-letzteiszeitlichen-maximums-lgm-1-500000>)

4.3.2. Az Aletsch-gleccser és környezetének éghajlata

Az éghajlati paraméterek vizsgálatával magyarázatot kaphatunk a gleccserek viselkedésére, mozgásukban vagy tömegegyensúlyukban bekövetkező változásokra, a rendszerben lévő olvadékvíz mennyiségére vagy egyéb váratlan eseményekre, mivel ezen jelenségek mindegyikét befolyásolhatják. Így fontosnak tartom az Aletsch-gleccser területének éghajlati jellemzését, mely legkönnyebben Svájc hosszútávú, 1991-2020-as meteorológiai mérései alapján vizsgálható [18. ábra] (METEOSWISS). Az Alpok magasságának köszönhetően a hegyvidéki területek legmagasabb részein az éves átlaghőmérséklet fagypont alatt van. Az Aletsch-gleccser firngyűjtő területein -5 és -4 °C közé esik, míg a gleccsernyelv déli részén közel 0 °C körüli az éves átlaghőmérséklet, a területet kora tavasszal, a Rhône-völgye felől érkező déli bukószél (főn) melegíti. A csapadéértékek jól mutatják az Alpok éghajlat befolyásoló szerepét, az északról és délről érkező nedves légtömegeket megfogja, így szárazabb időszakokat eredményez a völgyek területén. A Rhône-völgyben például az éves átlagos csapadékmennyiség mindösszesen $550-700$ mm közé esik (METEOSWISS). Így az Aletsch-gleccser déli gleccservölgyének területén is jellemző a szárazabb éghajlat (BAUMGARTNER, A. et al., 1983). Ezzel szemben az Aletsch-gleccser firngyűjtő területe (Svájc esetében) a legnagyobb évi csapadékmennyiséggel rendelkezik, amely eléri a $2500-3000$ mm-es csapadékot (METEOSWISS).

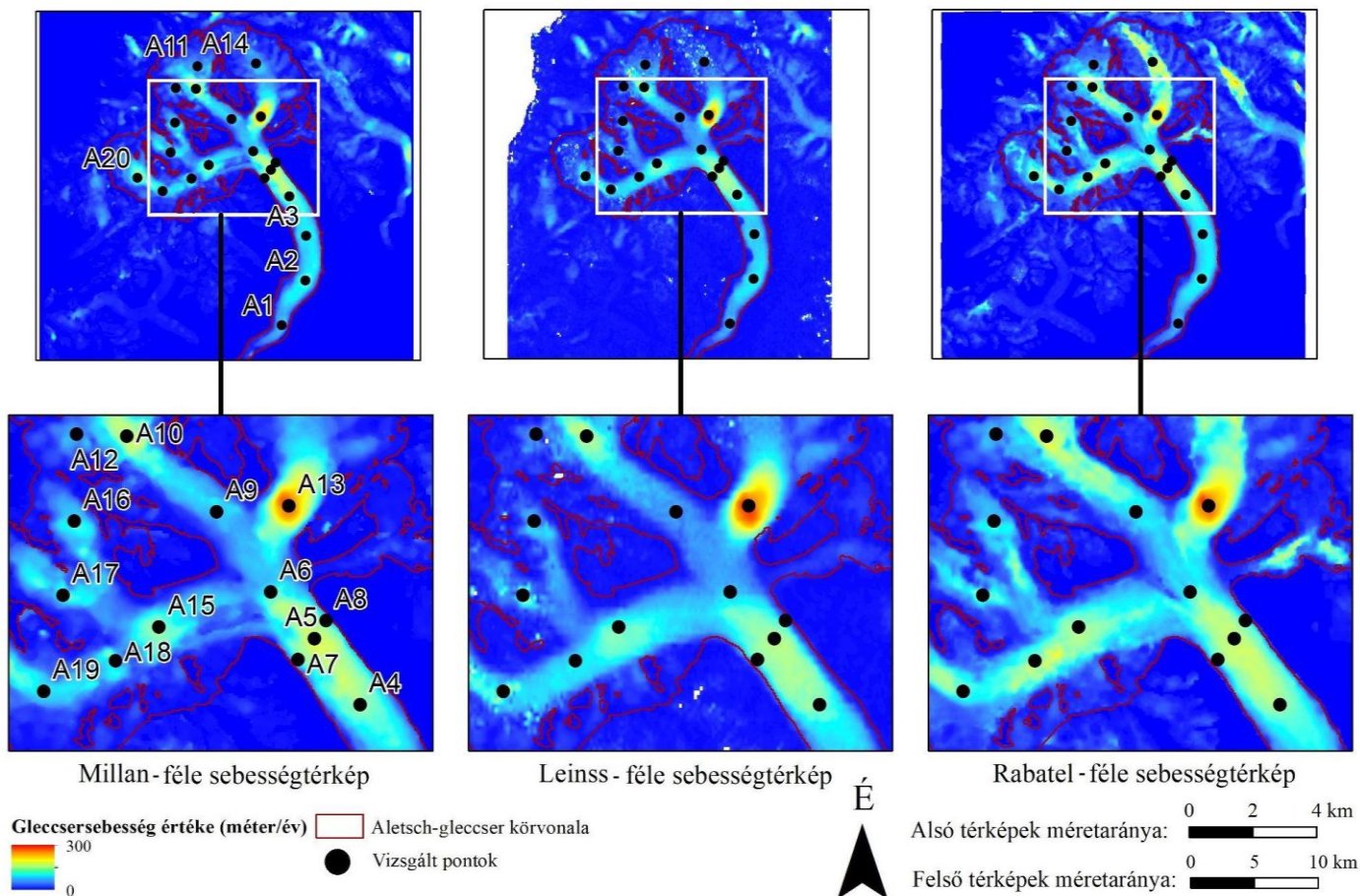


18. ábra. Svájc átlagos évi csapadékösszeg (A) és átlagos évi középhőmérséklet (B) térképe (1991-2020). A barna négyzettel jelölt rész az Aletsch-gleccser területét jelöli. (METEOSWISS adatbázis (<https://www.meteoswiss.admin.ch>) után szerkesztve)

4.3.3. Az Aletsch-gleccser mozgása

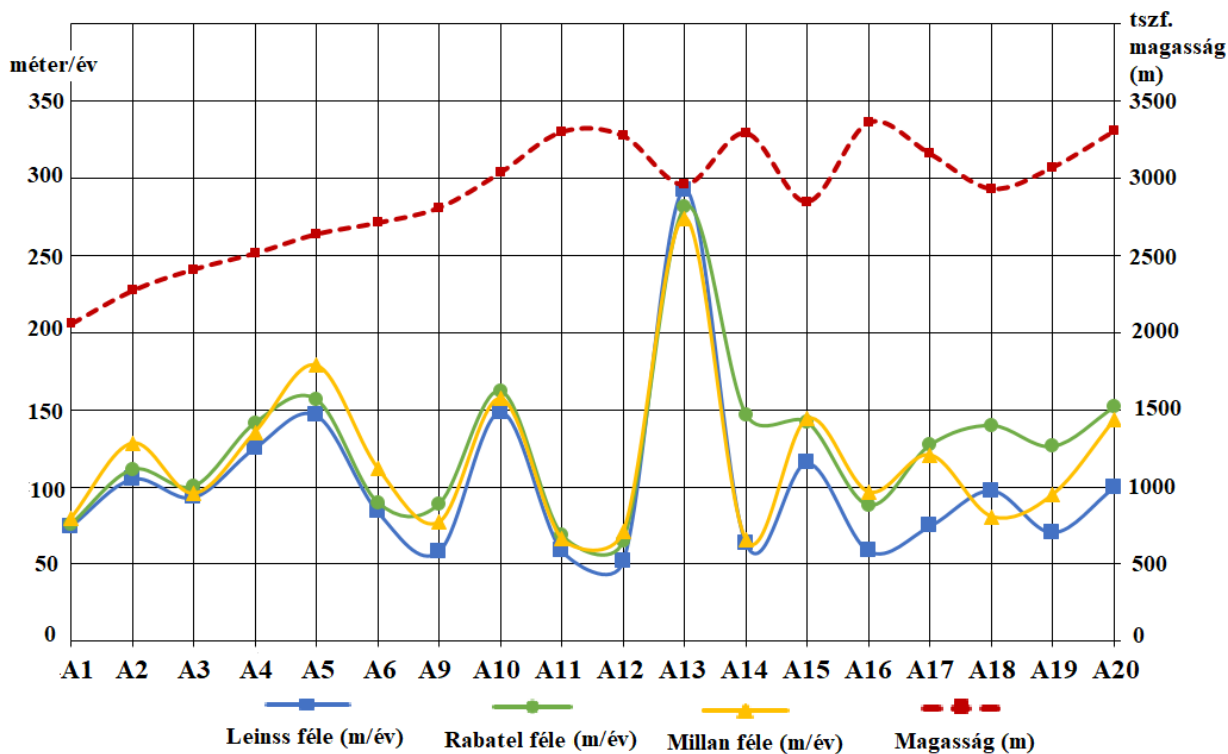
A vizsgált gleccser kiválasztásánál fontos szempont volt, hogy legyenek olyan korábbi sebességmérések, amelyekkel összevethetők az általam használt ITS_LIVE adatbázis sebességi értékei. Az alábbiakban LEINSS, S., BERNHARD, P. (2021); MILLAN, R. et al. (2022) és RABATEL, A. et al. (2023/a) eredményei alapján ismertetem az Aletsch-gleccser mozgásáról szerzett eddigi ismereteinket, melyeket az általam felvett és vizsgált pontok alapján mutatok be. Az általuk alkalmazott módszereket a 3.2.3. *Jégvastagságadatok és Tracking módszerekkel mért sebességadatok* fejezetben részleteztem. Ezen eredményeket a későbbiekben, az **6.3. Korábbi kutatások összehasonlítása az ITS_LIVE adatbázis eredményeivel** fejezetben, az általam használt ITS_LIVE adatbázis eredményeivel is összevetem.

Az Aletsch-gleccser mozgása összességében a kora téli időszakokban sebességcsökkenést, kora tavasszal és nyár elején sebességnövekedést mutat (LEINSS, S., BERNHARD, P. 2021). A sebességtérképek [19. ábra] alapján jellegzetes mintázatot mutat a gleccser dinamikája, amelyet az általam felvett pontokban is megfigyelhetünk [20. ábra]. Az **ablációs zónában**, a gleccser frontjától egészen az ablációs zóna felső pontjáig (A1-A5-ig) a tengerszint feletti magasság növekedésével fokozatosan gyorsul a jég felszíni sebessége (A1 pontban 77 m/év, A5 pontban 161 m/év átlagos sebességgel mozog). Ezzel szemben az **átmeneti zónát** (A6, A9, A10, A13, A15, A18, A19 pontokat) vizsgálva a Konkordiaplatz-on (az A6-os pontban) lassulni kezd a gleccser mozgása, míg a zóna felső szakaszán, az A13-as pontban (mely az Aletsch-gleccser leggyorsabb szakaszán található) a gleccser eléri a leggyorsabb sebességet, mely a három sebességtérkép alapján átlagosan 283 m/évet jelent. Az átmeneti zónán belül további, kisebb sebességnövekedések is megfigyelhetők az A10, A15 és A18 pontokban, összességében tehát elmondható, hogy ebben a zónában tapasztalható a legváltozékonyabb felszíni sebesség (átlagosan 75-283 m/év között változik). Összességében az **akkumulációs zónában** (A11, A12, A14, A16 pontokban) - *a többi ponthoz viszonyítva* - a leglassabb a gleccser mozgása, azonban az A17 és A20-as pontokban megfigyelhető sebességnövekedés is.



19. ábra. Az Aletsch-gleccser sebességtérképei korábbi kutatási eredmények alapján. A fekete pontok jelölik a vizsgált pontok helyét. (MILLAN, R. et al. (2021); LEINSS, S. (2021); RABATEL, A. et al. (2023/b) adatbázisai alapján szerkesztve)

Ha együttesen vizsgáljuk a Millan-, Leinss- és Rabatel-féle eredményeket, akkor hasonló sebességmintázat figyelhető meg, tehát például a leggyorsabb és leghalványabb területek nagy átfedéssel ugyanott jelentkeznek. Ugyanakkor a gleccser néhány területén jelentős eltérések is láthatók, néhol eltérő mintázat és nagyobb sebességkülönbség jellemző. Ez leginkább az **akkumulációs zóna** és környékén mutatkozik meg. Például ha a Rabatel-féle térkép eredményét összehasonlítjuk az A14-es pontban a másik két eredménnyel (Millan- és Leinss-féle térképek) jelentős különbséget figyelhetünk meg [19. és 20. ábra]. Míg előbbi esetén 147 m/éves sebességet látunk, addig a másik kettő majdnem 100 méter/évvel lassabbnak mutatja a gleccser mozgását ebben a pontban. Hasonló eltéréseket figyelhetünk meg továbbá az A17-A18-A19-A20 pontok sebessége esetén is.



20. ábra. Az Aletsch-gleccseren általam felvett és vizsgált pontok (A1-A20) tengerszint feletti magassága (SRTM térkép alapján; FARR, T.G., KOBRICK, M. 2000) és sebessége. (MILLAN, R. et al. (2021); LEINSS, S. (2021); RABATEL, A. et al. (2023/b) adatbázisok alapján)

A három adatbázis alapján tapasztalt sebesség különbségek az Aletsch-gleccseren az alkalmazott módszerek korlátaival lehetnek összefüggésben. MILLAN, R. et al. (2022) Tracking módszerekkel radaros és optikai műholdfelvételekből készített sebességtérképeket számoltak, az Aletsch-gleccser területén Feature Tracking módszert használtak a detektálható objektumok sokasága miatt. RABATEL, A. et al. (2023/a) kutatásukban Feature Tracking módszert alkalmaztak, melynek sikeressége például a felszíni formák láthatóságától függ. Ezt nagyban befolyásolja a fokozott felhőborítottság vagy a hótakarás, amely a magasabban fekvő területeken akár állandó is lehet (kb. az ELA feletti területen). Ez lehet egy magyarázat az A14-es pontban tapasztalt drasztikus eltérésre Leinss és Millan sebességeihez képest, mely jóval a hóhatár felett helyezkedik el. Továbbá a pont környékének hóval nem fedett részeit is kevés terepi objektum (pl. gleccserhasadék) jellemzi, mely tovább nehezíti a Feature Tracking működését. LEINSS, S., BERNHARD, P. (2021) eredményei Speckle Tracking módszer felhasználásával készültek, melynek érzékenysége a nyári, áprilistól szeptemberig tartó időszak

bizonytalanságban mutatkozik meg. Eredményeik hibája a 10 méter/éves értéket is elérheti ebben az időszakban, szemben a megbízhatóbb téli időszakokkal. Így az általuk mért sebességek éppen a magasabban fekvő, hidegebb területeken és a téli, akár folytonos hóborítással járó időszakokra mutatnak megbízható sebességet.

Az Aletsch-gleccser sebességének általános jellemzése mellett fontos megemlíteni egy 2016-os eseményt, amikor a gleccsornyelv alsó szakaszának keleti oldalán található Moosfluh területén egy nagyobb földcsuszamlás ment végbe. Ennek háttérében a Kis jégkorszakot követő lassú felmelegedés következtében fellépő jégolvadás áll (KOS, A. et al. 2016). A 2016-os földcsuszamlás egy lejtő reakció következtében ment végbe, amikor is a jégvastagsága annyira lecsökkent, hogy destabilizálta a völgyfalat, amit mindaddig a gleccserjég támasztott meg (KOS, A. et al. 2016). STORNI, E. et al. (2020) publikációjukban kimutatták a 2018-as vizsgált adatokból, hogy nem csak a gleccser visszahúzódása van hatással a sziklaomlásokra, hanem a földcsuszamlás is befolyásolja a gleccser mozgásának irányát. A gleccsornyelv alsó szakaszán jellemzően délnyugati irányú mozgás megy végbe, viszont a törmeléklető szakaszában a gleccser elmozdul nyugati irányba. Ez a mozgásváltozás átmenetet képez a völgyoldal északnyugati és a gleccser délnyugati mozgása között (STORNI, E. et al. 2020). Ezentúl a drónfelvételek keresztkorrelációján alapuló módszerükkel megvizsgálták a törmeléklető és a gleccser Moosfluh környéki területének sebességét, amellyel alátámasztották KOS, A. et al. (2016) eredményeit, hogy ahol vékonyabb a gleccser ott gyorsabban mozog a törmeléklető, ahol vastagabb, ott lassabban mozog. A két mozgási energia (a gleccser és a völgyfal által kifejtett energia) hatással vannak egymásra, tehát a jég vastagságának csökkenésével a völgyfalra ható jég támasztó ereje is csökken (STORNI, E. et al. 2020). Mindezek alapján érzékelhető az Aletsch-gleccser rendkívül összetett és változatos mozgása, melyet számos, a kutatók által a mai napig nem teljesen tisztázott folyamatok is befolyásolnak.

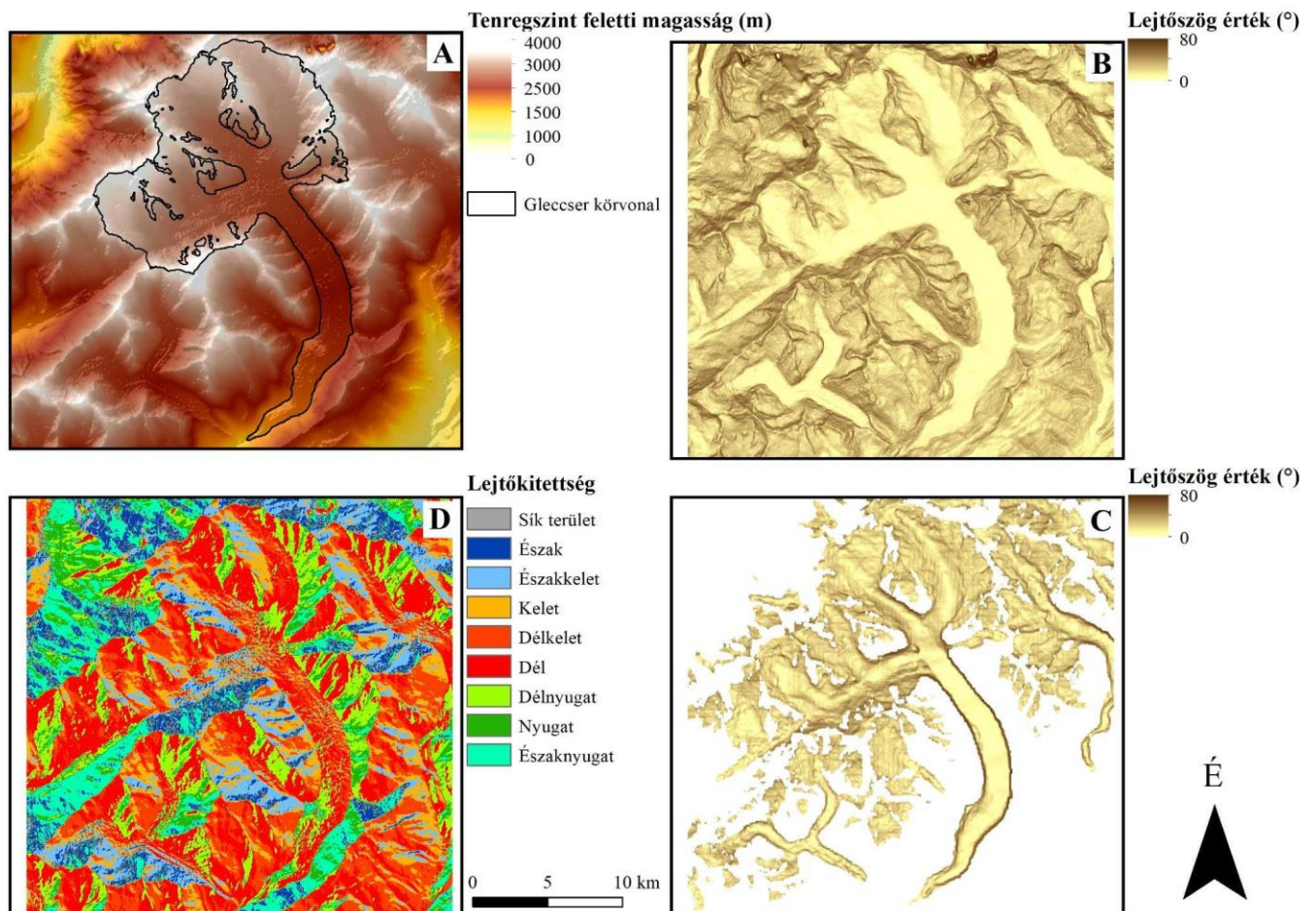
5. Eredmények

5.1. Domborzatmodell alapú területi kiértékelés

Az Aletsch-gleccser mozgását erősen befolyásolhatják a domborzati paraméterek, amelyek magyarázatot adhatnak egy-egy kiugró sebességértékre. Ahhoz, hogy vizsgálhassam a domborzati viszonyok és a sebesség összefüggését, SRTM domborzatmodell alapján tanulmányoztam a gleccser magassági viszonyait és előállítottam a terület lejtőszög- és lejtőkitettség-térképét. Továbbá a jégvastagsági adatok felhasználásával (kivonva a jégvastagságot a terület magasságából) előállítottam a gleccseraljzat lejtőszög-térképét is [21. ábra]. A domborzati viszonyokat a három vizsgálati (akkumulációs, átmeneti és ablációs) zónában és a vizsgált (A1-A20) pontok helyén elemeztem.

Az Aletsch-gleccser 2519 méteres szintkülönbséggel és jellegzetes déli-délkeleties kitétségű jégfelszínnel rendelkezik. A jégfelszín lejtőszög értékeit 5-19°-os, míg a gleccseraljzat lejtőszög értékeit 20-26°-os lejtés jellemzi.

A három - *akkumulációs, ablációs és átmeneti* - zóna, melyek alapján a következőkben ismertetem a gleccser domborzati viszonyait, az egész gleccser területének 52%, 19% és 28%-át fedik le. A gleccser legmagasabb pontja (4108 méter) és legnagyobb lejtőszögű területe (72°) is az *akkumulációs zónában* található. Ezt a zónát átlagosan 19°-os lejtés és délies kitétség jellemzi, a gleccseraljzat valamelyest meredekebb, 25°-os lejtőkkel tarkított. A zónában felvett pontok mindegyike 3000 méter felett helyezkedik el, irányultságuk keleti-délkeleti, lejtőszög értékeik a zóna átlagához hasonlóan alakulnak [2. és 3. táblázat].



21. ábra. Az Aletsch-gleccser topográfiai vizsgálata SRTM alapú (FARR, T.G., KOBRICK, M. 2000) *domborzatmodell felhasználásával*. A gleccser és környezetének domborzata (A); lejtőszögtérképe (B); gleccseraljzatának lejtőszögtérképe (C); és lejtőkítettség-térképe (D).

Az *ablációs zóna* a legnagyobb, 1088 méter szintkülönbséggel rendelkező, 1589 és 2677 méteres magasságok között fekvő terület. Jellemzően délies kitérésű, zömében 5°-os lejtésű, a legmeredekebb lejtő is csak a 33°-ot éri el. A zónában felvett pontok közül az A5 pont lejtőszög értéke a legnagyobb (8°), míg a szomszédságában fekvő A4 ponté a legkisebb (2°). A zóna gleccseraljzatának átlagos lejtőszöge 20°, mely a többi zónához képest a legkisebb. A felvett pontokban a gleccseraljzat lejtőszöge 6-7°-os értékeket ér el, kivéve a körvonálhoz közeli A7 és A8 pontokban, ahol meredekebb a gleccseraljzat lejtőszöge, 11° és 68°-ot is elér [2. és 3. táblázat].

Az *átmeneti zóna* a legkisebb, 571 méteres szintkülönbséggel rendelkezik. Átlagosan délkeleties kitérésű, 9°-os felszíni lejtők és 26°-os gleccseraljzat meredekség

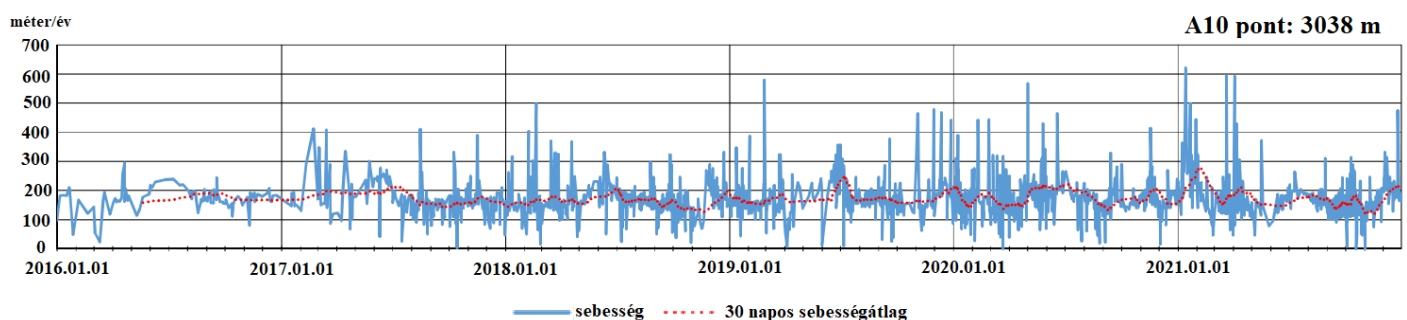
jellemzi a területet. Az A13 és A10 pontokban az átlagnál meredekebb a lejtés, 12°-ot is elér, ezzel szemben az A9 pont egy enyhe, 2°-os lejtőn helyezkedik el. Fontos megjegyezni, hogy a három zóna közül itt a legváltozatosabb a lejtőkiettség, például az A18 és A15 pont északkeleties, az A13 pont délnyugatias és az A19 pont délkeleties kiettséget mutat [2. és 3. táblázat].

5.2. Az Aletsch-gleccser sebességének vizsgálata

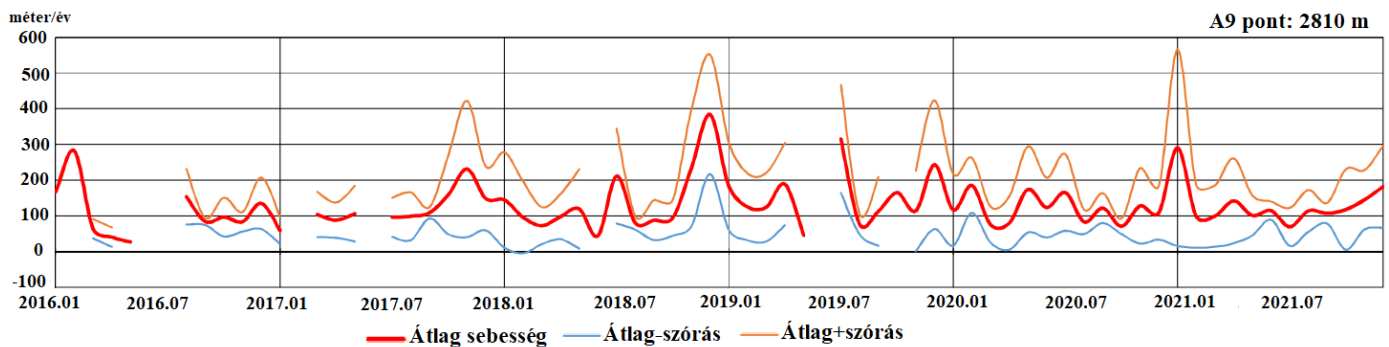
5.2.1. Vizsgálati időszak

Az Aletsch-gleccser sebességét a 2016-2021-es időszakban vizsgáltam, az általam használt ITS_LIVE adatbázisban (<https://itslive-dashboard.labs.nsidc.org/>) elérhető leghosszabb időtávon. A hat évet lefedő adatsor egy-egy rövidebb ideig tartó környezeti hatás kimutatásának lehetőségét is magában rejti. A vizsgálati időszakra rendelkezésre álló, maximum 60 napos eltéréssel készült, keresztkorrelált műholdfelvételek sebességi értékeit elemeztem, az átlagos időkülönbség az összehasonlított műholdfelvételek között 25 nap volt.

Az előállított adatbázisban megfigyelhető, hogy az idő előrehaladtával egyre több adat áll rendelkezésre 2016-tól 2021-ig [22. ábra]. Néhány vizsgált pontban a 2016-os időszak során megfigyelhető adathiány, ami növelheti a statisztika pontatlanságát. Fontos az adatok szórását is megemlíteni, amely a vizsgált időszakban a sebességhez hasonlóan változékonyan alakul [23. ábra].



22. ábra. Az idő előrehaladtával megfigyelhető növekvő adatsűrűség az Aletsch-gleccser A10-es pontjában mért sebességértékek példájában (2016-2021).



23. ábra. Az Aletsch-gleccser A9-es pontjának átlagos sebessége és annak szórása az átlag mínusz szórás és átlag plusz szórás megjelenítésével (2016-2019).

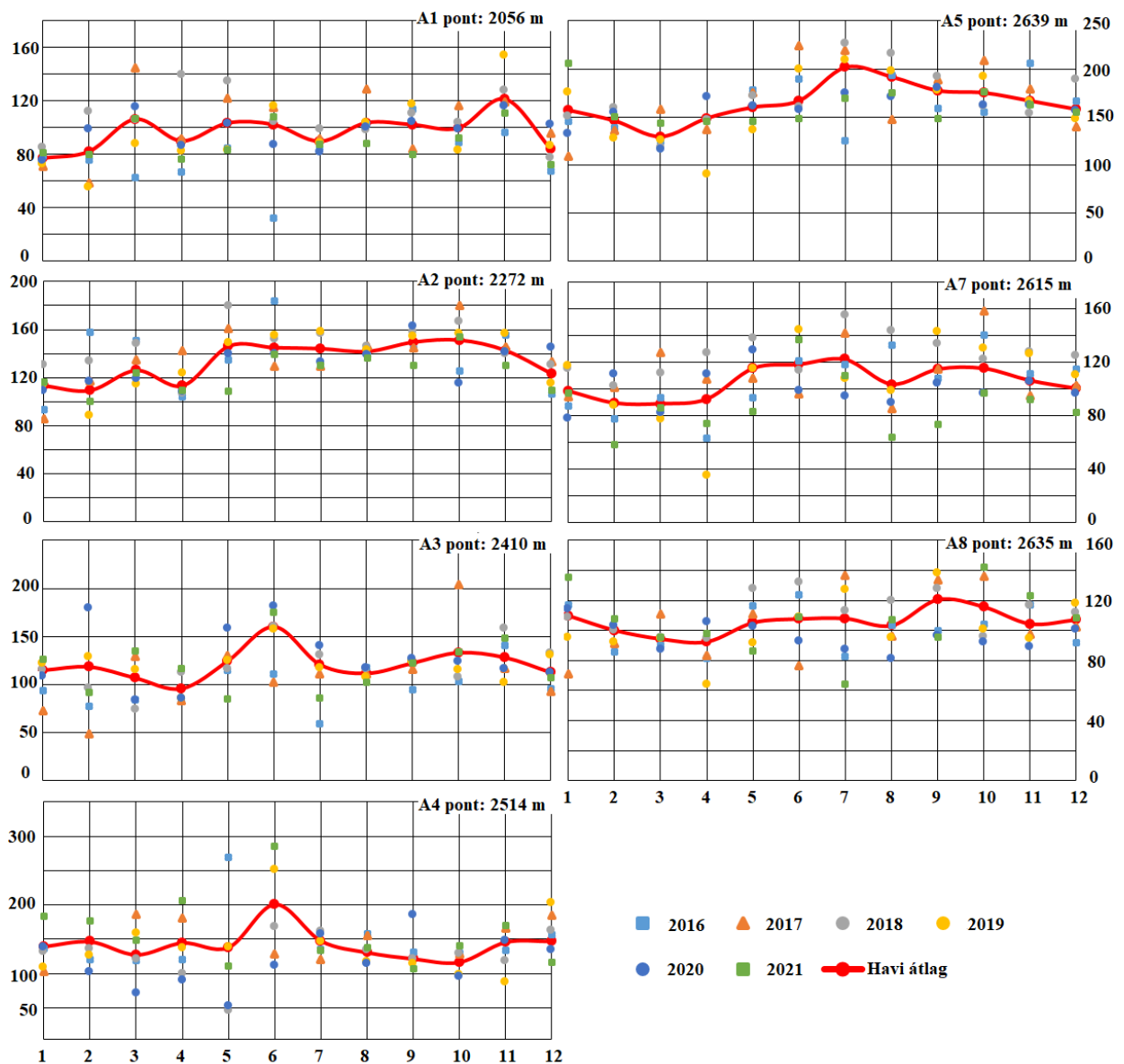
5.2.2. Mért sebességek

A sebesség kiértékelését a zónák szerint részletezem (a 3.3. *Adatok kiértékelése* fejezetben tárgyalt zónák felosztása alapján), és az egyes zónákon belül elemzem a pontokban mért sebességeket egyesével is. A kiértékelés során a gleccser pontjában mért sebesség éves változását vizsgáltam 2016-2021 időszakban.

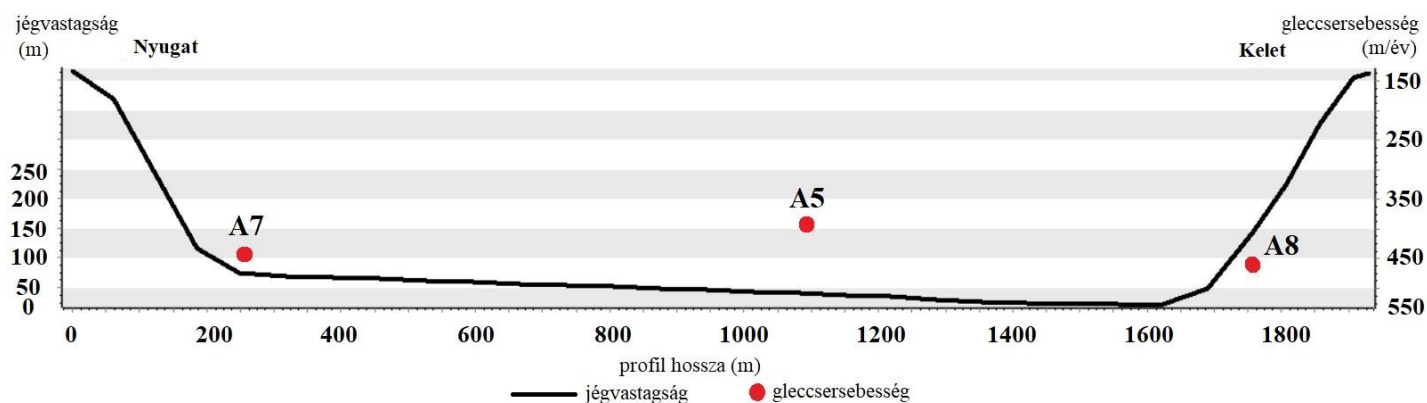
Az **ablációs zónában** elhelyezkedő pontok [24. ábra] esetén elmondható, hogy a mért átlagos sebesség fokozatos növekedést mutat, ahogy a tengerszint feletti magasság is emelkedik. Megfigyelhető továbbá az A1 és A2 pontokban jelentkező késő őszi - kora téli sebességmaximum, amit jellemzően egy hirtelen sebességcsökkenés követ. Majd márciusban ismét sebességnövekedés tapasztalható, amit májustól kezdve közel konstans sebesség vált. Ahogy haladunk a magasabban fekvő pontok irányába (A3-A5), úgy tolódik későbbre időben is a sebességmaximum jelentkezése. A gleccsornyelv felső szakaszán markánsabb júniusi-júliusi sebességmaximumok jellemzőek, amit szintén egy hirtelen sebességcsökkenés követ szeptember-októberig. Majd október-novemberben újra sebességnövekedés jellemző (kivéve az A5 pontban), végül márciusban szintén visszaesik a sebesség mértéke. Mindezek alapján elmondható, hogy az évszakos sebességváltozás igen jellemző a területre.

A gleccser sodorvonala mentén felvett pontok sebességének vizsgálata mellett a gleccsornyelv felső szakaszán, az ablációs zónában felvettem további két pontot az A5 pont és a befoglaló völgyfalak között mindkét irányba, hogy a sebességet

keresztmetszetben is elemezhessem. Az A7 és A8 pontok a nyugati és keleti völgyfalhoz közel helyezkednek el, a gleccser sebessége valamelyest lassabb itt, mint a sodorvonal mentén. A 20. ábra szemlélteti a jégvastagságot a három pontra (A7-A5-A8) fektetett vonal mentén és a három pont helyzetét és átlagsebességét a vizsgálati időszakra. Mindez alapján jól látható, hogy a völgyfalhoz közelebb, a jég vékonyodásával a sebessége is csökken a gleccsernek [25. ábra].

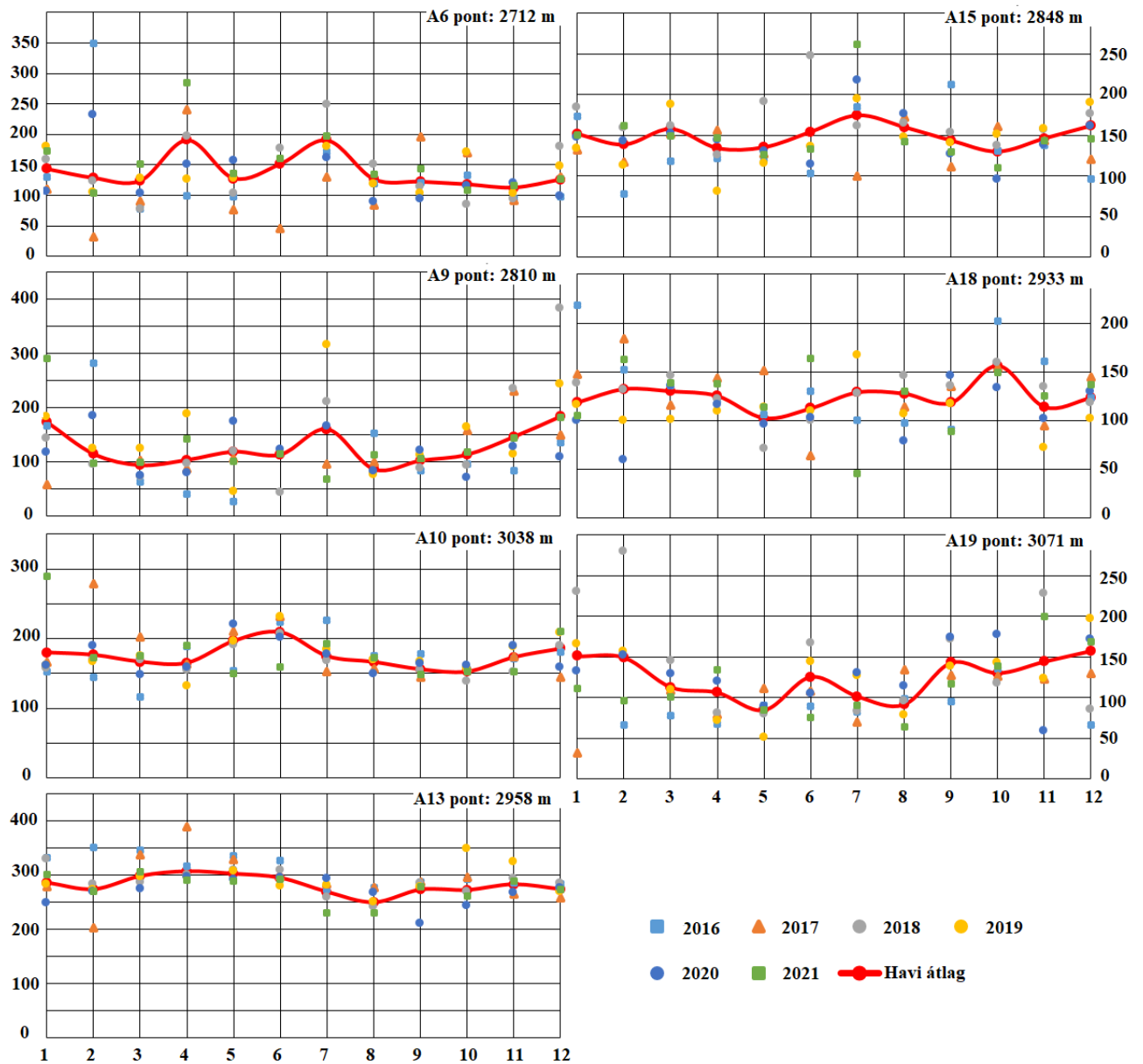


24. ábra. Pontokban vizsgált havi átlagsebességek éves összehasonlítása az Aletsch-gleccser ablációs zónájában (2016-2021). A függőleges tengely a sebességet jelöli (méter/év), a vízszintes tengely a hónapokat (januártól decemberig).



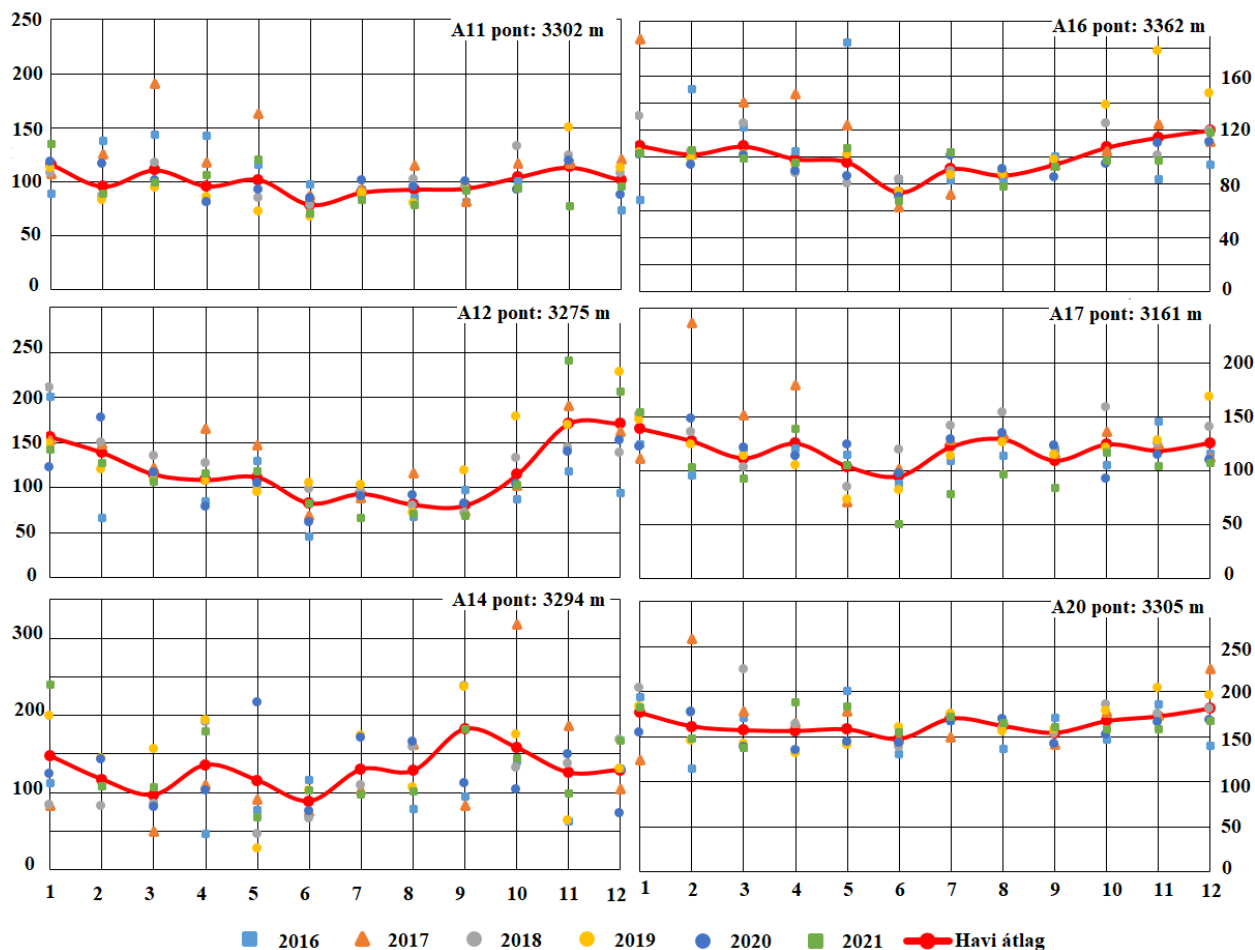
25. ábra. A7-A5-A8 pont hat éves átlagsebességeinek és keresztmetszeti profilban vizsgált jégvastagság változásának összevetése. A jégvastagsági adatok MILLAN, R. et al. (2021) adatbázisa alapján szerkesztve.

A három zónán belül az **átmeneti zóna** [26. ábra] bizonyult a legdinamikusabbnak mozgását tekintve, itt található többek között a gleccser leggyorsabban mozgó szakasza az általam vizsgált pontok és korábbi publikációk alapján is (PRATS, P. et al. 2009; LEINSS, S., BERNHARD, P. 2021). A felvett A13-as pont – mely ezen a szakaszon helyezkedik el - elérte a 285 m/év átlagsebességet is, ezzel a vizsgált időszak leggyorsabb mozgását produkálva. Ezen a ponton alapvetően fokozatosan, egyenletesen változik az éves sebesség, kiugró értékek nem figyelhetők meg. Tavasszal-nyáron gyorsabb a gleccser mozgása, mint télen, majd augusztusban visszaesik a sebessége. Az A6-os pontban, ahol a kárfülkéből kilépő gleccserjég találkozik, kettős sebességmaximum jellemző, egy áprilisban és egy júliusban, míg az év többi időszakában nagyjából egyenletes a sebesség ezen a területen. Az A9 és A15 pontban mért sebesség júliusban és decemberben éri el a maximumot, ehhez hasonló mozgás megy végbe az A10-es pontban is, annyi különbséggel, hogy nyáron már hamarabb, júniusban eléri a csúcst. Az A18 és A19-es pontok éves szintű mozgása igen változatosan alakul, több sebességmaximum is megfigyelhető a szeptember-októberi és februári időszakokban.



26. ábra. Pontokban vizsgált havi átlagsebességek éves összehasonlítása az Aletsch-gleccser átmeneti zónájában (2016-2021). A függőleges tengely a sebességet jelöli (méter/év), a vízszintes tengely a hónapokat (januártól decemberig).

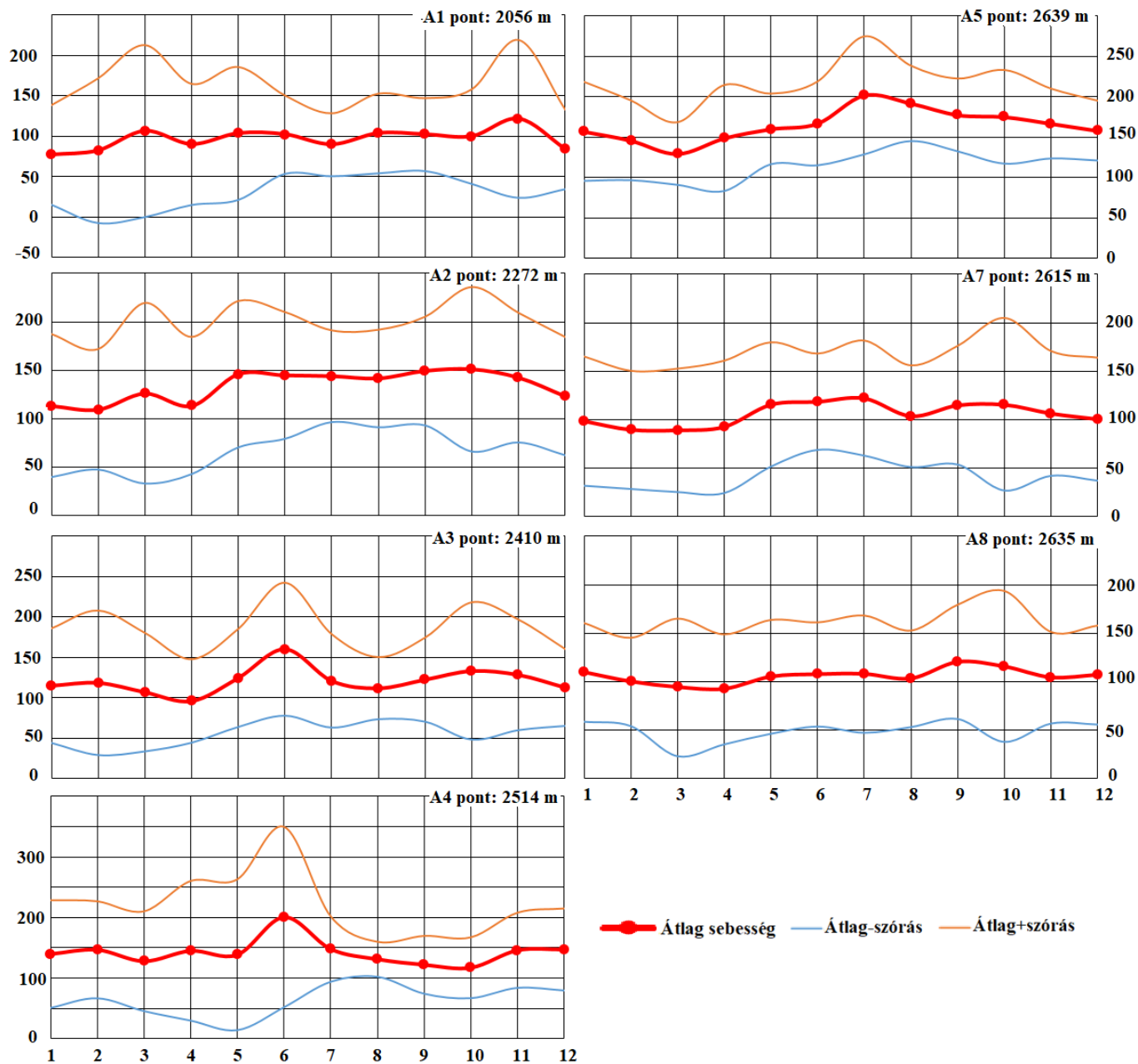
Az **akkumulációs zónában** [27. ábra] felvett pontok igen hasonlóan viselkednek. A gleccser sebessége itt jellemzően decemberben vagy januárban eléri a maximumát, majd kisebb ingadozásokkal, de fokozatosan csökkeni kezd, mígnem júniusban eléri a minimum sebességét. Az A14-es pont kivételt képez ez alól, mely sebességmaximumát szeptemberben éri el.



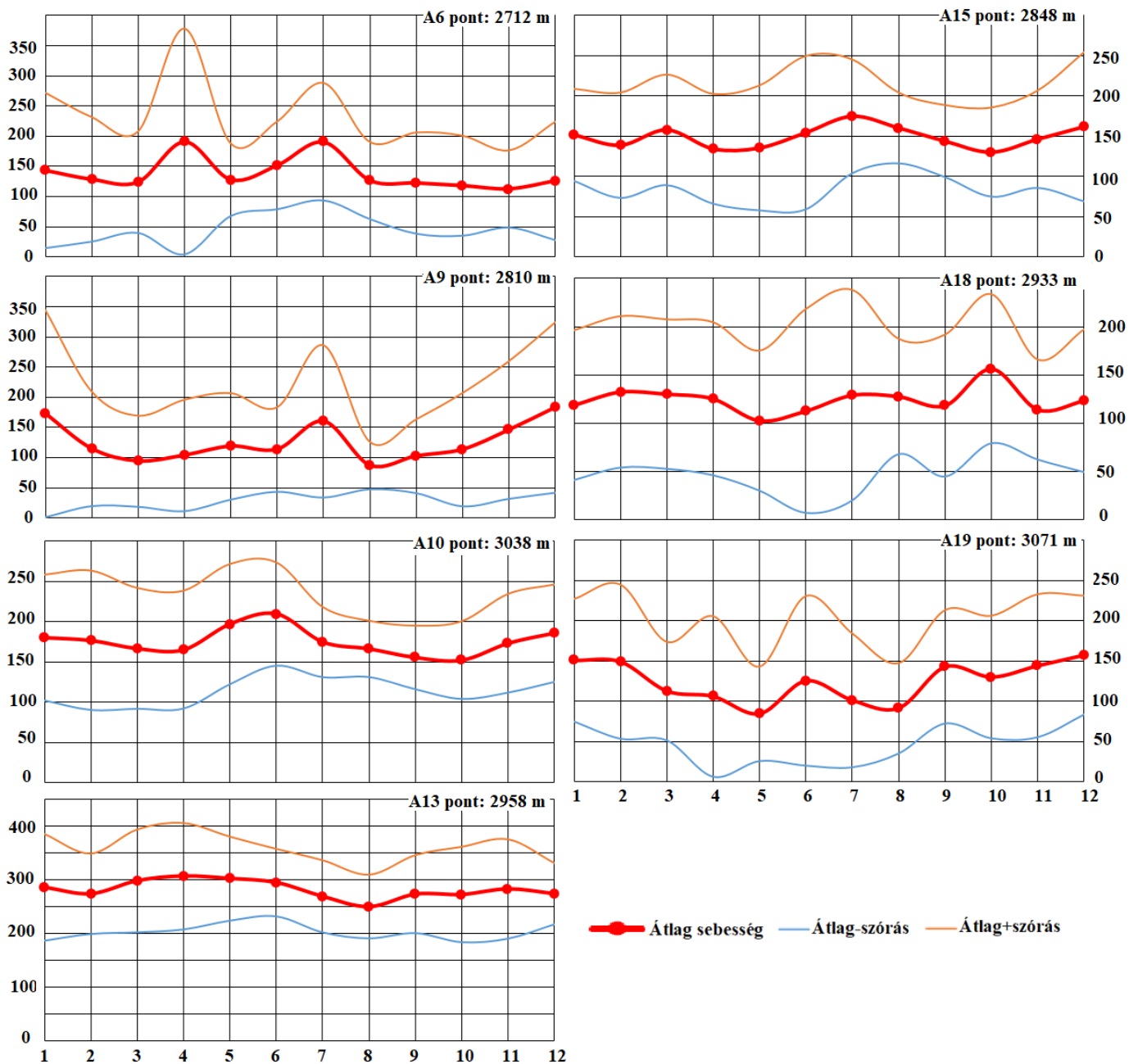
27. ábra. Pontokban vizsgált, havi sebességek éves összehasonlítása az Aletsch-gleccser akkumulációs zónájában (2016-2021). A függőleges tengely a sebességet jelöli (méter/év), a vízszintes tengely a hónapokat (januártól decemberig).

A 25., 26. és 27. ábrákkal jellegzetes havi változékonyságokat mutattam be. Emellett fontos megemlíteni a vizsgált sebességi adatok szórásának az átlagtól való pozitív és negatív irányú eltérését [28., 29., 30. ábra]. A szórás mértéke időben és térben is eltérő az Aletsch-gleccseren. A szórás mértékének változása a sebesség változásával köthető össze, ha nő a gleccser sebessége, akkor nagyobb a szórás mértéke is, ha csökken, akkor kisebb a szórása [például 30. ábra, A14-es pont]. Mindhárom zóna esetén megfigyelhető, hogy a nyári hónapokban amikor a sebesség csökkenést mutat, akkor a legkisebb az adatok szórása. Míg a téli hónapokban felgyorsul a gleccser sebessége és a szórás is nagyobb mértékű. A nyári hónapok kismértékű szórása mögött a Tracking módszer jellegzetessége állhat. A pontokban mért sebességértékek túlnyomó részben

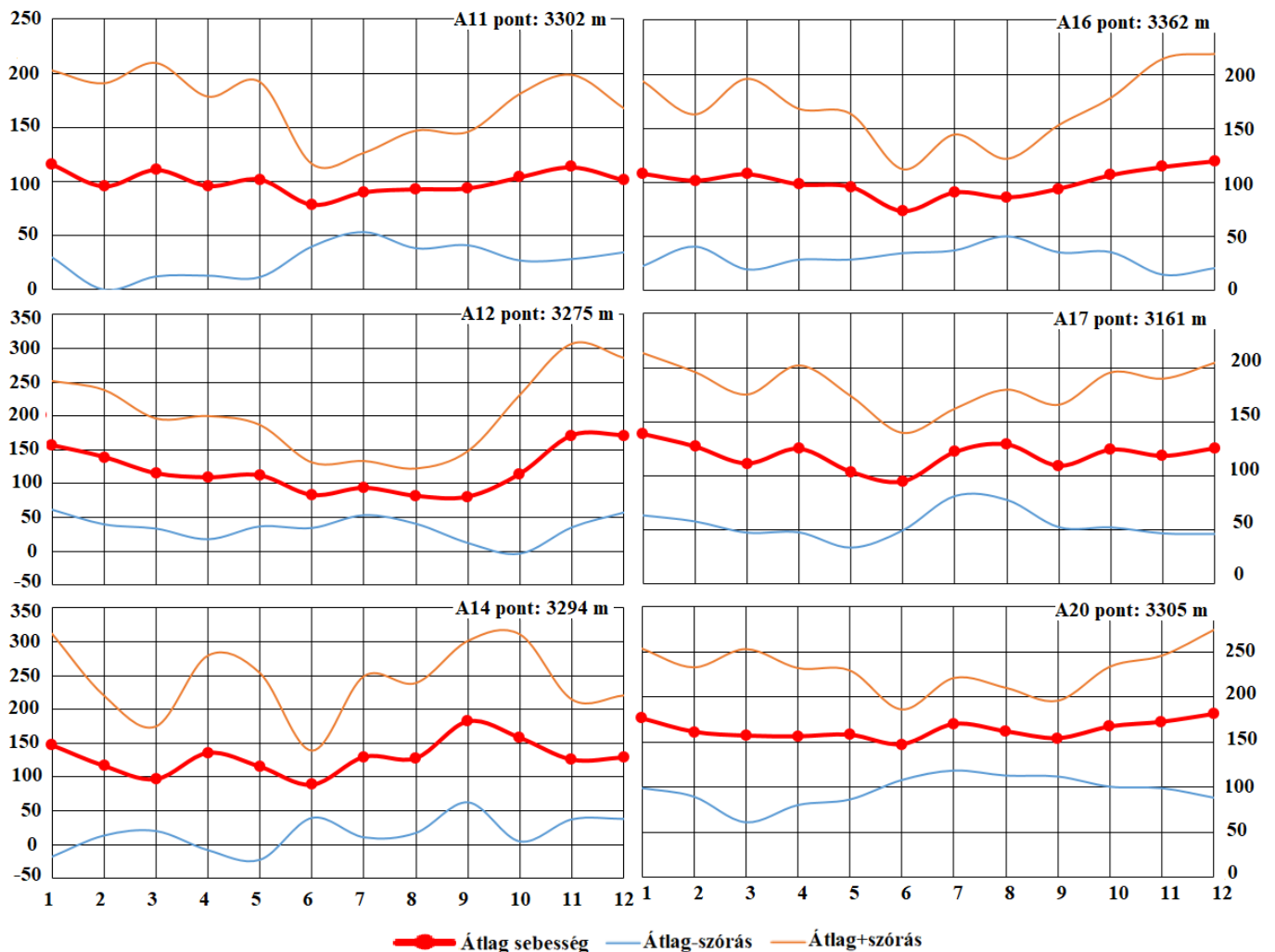
Sentinel-2-es optikai műholdfelvételekből származnak. Elenyésző számban, de Sentinel-1-es radaros műholdképekből generált értékek is jelen voltak a kiértékeléskor. Az Aletsch-gleccser felszíni sebességének számításában meghatározó a jég felszínét tarkító jellegzetes hasadékok és morénaanyag, melyeket az optikai felvétel alapú Feature Tracking módszer segítségével lehet követni. A korábbi szakirodalmakban is ezen módszer segítségével határozták meg a gleccser sebességét, mérete és elhelyezkedése miatt (például MILLAN, R. et al. 2022; RABATEL, A. et al. 2023/a). Ez a módszer azonban a nyári hónapok során lesz megbízhatóbb a gyér hótakarás miatt, ilyenkor ugyanis sokkal több azonosítási pont áll rendelkezésre, mint télen.



28. ábra. Pontokban vizsgált, hat évre átlagolt havi sebességek szórása az Aletsch-gleccser ablációs zónájában (2016-2021). A függőleges tengely a sebességet jelöli (méter/év), a vízszintes tengely a hónapokat (januártól decemberig).



29. ábra. Pontokban vizsgált, hat évre átlagolt havi sebességek szórása az Aletsch-gleccser átmeneti zónájában (2016-2021). A függőleges tengely a sebességet jelöli (méter/év), a vízszintes tengely a hónapokat (januártól decemberig).

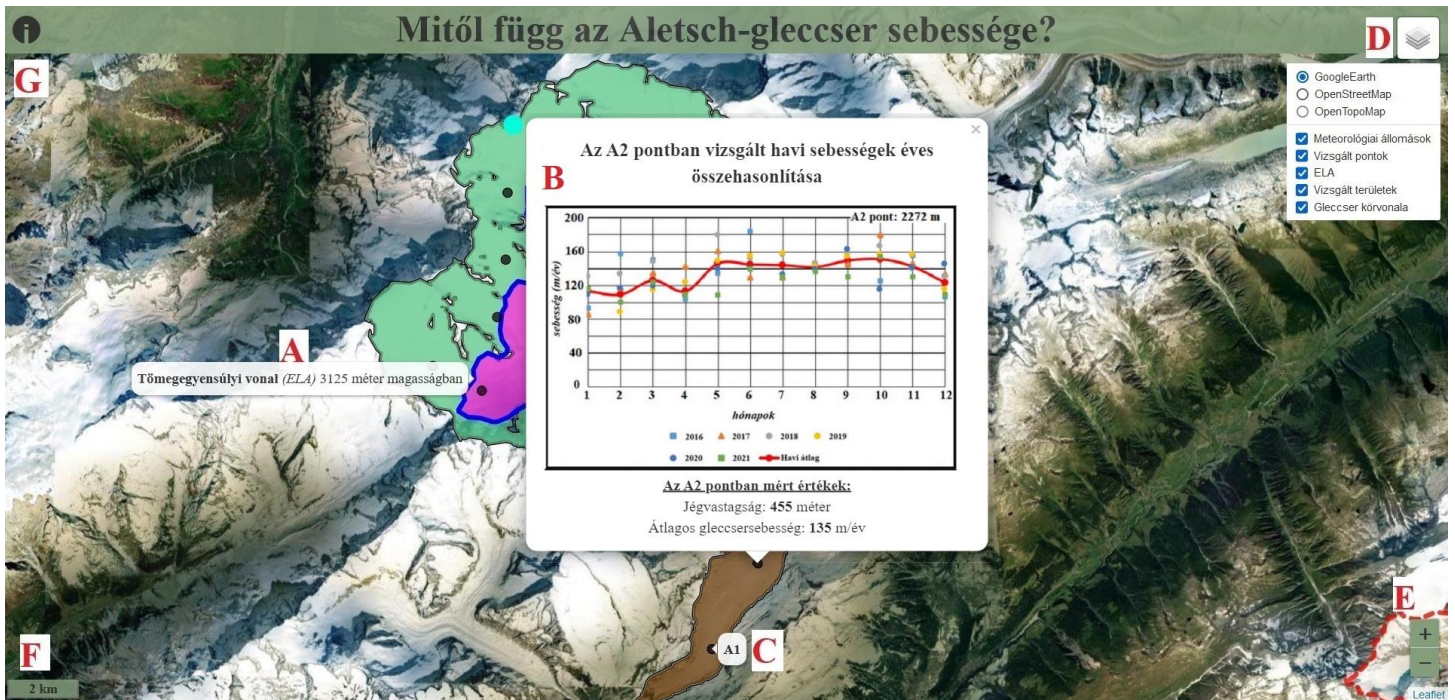


30. ábra. Pontokban vizsgált, hat évre átlagolt havi sebességek szórása az Aletsch-gleccser akkumulációs zónájában (2016-2021). A függőleges tengely a sebességet jelöli (méter/év), a vízszintes tengely a hónapokat (januártól decemberig).

5.3. Webtérkép

Az Aletsch-gleccser sebességének és a sebességet befolyásoló domborzati paraméterek vizuális megjelenítése céljából készítettem egy webtérképet. A térkép ezen a linken érhető el: https://szpetraa.web.elte.hu/diplomamunka/aletsch_gleccser.html. A weblap környezetét HTML programnyelvvvel írtam meg, a megjelenítését CSS programnyelvvvel formáztam. A térkép funkcióit a JavaScript alapú Leaflet (<https://leafletjs.com/>) webkönyvtár függvényeivel valósítottam meg, így a térkép interaktívan használható. A térkép rétegeiben lévő információk egér mozgatására és/vagy

kattintásra felugró ablakokban jelennek meg [31. ábra], amelyek tartalmazzák az Aletsch-gleccser vizsgálatához felvett pontokra kapott eredményeket.



31. ábra. A webtérkép kezelőfelülete és funkciói. A felugró ablakkal (A, B, C) lekérdezhetővé válnak az adatok. A felhasználóbarát kezelés céljából a térképre került méretarány (F), közelítő-távolító gomb (E), rétegkezelő (D) és infógomb (G).

A rétegkezelőben három alaptérkép közül választhat a felhasználó, alapértelmezetten a GoogleEarth műholdkép alapréteggel jelenik meg a webfelület. A pont, poligon és vonalas rétegek ki-bekapcsolással szabályozhatók a térképen (kivéve Svájc országhatárát, mely állandó a térképen). Az infógomb megnyomásával felugró ablak tartalmazza a kutatás rövid leírását, instrukciókat a térkép használatához és a rétegek értelmezéséhez szükséges jelmagyarázatot [32. ábra].



32. ábra. Az infógomb alatt található jelmagyarázat.

A felugró ablakok formájában lekérhető információk a ‘Vizsgált pontok’, ‘Vizsgált területek’, ‘Meteorológiai állomások’ és ‘ELA’ rétegekhez érintve és/vagy kattintva érhetők el. A ‘Vizsgált pontok’ réteg jelöli a sebességméréshez felvett 20 vizsgálati pontot. Ezekre kattintva megjelenik az adott pontban mért, a teljes vizsgálati időszakra vonatkozó átlagsebesség havi bontásban (vastag piros vonal) és az egyes pontok átlagsebessége havi bontásban az adott vizsgálati évre vonatkoztatva (évenként eltérő színű és formájú jelölőkkel) diagram formájában, továbbá az adott pont összesített átlagos sebessége a vizsgálati időszakra és jégvastagsága [31. ábra, B]. A ‘Vizsgált területek’ réteg jelöli a kutatásomban használt ablációs, átmeneti és akkumulációs zónák határát. Ezekre kattintva felugró ablakban megjelennek a zónára jellemző domborzati paraméterek (zóna kitétsége, legmagasabb pont, átlagos tszf. magasság, legalacsonyabb pont, átlagos lejtés, legnagyobb felszíni lejtőszög, gleccseraljzat átlagos lejtőszöge).

Az Aletsch-gleccseren mért adatok webes megjelenítésével - eredményeim vizuális ábrázolásán túl - az is célom volt, hogy felhívjam a figyelmet a gleccserek mozgásának vizsgálatára irányuló kutatások jelentőségére és fontosságára. A webtérképpel szerettem volna népszerűsíteni a témát és ismereteket nyújtani az érdeklődőknek.

6. Diszkusszió és következtetések

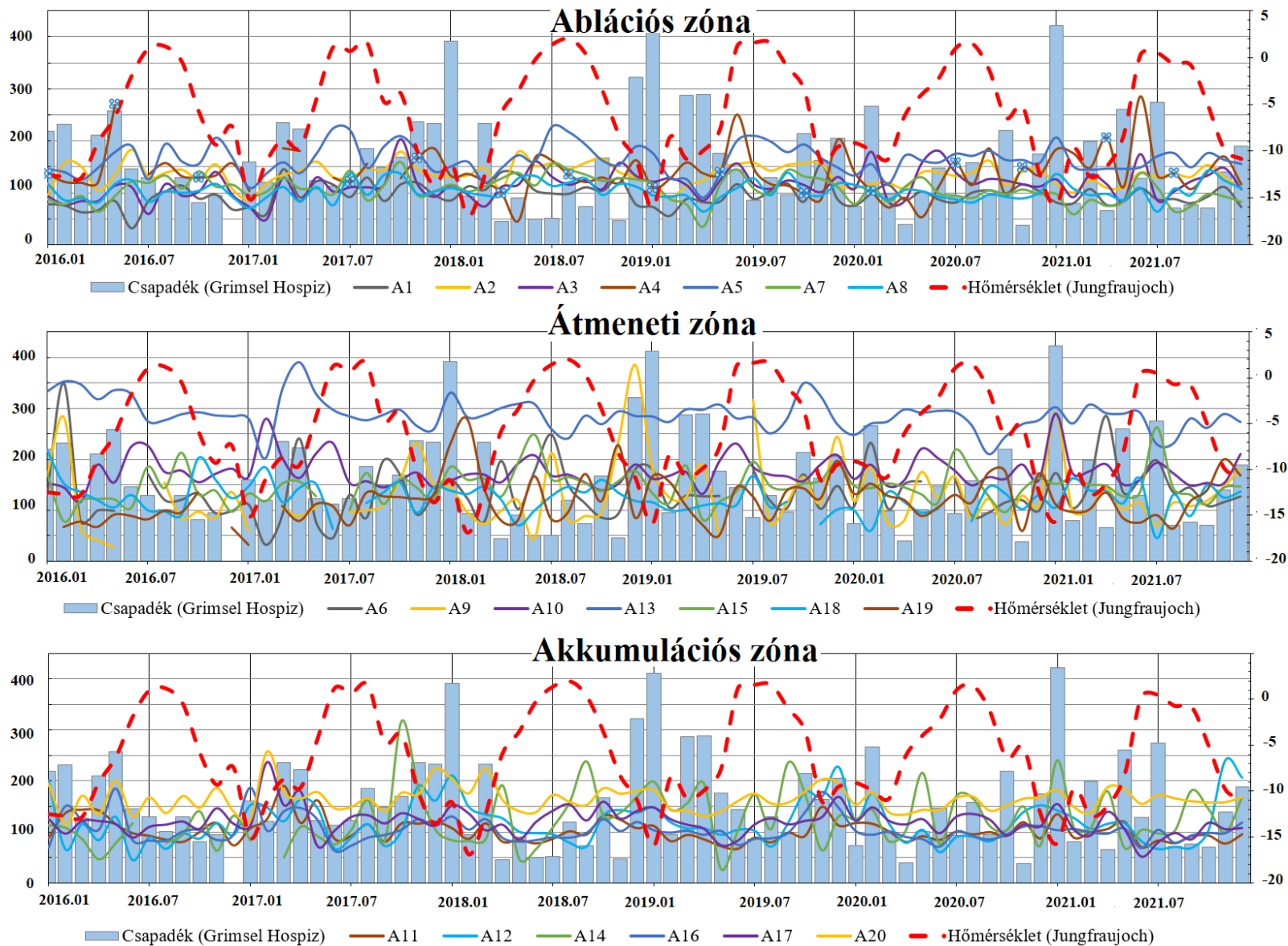
A legutóbbi Svájcra vonatkozó klíma-előrejelzés (CH2018 projekt) alapján 2100-ra az Aletsch-gleccser 60%-a eltűnhet (JOUVET, G., HUSS, M. 2019). Európa legnagyobb gleccsereként fontos szerepet játszik az európai édesvízkészletek jövőjében, így változásának minél pontosabb nyomonkövetése, és az ezek mögött álló okok feltárása elengedhetetlen. Az Aletsch-gleccser mozgását például számos környezeti paraméter - *a hőmérséklet, csapadék, domborzat* - befolyásolja, diplomamunkámban ezek pontosabb megértését tűztem ki célul. Az ITS_LIVE adatbázis alapján kapott gleccser sebességi értékeket így összevettem a terület csapadék és hőmérséklet adataival, továbbá a jég felszínének és a gleccseraljzat lejtőszögének értékeivel is. A tapasztalt sebességet értelmeztem az adott pontokban a tengerszint feletti magasság és jégvastagság függvényében is. Habár az ITS_LIVE adatbázisban szereplő sebességeket még nem vizsgálták az Aletsch-gleccser területén, korábbi kutatások már foglalkoztak ezzel a témával. Fontosnak tartottam összehasonlítani az általam mért sebességi értékeket a korábbi kutatások eredményeivel, hogy az alkalmazott módszer megbízhatóságát vizsgálhassam.

6.1. Az éghajlati tényezők és a sebesség összefüggései

Eredményeim alapján elmondható, hogy az Aletsch-gleccser sebességére - *a hatévnyi vizsgálati időszak alatt* - hatást gyakoroltak az éghajlati paraméterek (csapadékmennyiség és hőmérséklet) változásai. Mindazonáltal mozgásának szezonális felgyorsulásában a gleccsert meghatározó délies kitettség is szerepet játszhat, mely elősegíti a jég olvadását, így növeli az olvadékvíz mennyiségét a rendszerben. Az így kialakuló szubglaciális vízhalózat jelentős hatást gyakorolhat a gleccser mozgására.

A vizsgált terület hőmérsékletét minden évben meghatározza a kora tavasszal kezdődő felmelegedés, mely nyár közepén - *július, augusztus táján*- éri el maximumát. E jelenséget a dél felől érkező fónszél okozza, mely felmelegíti a Rhône-völgyét (METEOSWISS) és még a magasabban fekvő, az Aletsch-gleccser ablációs zónájának éghajlatára is hatást gyakorolhat [33. ábra]. Mindezt alátámasztja az **ablációs zónában**

megfigyelhető, kora tavasszal kezdődő sebesség növekedése a gleccseren, mely a hőmérséklet téli visszaesésével lelassul. Feltételezhető, hogy ezt a folyamatot a jég olvadásából keletkező szubglaciális vízhálózat kialakulása okozza az Aletsch-gleccseren. DAVISON, B.J. et al. (2019)-es munkájának köszönhetően tudjuk, hogy a melegebb idő hatására a kezdeti olvadási időszakban (mely ezen a területen kora tavaszra tehető) a gleccser olvadékvize elkezd gyarapodni, majd a gleccsermalmokon és hasadékokon keresztül leszivárog az aljzatra, fejletlen csatornarendszerek formájában pedig átmedvesíti az egész aljzatot. Ekkor az átmedvesedett aljzat és a magas nyomás hatására megnő a gleccser sebessége (DAVISON, B.J. et al. 2019). Ez a mozgást befolyásoló folyamat jellemzően az ablációs területen alakul ki és időben éppen egybe esik az itt jelentkező kora tavaszi sebesség növekedésével. Az ablációs zónánál jóval magasabban elhelyezkedő **akkumulációs zónában** ezzel ellentétesen alakul a gleccser sebessége, feltételezhetően a tavasszal érkező főnszél melegítő hatása eddig már nem ér fel. A tavaszi 0 °C közeli hőmérséklet mellett itt kevesebb olvadékvíz keletkezhet. Mivel a gleccser ezen szakasza vastagabb jégborítottsággal rendelkezik, feltételezhető, hogy az egyébként is kevesebb olvadékvíz nem tud leszivárogni a gleccser aljzatáig, így a szubglaciális vízhálózat kezdeti olvadási szakaszában jelentkező növekvő sebesség nem tapasztalható. Ellenben télen a hőmérséklet csökkenésével és a csapadék növekedésével fokozatos gyorsulást mutat a gleccser, ami összefüggésben állhat a téli hófelhalmozódással, mely növeli a gleccser tömegét, ezáltal fokozhatja mozgási sebességét, hogy a gleccser tömegegyensúlya helyreálljon. Az **átmeneti zónában** változatos mozgás mutatkozik, a sebesség gyorsulása kettős csúcsot mutat. Először a téli időszak kezdetén jelentkező hőmérséklet csökkenése és csapadékmennyiség emelkedése mellett figyelhetünk meg gyorsulást, majd a kora tavasszal bekövetkező növekvő hőmérséklet hatására is fokozódik a gleccser sebessége. A legmelegebb, nyár közepi időszakban visszaesik a gleccser sebessége. Ez a változatoság az átmeneti - *akkumulációs és ablációs zóna közötti* - elhelyezkedéséből eredhet. Feltételezhető, hogy az olvadékvízhálózat kezdeti fejlődési szakasza során átmedvesített gleccseraljzat hatással lehet a tavaszi sebességnövekedésre. Továbbá a téli időszak hófelhalmozódási szakaszából eredő tömegegyensúly helyreállításáért felelős mozgások is szerepet játszhatnak a sebesség gyorsulásában.

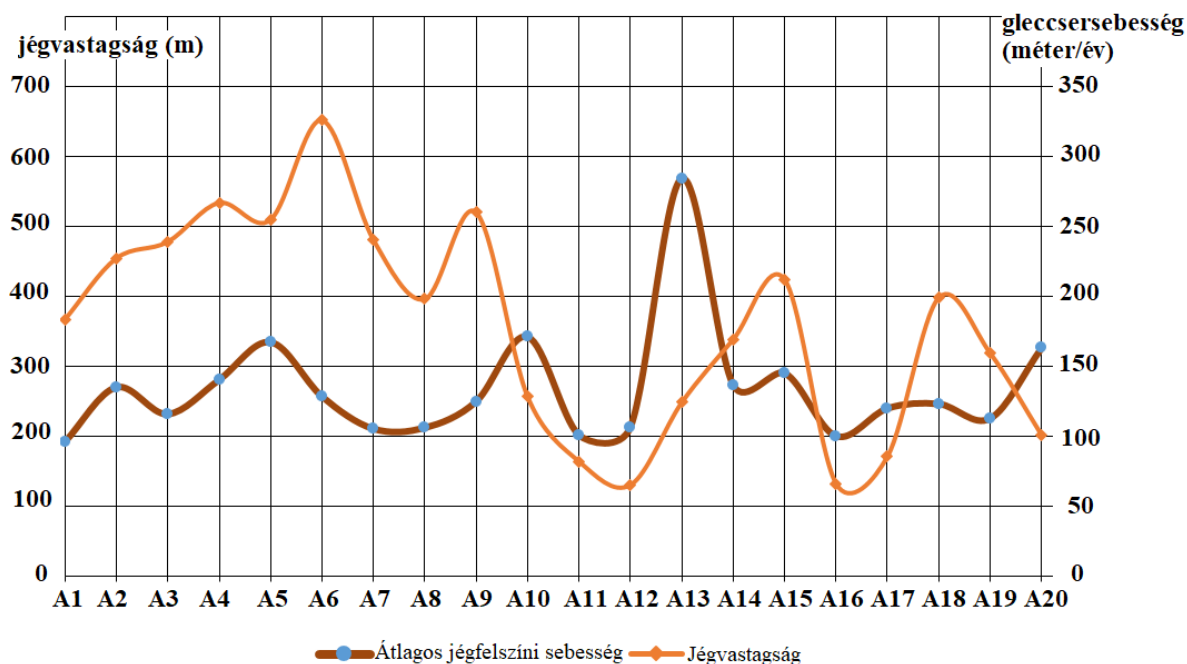


33. ábra. A három zóna pontokban mért havi átlagsebességének összehasonlítása a hőmérsékleti és csapadékadatokkal (METEOSWISS adatbázis alapján). A baloldali y tengely a havi csapadékösszeget (mm) és a gleccsersebességet (m/év), a jobboldali y tengely a havi átlagos hőmérsékletet (°C) jelöli.

6.2. Domborzati paraméterek hatása az Aletsch-gleccser sebességére

6.2.1. Az Aletsch-gleccser jégvastagsága és sebessége közötti összefüggés

Ha a MILLAN, R. et al. (2022) alapján rekonstruált jégvastagságát vizsgáljuk az Aletsch-gleccsernek, akkor láthatóvá válik, hogy több kiugró vagy éppen lelassuló sebesség mögött is a gleccser jégvastagsága állhat. Például az A6-os pont [34. ábra] (Konkordiaplatz környéke), ahol az Aletsch-gleccser valaha volt (KELLY, M.A. et al. 2004) és jelenleg is a legvastagabb jégtömeeggel rendelkezik (MILLAN, R. et al. 2021 eredménye szerint), vastagsága ellenére nem mutat kiugró sebességet. Ennek oka, hogy itt érnek össze a kárfülkékből kilépő jégárak (A6 és A9-es pontok között), melyek összeolvadva kezdetben lelassulnak és egy jégárként haladnak tovább [34. ábra]. Ezzel szemben megfigyelhető ennek ellenkezője is az **ablációs zónában**, ahol a jég vastagságával arányosan nő a gleccser sebessége is (A1-A5 pontokban). Az **akkumulációs zónában** (A11, A12, A16, A17, A20 pontokban) a legvékonyabb a gleccserjég, ahol a sebesség is alacsonyabb értékeket mutat. Kiugró jégvastagsági értékek láthatók még az **átmeneti zónában** (A6, A9, A15, A18, A19 pontokban), de itt nem tapasztalható a sebesség gyorsulása ezzel arányosan (kivéve az A13-as pontban). Habár a jég vastagsága és gyorsasága között szoros kapcsolat áll fenn (minél vastagabb a jég, annál gyorsabban tud haladni, és fordítva; VINCENT, C. et al. 2009), ez a valóságban nem minden esetben teljesül, hiszen a lejtőszög értékek nagyban felülírhatják ezt.

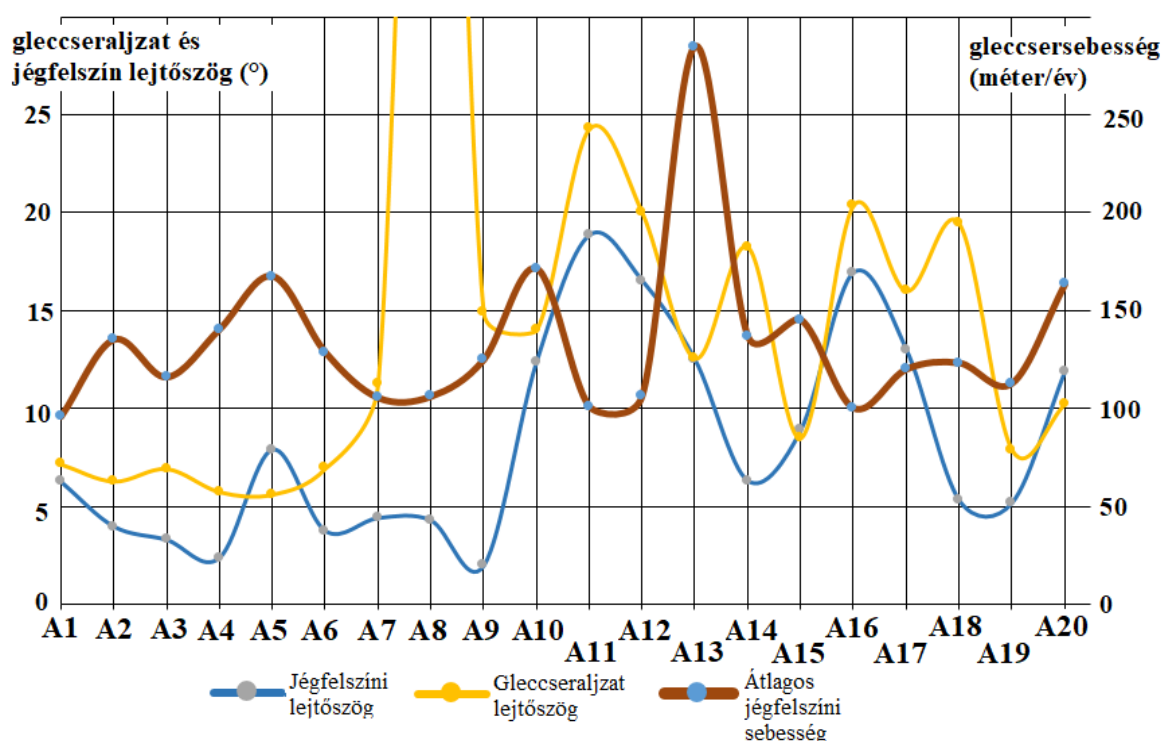


34. ábra. MILLAN, R. et al. (2021) jégvastagsági értékeinek összehasonlítása az Aletsch-gleccseren az átlagos, pontban mért jégfelszíni gleccsersebességgel.

6.2.2. Az Aletsch-gleccser lejtőszöge és sebessége közötti összefüggés

A vizsgált pontok gleccseraljzat lejtőszöge és sebessége között -0.22 korreláció tapasztalható [35. ábra]. A korrelációs együttható is jól mutatja, hogy az aljzat lejtőszöge és a gleccser sebessége között nincs szoros összefüggés. Az alacsony korrelációs együtthatót azonban okozhatja a gleccseraljzat előállításának pontatlansága is. Számításaimhoz a MILLAN, R. et al. (2021) féle gleccsersebesség alapján modellezett jégvastagságot vontam ki a felszín, vagyis a jég domborzatából. Mindezek alapján nem jelenthető ki egyértelműen, hogy a gleccseraljzat domborzata nincs hatással a jég sebességére, de az általam használt és előállított adatokat vizsgálva nem látható jelentős összefüggés. Azonban a *felszíni lejtőszögértékek* és sebességértékek között nagyobb mértékű lineáris kohézió látható, az A1-A10 közötti pontokban a lejtőszög és a sebesség korrelációs együtthatója 0.58 értéket mutat [35. ábra]. Néhány pont kivételével jól látszik, hogy a meredekebb lejtőszög esetén növekszik az adott pont sebessége is, ezt a folyamatot feltételezhetően a jégborítottság vastagságával magyarázható. Ahol vékonyabb jégborítottságú - *kisebb jégtömeggel rendelkező* - területek vannak, ott a mozgás - *habár*

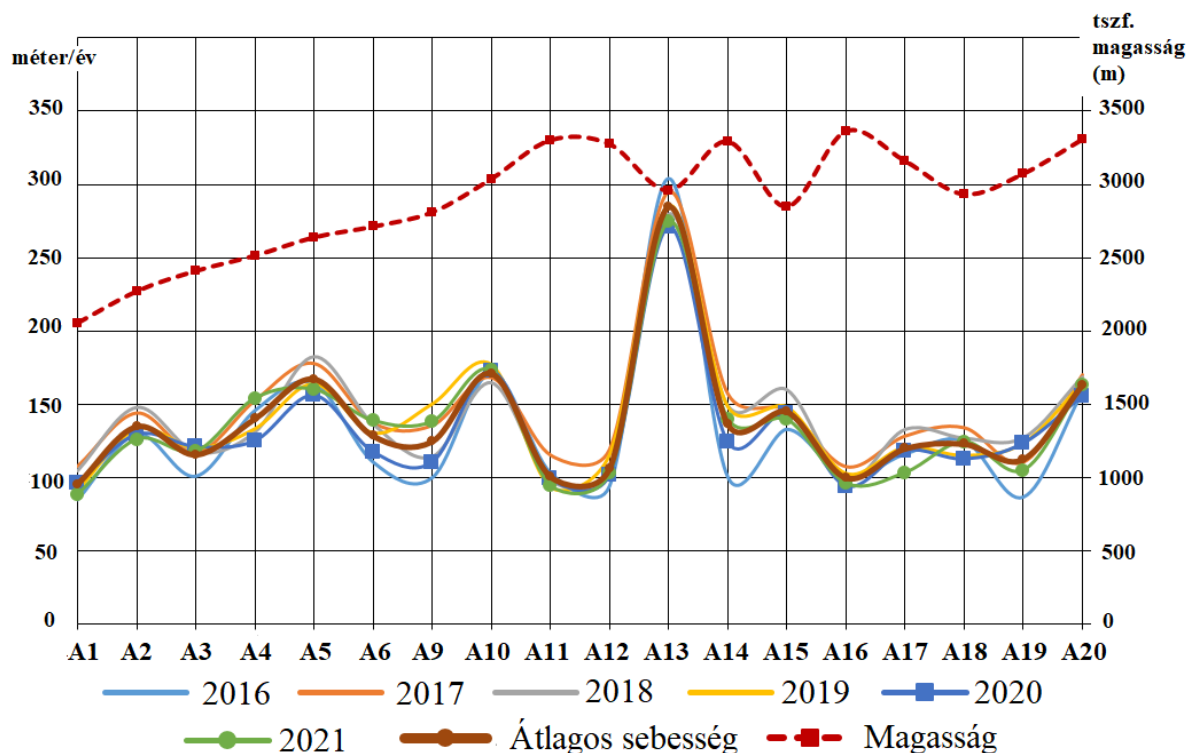
a vékonyabb jég miatt annak csökkenését várnánk - mégis jobban tudja követni a jégfelszín meredekebb domborzatát, így például a gleccseren bekövetkező olvadékvíz okozta sebességnövekedést azonnal tapasztalhatjuk ezeken a területeken. Az A10-A20 közötti pontok sebessége és felszíni lejtőszög értékei között ellentétes kölcsönhatás látható, ahol kisebb a sebesség, ott meredekebb a lejtőszög, és fordítva. Viszont ezek korrelációs együtthatója -0.1 értékkel csak gyenge lineáris kapcsolatot mutat. Feltételezhetően itt is a jégvastagság szabályozza a mért értékekben látható ellentmondást, azonban itt éppen fordítva. A gleccser ezen részein VINCENT, C. et al. (2009) megállapításai érvényesülhetnek részben az alacsonyabb hőmérséklet és az ez által létrejövő kevesebb olvadékvíz miatt. A vastagabb jég mozgása itt gyorsabb, míg a meredek lejtőkön elvékonyodó jég lelassul, ezért láthatunk késleltetett felgyorsulást, mely csak a meredekebb lejtőket követően jelentkezik.



35. ábra. A vizsgált pontok jégfelszíni és gleccseraljzat lejtőszög értékei és azok összehasonlítása az Aletsch-gleccser átlagsebességével. A felszíni lejtőszög értékek SRTM alapú domborzatmodell alapján FARR, T.G., KOBRICK, M. 2000), míg a gleccseraljzat lejtőszög értékei MILLAN, R. et al. (2021) jégvastagsági adatai és SRTM domborzatmodell alapján kerültek kiszámításra.

6.2.3. Az Aletsch-gleccser éves átlagsebessége

A pontokban mért *éves átlagsebesség* 2016-tól 2021-ig minden évben hasonló trendet mutat [36. *ábra*], kiugró értékek nem figyelhetők meg [4. *táblázat*], mely a gleccser stabil állapotára utalhat. A 2016-os év értékei jellemzően kisebbek valamelyest a teljes hat év átlagához viszonyítva, amelyet a jóval kisebb számú adatmennyiség is okozhat. Összességében, a hatévnyi időszak gleccsersebesség átlagát vizsgálva megfigyelhető az összefüggés a tengerszint feletti (=tszf.) magasság változásával, mely legerőteljesebben a gleccsornyelv területén, az **ablációs zónában** felvett (A1-A5) pontokban mutatkozik meg [36. *ábra*]. Fokozatos sebesség növekedés figyelhető meg a gleccser ezen szakaszán, amely a tszf. magasság növekedésével áll párhuzamban. Ezzel szemben az **akkumulációs és átmeneti zónában** a tszf. magasság ellentétes hatással van a sebességre, ahogy nő a magasság, úgy csökken a mért sebesség. Ezek a mozgásbeli különbségek a jégvastagság és hőmérséklet változásával hozhatók párhuzamba. Az alacsonyabb tszf. magasságban az ablációs zóna legalsó szakaszán, a gleccser frontjánál elvékonyodik a jég, így a vékonyabb, könnyebb jégtömeg lassabb mozgást mutathat (VINCENT, C. et al. 2009). Ahogy emelkedik a tszf. magasság és vastagszik a jégár, úgy a sebessége is növekedhet, amit a jégtömegéből eredő bőséges olvadékvíz is nagyban befolyásolhat és tovább fokozhatja a gleccser gyorsulását. Az ELA határához közeledve, 3125 méter magasságában valószínűleg már elkezdődik a felhalmozódási/jégeképződési folyamat, a jég gyarapodása mellett azonban itt csökken az olvadékvíz mennyisége és így a gleccser sebessége is lassabb az ablációs zónához képest. Ez a folyamat fokozódik, ahogy az akkumulációs területet elérjük és további lassulás figyelhető meg a sebességben.

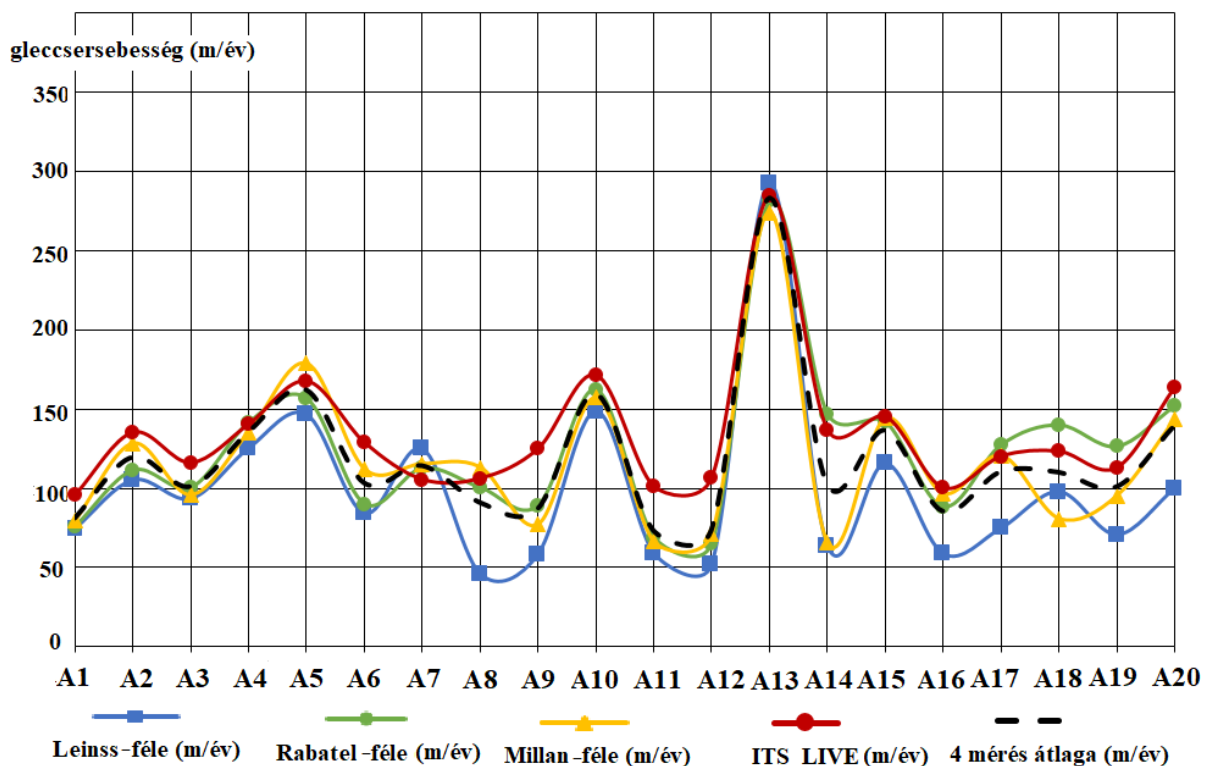


36. ábra. Az Aletsch-gleccseren vizsgált pontokban mért éves átlagsebességek összehasonlítása a tengerszint feletti magassággal (SRTM térkép alapján; FARR, T.G., KOBRICK, M. 2000).

6.3. Korábbi kutatások összehasonlítása az ITS_LIVE adatbázis eredményeivel

Az általam alkalmazott ITS_LIVE adatbázis sebességadatai 2016-2021 közötti időszakban, maximum 60 napos eltéréssel készült, optikai és radaros műholdfelvételek keresztkorrelációja alapján kapott értékek az Aletsch-gleccser területére. Az adatbázis alapján kapott sebességeket összevettem a területre számított korábbi Leinss-, Rabatel- és Millan-féle sebességekkel, melyek szintén Tracking módszerek felhasználásával készültek. Ha az egyes pontokra - melyeknek a sebességét vizsgáltam - egy-egy görbét illesztünk (mind a négy sebességtérkép alapján), akkor jól látható a hasonló trend, mind a négy görbe esetén. Azonban az is megfigyelhető, hogy az ITS_LIVE adatbázis értékei 60 %-ban gyorsabb mozgási sebességet mutatnak az adott pontokban (kivétel A5, A7, A8, A13, A14, A17, A18, A19) [37. ábra]. Ez az eltérés a különböző Tracking módszerek alkalmazásából és az ugyan átfedő, de mégis eltérő vizsgálati időszakból eredhet. Például

LEINSS, S., BERNHARD, P. (2021) 2011-2019 időszak átlagával számolt, radaros műholdképek alapján. RABATEL, A. et al. (2023/a) 2015-2021-es időszakban vizsgálta az optikai műholdfelvételekből generált átlagos sebességet. MILLAN, R. et al. (2022) radaros és optikai műholdfelvételekkel is dolgozott (az Aletsch-gleccser területén jellemzően optikai felvételekkel), és 2017-2018-as időszak alapján számított átlagos sebességet. Azonban a görbék hasonlósága jól mutatja a Tracking módszerek megbízhatóságát és a gleccser viszonylagosan stabil állapotát, hiszen sehol sem látunk drasztikus eltéréseket egyik mérés között sem, továbbá a gyorsabb és lassabb területek szinte azonosan váltják egymást mind a négy görbe esetén.



37. ábra. Az Aletsch-gleccseren vizsgált pontokban mért éves átlagsebességek (ITS_LIVE adatbázis) összehasonlítása Leinss-féle (LEINSS, S. 2021), Rabatel-féle (RABATEL, A. et al. 2023/b) és Millan-féle (MILLAN, R. et al. 2021) sebességeredményekkel.

Ha összehasonlítjuk egymással a négy módszer által kapott sebességeket [5. táblázat], akkor az ablációs zóna majdnem összes (A1-A5 pontok) és az átmeneti zóna néhány pontjában (A10 és A13) szinte azonos értékeket fedezhetünk fel, a sebességek eltérése egyik pont esetén sem haladja meg a 24 m/éves értéket. Továbbá megfigyelhető,

hogy a Leinss-féle sebességértékek a legalacsonyabbak, míg a leggyorsabb sebességek a Rabatel-féle és az ITS_LIVE adatbázis görbéin láthatók. A négy módszer legnagyobb és a legkisebb sebességi értékei közötti különbség átlagosan 43 m/évet mutat. Az ablációs zónában átlagosan 30 m/év, az akkumulációs zónában 56 m/év és az átmeneti zónában 42 m/év sebességkülönbség mérhető. A legnagyobb sebességkülönbségeket - *ha a négy görbe értékeit külön-külön is összehasonlítjuk egymással* - a Leinss-féle módszer esetén tapasztaljuk. Mindez arra utalhat, hogy a LEINSS, S., BERNHARD, P. (2021) által alkalmazott Speckle Tracking módszer önmagában nem elegendő az Aletsch-gleccser területén, mivel a hóborítás nem állandó és jelentősebb hőmérsékleti ingadozások is előfordulnak. Ezek negatívan befolyásolhatják a radaros alapú műholdfelvételek keresztkorrelációját, dekkorrelációt okozva köztük, tehát az optikai felvételek használata a sebesség meghatározásában kulcsfontosságú lehet a területen.

7. Összefoglalás

A gleccserek sebességét számos tényező befolyásolhatja, melyek vizsgálatával többet tudhatunk meg egy gleccser állapotáról. A jégárak mozgására hatással lehet például az olvadékvíz, a jégvastagság, minden olyan domborzati adottság, mely jellemzi területét, és nem utolsósorban a klimatikus paraméterek. A globális felmelegedéssel a gleccserek nem csak olvadnak, de a megnövekvő olvadékvíz a rendszerben mozgásukat is erőteljesen befolyásolja. Ezek az összetett és komplex folyamatok a gleccserek fokozatos csökkenése mellett olyan fordulópontokhoz vezethetnek, melyek édesvízkészleteink jövőjét veszélyeztetik, így a gleccserek mozgási sebességének vizsgálatára irányuló kutatások fontossága megkérdőjelezhetetlen.

Diplomamunkámban az Alpok legnagyobb gleccserének, az Aletsch-gleccser mozgásának vizsgálatát tűztem ki célul a NASA ITS_LIVE adatbázis felhasználásával, amivel korábban még nem vizsgálták a terület jégárait. A gleccser sebességét az adatbázisban elérhető leghosszabb időtávon, 2016-2021 között elemeztem, az ablációs zónától az akkumulációs zónáig felvett 20 pontban. Az adatbázisban elérhető sebességeket Sentinel 1 és 2 műholdfelvételeken számolt Feature és Speckle Tracking segítségével állították elő. Az egyes pontok átlagos sebességét domborzati, éghajlati és jégvastagsági adatokkal vettem össze, hogy megismerjem azokat a tényezőket, melyek a leginkább hatással vannak mozgására. Továbbá eredményeimet összevettem korábbi kutatások eredményeivel, így felmérve a gleccseren végbemenő esetleges változásokat.

A vizsgált pontokban változatos felszíni sebesség jellemzi az Aletsch-gleccser területét. Az eredmények kiértékeléséhez három (ablációs, átmeneti és akkumulációs) zónára osztottam a gleccser területét (és ez által a vizsgált pontokat), melyek segítették az értelmezést. Az ablációs zónában a tengerszint feletti magasság emelkedésével gyorsulást mutatott a gleccser a többi zónához képest. Ez összefüggésben állhat a délről érkező főnszél okozta tavaszi felmelegedéssel, mely hatására nő az olvadékvizek mennyisége a zónában, ami tavasszal fokozza a gleccser sebességét. Továbbá a gleccsersnyelvén vizsgált keresztmetszeti pontokban mért sebességek esetén megfigyelhető a gleccser jégvastagságának csökkenésével együtt járó

sebességcsökkenés. A gleccser magasabban fekvő részén - az ablációs és akkumulációs zóna között - elhelyezkedő átmeneti zónát vastagabb jég jellemzi a többi zónához képest, átlagosan mégis lassabb mozgást figyelhetünk meg itt. Ez feltételezhetően a rendszerben lévő kevesebb olvadákvízzel állhat összefüggésben. Az akkumulációs zóna sebességét jellemzően a csapadék és a jég tömegének változása befolyásolja. A gleccser teljes területéhez képest itt a legvékonyabb a jég, és lassabb sebesség is jellemzi. Gyorsulás a csapadék növekedése esetén figyelhető meg, mely növeli a gleccser tömegét, ezáltal gyorsabb mozgásra készíti. A leggyorsabb sebesség az átmeneti zónában volt megfigyelhető, 285 méter/éves értékkel, míg a leglassabb sebesség az ablációs zónában, 96 méter/éves értékkel. A zónák átlagos sebessége a vizsgálati időszakra a következő volt: ablációs zónában 124 méter/év, átmeneti zónában 156 méter/év, akkumulációs zónában 121 méter/év. Az egyes zónákra jellemző sebességeket egy webtérkép segítségével is megjelenítettem, mely segíti eredményeim értelmezését ([Link](#)).

Az általam kapott sebességeket összehasonlítottam három további kutatással (Leinss, S., Bernhard, P. (2021); Millan, R. et al. (2022); Rabatel, A. et al. (2023/a)), melyek szintén Feature és/vagy Speckle Tracking alkalmazásával készültek. A gleccser mozgása hasonló trendet és értékeket mutat, így feltételezhetjük, hogy jelenleg stabil állapotban van. A négy mérés összehasonlításában a legnagyobb eltérések a Leinss, S., Bernhard, P. (2021) értékei esetén voltak láthatók, mely arra utal, hogy a Speckle Tracking alkalmazása önmagában nem elegendő, mert a felvételek között fellépő dekkorreláció rontja az eredmények megbízhatóságát.

Kutatásom eredményei az Aletsch-gleccserről eddig rendelkezésre álló ismereteinket bővítik és segítik a területen végbemenő környezeti változások megértését. Az általam alkalmazott ITS_LIVE adatbázis felhasználásával annak megbízhatósága is alátámasztásra került, mely globális lefedettsége ellenére lokálisan is igen pontosnak bizonyult. Fontosnak tartom a gleccserek sebességének meghatározását lokális és globális szinten is, hiszen ezen eredmények a Föld édesvízkészletének, és így az emberiség jövőjének szempontjából is meghatározóak lehetnek!

8. Summary

Global warming causes glaciers to melt continuously, resulting in meltwater runoff. Increasing meltwater stimulates glacier velocity. So the analysis of movement of glacier rates is pretty important. In the long term, the steadily decreasing glacier ice could cause shortage of fresh water that would be influence economy and society.

In my thesis I studied the movement of the Aletsch Glacier, the largest glacier in the Alps. I used velocity map values between 2016-2021 in the NASA ITS_LIVE database. I measured velocity at 20 points on glacier. Values of the velocity were measured by Feature and Speckle Tracking methods calculated from Sentinel 1 and 2 satellite images. The average velocities of the points were compared with elevation, climate, ice thickness data and results of previous studies. In this way, I studied the movement of glacier and possible changes on the glacier.

The velocity of glacier surface at the points is variable over the Aletsch Glacier area. To evaluate the results, I divided the glacier area into three zones (ablation, balance and accumulation), which helped the interpretation. In the ablation zone, increasing velocity is observed with increasing elevation compared to the other zones. This may be related to the warming of spring caused by the foehn wind, which increases the amount of meltwater in spring. Furthermore, at the cross-sectional points on the glacier tongue, decreasing velocity is observed as the ice thickness of the glacier decreases. The balance zone, which is between ablation and accumulation zones at the higher elevation of the glacier is characterised by thicker ice, but it has a slower movement on average. The velocity of the accumulation zone is typically influenced by changes in precipitation and ice mass. Compared to the other zones, the ice is thinnest here, and the velocity of this zone is slower. However, increasing velocity is also observed. When the precipitation increases, the glacier mass increases, thus the glacier is accelerated. The fastest velocity was observed in the balance zone, at 285 m/year, while the slowest velocity was observed in the ablation zone, at 96 m/year. The average velocity of the zones over the study period was 124 m/year in the ablation zone, 156 m/year in the balance zone and 121 m/year in the accumulation zone. A web map was created to show the results ([Link](#)).

I compared to the measured velocities with three other studies (Leinss, S., Bernhard, P. (2021); Millan, R. et al. (2022); Rabatel, A. et al. (2023/a)). These were also measured by Feature and/or Speckle Tracking methods. The movement of the glacier shows similar trends and values, so we can assume that the glacier is currently stable. The largest differences were shown Leinss, S., Bernhard, P. (2021)'s result in the comparison of the four measurements. This suggests that the use of Speckle Tracking alone is not sufficient, because decorrelation between satellite images reduces the reliability of the results.

My research on the Aletsch Glacier contributes to the understanding of the environmental changes in locally. Using the ITS_LIVE database in the area, the reliability of the database was also confirmed. Despite of the global coverage, it seems to be quite good in local. I consider it important to determine the velocity of glacier at local and global scales. As these results could be pretty important for the Earth's freshwater resources thus for the future of humanity!

9. Köszönetnyilvánítás

Először is, hatalmas köszönetet szeretnék mondani Jó Viviána témavezetőmnek, aki megkedveltette velem a glaciológia világát, továbbá szakértelmével, hasznos tanácsaival, magyarázataival, türelmével és segítőkészségével hozzájárult a diplomamunkám elkészüléséhez. Nagyon hálás vagyok Telbisz Tamás témavezetőmnek, aki nagy tapasztalatával, hasznos tanácsaival segítette munkámat, továbbá a diplomamunkámhoz szükséges térinformatikai és statisztikai kiértékelések módszerének alapjait megadta, mindemellett felejthetetlen humorával színesítette a konzultációkat.

Hálás vagyok a családomnak, szeretteimnek, barátaimnak, hogy türelemmel voltak felém, biztattak és támogattak ez idő alatt.

10. Irodalomjegyzék

- AELLEN, M. és RÖTHLISBERGER, H. 1981: 50 Jahre Hochalpine Forschungsstation Jungfrauoch. *Berner Kantonalbank*, Bern.
- BAKKE, J. és NESJE, A. 2011: Equilibrium-Line Altitude (ELA). In: Singh, V.P, Singh, P., Haritashya, U.K.: Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers. Encyclopedia of Earth Sciences Series. *Springer*, Dordrecht, Hollandia, p. 1241.
- BAUDER, A., FUNK, M. és HUSS, M. 2007: Ice volume changes of selected glaciers in the Swiss Alps since the end of the 19th century. *Annals of Glaciology*, 46, pp. 145–149.
- BAUMGARTNER, A., REICHEL, E. és WEBER, G. 1983: Der Wasserhaushalt der Alpen: Niederschlag, Verdunstung, Abfluss und Gletscherspende im Gesamtgebiet der Alpen im Jahresdurchschnitt für die Normalperiode 1931–1960. *Oldenbourg*, München.
- BINDSCHADLER, R.A. és SCAMBOS, T.A. 1991: Satellite-Image-Derived Velocity Field of an Antarctic Ice Stream. *Science*, 252, pp. 242–246.
- BOSSON, J.B., HUSS, M. és OSIPOVA, E. 2019: Disappearing World Heritage glaciers as a keystone of nature conservation in a changing climate. *Earth's Future*, 7, pp. 469–479.
- CH2018 (2018): CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report. *National Centre for Climate Services*, Zurich, 271 pp. ISBN: 978-3-9525031-4-0.
- CLARK, P.U., DYKE, A.S., SHAKUN, J.D., CARLSON, A.E., CLARK, J., WOHLFARTH, B., MITROVICA, J.X., HOSTETLER, S.W. és MCCABE, A.M. 2009: The Last Glacial Maximum. *Science*, 325, pp. 710–714.
- COGLEY, J.G., HOCK, R., RASMUSSEN, L.A., ARENDT, A.A., BAUDER, A., BRAITHWAITE, R.J., JANSSON, P., KASER, G., MÖLLER, M., NICHOLSON, L. és ZEMP, M. 2011: Glossary of Glacier Mass Balance and Related Terms. IHP-VII Technical Documents in Hydrology No. 86, IACS Contribution No. 2, *UNESCO-IHP*, Paris, pp. 110–111., p. 114.

- CUFFEY, K.M. és PATERSON, W.S.B. 2010: *The Physics of Glaciers*, Fourth edition. *Butterwoth-Heinemann és Elsevier*, Amsterdam, London, pp. 91–114., p. 130., p. 223., pp. 286–288., pp. 440–445., p. 453., pp. 686–691.
- DAVISON, B.J., SOLE, A.J., LIVINGSTONE, S.J., COWTON, T.R. és NIENOW, P.W. 2019: The Influence of Hydrology on the Dynamics of Land-Terminating Sectors of the Greenland Ice Sheet. *Frontiers in Earth Science*, 7(10), pp. 1–24.
- FAHNESTOCK, M., SCAMBOS, T., MOON, T., GARDNER, A., HARAN, T., és KLINGER, M. 2016: Rapid large-area mapping of ice flow using Landsat 8. *Remote Sens. Environ.*, 185, pp. 84–94.
- FARINOTTI, D., HUSS, M., BAUDER, A. és FUNK, M. 2009: An estimate of the glacier ice volume in the Swiss Alps. *Global and Planetary Change* 68, pp. 225–231.
- FARR, T.G. és KOBRICK, M. 2000: Shuttle Radar Topography Mission Produces a Wealth of Data. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 81, 583-585., 68(3), pp. 225–231.
- FRISCH, W. 1979: Tectonic progradation and plate tectonic evolution of the Alps. *Tectonophysics*, Vol. 60, pp. 121–139.
- GARDNER, A.S., MOHOLDT, G., SCAMBOS, T., FAHNESTOCK, M., LIGTENBERG, S., VAN DEN BROEKE, M., és NILSSON, J. 2018: Increased West Antarctic and unchanged East Antarctic ice discharge over the last 7 years. *The Cryosphere*, 12, pp. 521–547.
- GLAMOS adatbázis, 1881-2022: The Swiss Glaciers 1880-2020-21, Glaciological Reports No 1-142, Yearbooks of the Cryospheric Commission of the Swiss Academy of Sciences (SCNAT), published since 1964 by VAW / ETH Zurich, doi:10.18752/glrep_series.
- GOUDIE, A. (szerk.), 2004: *Encyclopedia of Geomorphology* (2nd Edition). *Routledge*, London. p. 1184.
- GROVE, J. 1988: *The Little Ice Age*. *Routledge*, London.

- HAEBERLI, W. és HOELZLE, M. 1995: Application of inventory data for estimating characteristics of and regional climate-change effects on mountain glaciers: a pilot study with the European Alps. *Ann. Glaciol.*, 21, pp. 206–212.
- HEID, T. és KÄÄB, A. 2012: Repeat optical satellite images reveal widespread and long term decrease in land-terminating glacier speeds. *The Cryosphere*, 6, pp. 467–478.
- HERMAN, F., BEYSSAC, O., BRUGHELLI, M., LANE, S.N., LEPRINCE, S., ADATTE, T., LIN J.Y.Y., AVOUAC és COX, J.S.C. 2015: Erosion by an Alpine glacier. *Science*, 350, pp. 193–195.
- HODGE, S. 1979: Direct Measurement of Basal Water Pressures: Progress and Problems. *Journal of Glaciology*, 23(89), pp. 309–319.
- HOOKE, R.L., CALLA, P., HOLMLUND, P., NILSSON, M., és STROEVEN, A. 1989: A 3 Year Record of Seasonal Variations in Surface Velocity. *StorglaciÄren, Sweden, J. Glaciol.*, 35, pp. 235–247.
- HUGHES, P.D., WOODWARD, J.C. és GIBBARD, P.L. 2006: Quaternary glacial history of the Mediterranean mountains. *Progress in Physical Geography*, 30, 3, pp. 334–364.
- IVY-OCHS, S., KERSCHNER, H., KUBIK, P.W. és SCHLÜCHTER, C. 2005: Glacier response in the European Alps to Heinrich Event 1 cooling: the Gschnitz stadial. *Journal Of Quaternary Science*, Vol. 21, pp. 115–130.
- JENNINGS, S.J.A. és HAMBREY, M.J. 2021: Structures and deformation in glaciers and ice sheets. *Reviews of Geophysics*, 59(3), p. 8.
- JOUVET, G., és HUSS, M. 2019: Future retreat of Great Aletsch Glacier. *Journal of Glaciology* 65, pp. 869–872.
- JOUVET, G. 2022: Inversion of a Stokes glacier flow model emulated by deep learning. *Journal of Glaciology*, pp. 1–14.
- KELLY, M.A., KUBIK, P.W., VON BLANCKENBURG, F. és SCHLÜCHTER, C. 2004: Surface exposure dating of the Great Aletsch Glacier Egesen moraine system, western Swiss Alps, using the cosmogenic nuclide ^{10}Be . *Journal of Quaternary Science*, 19, pp. 431–441.

- KERSCHNER, H. 1990: Methoden der Schneegrenzbestimmung. In: Liedtke, H. (Ed.), *Eiszeitforschung*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, pp. 229–311.
- KOS, A., AMANN, F., STROZZI, T., DELALOYE, R., VON RUETTE, J., és SPRINGMAN, S. 2016: Contemporary glacier retreat triggers a rapid landslide response, Great Aletsch Glacier, Switzerland, *Geophys. Res. Lett.*, 43, pp. 12466–12474.
- LEINSS, S. 2021: InSAR Elevation Models and Velocity Maps of Great Aletsch Glacier (2011–2019). [Dataset], ETH Zurich. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000482456>
Link: <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/482456>
Letöltve: 2023.04.15.
- LEINSS, S. és BERNHARD, P. 2021: TanDEM-X: Deriving InSAR Height Changes and Velocity Dynamics of Great Aletsch Glacier. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, Vol. 14, pp. 4810–4811.
- LI, S., LEINSS, S. és HAJNSEK, I. 2021: Cross-Correlation Stacking for Robust Offset Tracking Using SAR Image Time-Series. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 14, pp. 4765–4778.
- MATHEWS, W.H. 1964: Water pressure under a glacier. *Journal of Glaciology*, 5(38), 235–240.
- MATTAVELLI, M. 2016: Development of a Glaciological Spatial Data Infrastructure to assess glaciers response to climatic fluctuations. Thesis for: Ph.D. in *Environmental Sciences XXVIII Cycle 2015/2016*, pp. 18–21.
- MEIER, M.F. és POST, A.S. 1962: Recent Variations in Mass Net Budgets of Glaciers in Western North America, *IAHS Publications*, 58, pp. 63–77.
- MEIER, M.F. és TANGBORN, W.V. 1965: Net Budget and Flow of South Cascade Glacier, Washington, *J. Glaciol.*, 5, pp. 547–566.
- MESCHEDE, M. és WARR, L.N. 2019: The Geology of Germany: The Evolution of the Alps. *Springer Nature Switzerland AG*, pp. 191–208.
- MILLAN, R., MOUGINOT, J. és RABATEL, A. 2021: Ice velocity and thickness of the world's glaciers. [Dataset]. *Theia*. <https://doi.org/10.6096/1007> Link:

<https://www.sedoo.fr/theia-publication-products/?uuid=55acb5d5-3982-4eac-89b2-46703557938c> Letöltve: 2023.01.31.

- MILLAN, R., MOUGINOT, J., RABATEL, A. és MORLIGHEM, M. 2022: Ice velocity and thickness of the world's glaciers. *Nature Geoscience*, vol. 15. pp. 124–129.
- NESJE, A. 2007: Paleo ELAs. In: Elias, S.A. (szerk.), *Encyclopedia of Quaternary Science*, vol. 2. Elsevier, Amsterdam, pp. 882–892.
- NIENOW, P.W., HUBBARD, A.L., HUBBARD, B.P., CHANDLER, D.M., MAIR, D.W.F., SHARP, M.J. és WILLIS, I.C. 2005: Hydrological controls on diurnal ice flow variability in valley glaciers. *Journal Of Geophysical Research*, Vol. 110, F04002, pp. 9–11.
- NYE, J. F. 1952: The mechanics of glacier flow. *Journal of Glaciology*, 2, 82–93.
- PALACIOS, D., HUGHES, P.D., GARCIA-RUIZ, J.M. és ANDRÉS, N. 2022: European Glacial Landscapes: Maximum Extent of Glaciations. Elsevier. Amsterdam, Cambridge, Oxford. pp. 355-357., 449–457.
- PRATS, P., SCHEIBER, R., REIGBER, A., ANDRES, C. és HORN, R. 2009: Estimation of the Surface Velocity Field of the Aletsch Glacier Using Multibaseline Airborne SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 47, no. 2, pp. 419–430.
- RABATEL, A., DUCASSE, E., MILLAN, R. és MOUGINOT, J. 2023/a: Satellite-Derived Annual Glacier Surface Flow Velocity Products for the European Alps, 2015–2021. *Data*, 8, 66, pp. 1–18.
- RABATEL, A., DUCASSE, E., MILLAN, R. és MOUGINOT, J. 2023/b: Annual glacier surface flow velocity product from Sentinel-2 data for the European Alps. [Dataset] <https://doi.org/10.57745/XHQ7TL> Link: <https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/dataset.xhtml?persistentId=doi:10.57745/XHQ7TL> Letöltve: 2023.05.06.
- RACOVITEANU, A.E., PAUL, F., RAUP, B., KHALSA, S.J.S. és ARMSTRONG, R. 2009: Challenges and recommendations in mapping of glacier parameters from space:

- results of the 2008 Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS) workshop, Boulder, Colorado, USA. *Annals of Glaciology*, 50(53), pp. 53–69.
- RAUP, B.H., RACOVITEANU, A., KHALSA, S.J.S., HELM, C., ARMSTRONG, R. és ARNAUD, Y. 2007: The GLIMS Geospatial Glacier Database: a New Tool for Studying Glacier Change. *Global and Planetary Change*, 56, pp. 101–110.
- RAVAZZI, C. 2003: An overview of the Quaternary continental stratigraphic units based on biological and climatic events in Italy. *Il Quaternario - Volume Speciale INQUA Italian Journal of Quaternary Sciences* 16, pp. 11–18.
- RAVAZZI, C., PINI, R., BADINO, F., DE AMICIS, M., LONDEIX, L. és REIMER, P.J. 2014: The latest LGM culmination of the Garda Glacier (Italian Alps) and the onset of glacial termination. Age of glacial collapse and vegetation chronosequence. *Quaternary Science Reviews*, 105, pp. 26–47.
- REYNARD, E. 2020: Landscapes and Landforms of Switzerland. *Springer Nature*. pp. 7–30., pp. 201–216.
- ROATTINO, T., CROUZET, C., VASSALLO, R., BUONCRISTIANI, J.F., CARCAILLET, J., GRIBENSKI, N. és VALLA, P.G. 2022: Paleogeographical reconstruction of the western French Alps foreland during the last glacial maximum using cosmogenic exposure dating. *Quaternary Research*, 111, pp. 1–16.
- RODRÍGUEZ, E., MORRIS, C.S. és BELZ, J.E. 2006: A Global Assessment of the SRTM Performance. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72(3), pp. 249–260.
- SCAMBOS, T.A., DUTKIEWICZ, M.J., WILSON, J.C., és BINDSCHADLER, R.A. 1992: Application of image cross-correlation to the measurement of glacier velocity using satellite image data, *Remote Sens. Environ.*, 42, pp. 177–186.
- SCHUBERT, A., FAES, A., KÄÄB, A. és MEIER, E. 2013: Glacier surface velocity estimation using repeat TerraSAR-X images: Wavelet- vs. correlation-based image matching. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 82, pp. 49–62.
- SHARP, R.P. 1954: Glacier Flow: A Review. *GSA Bulletin*; 65 (9): pp. 821–838.

- SHORT, N.H. és GRAY, A.L. 2004: Potential for RADARSAT-2 interferometry: glacier monitoring using speckle tracking. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 30(3): pp. 504–509.
- STORNI, E., HUGENTOBLER, M., MANCONI, A. és LOEW, S. 2020: Monitoring and analysis of active rockslide-glacier interactions (Moosfluh, Switzerland). *Geomorphology*, Volume 371, 107414, pp. 1–11.
- VAN DER VEEN, C.J. 2013: Fundamentals of Glacier Dynamics, Second Edition. CRC Press, Boca Raton, UK, pp. 50–51., p. 116., pp. 200–202., p. 254.
- VAN WYK DE VRIES, M. 2021: Glacier Image Velocimetry (GIV) User Manual. Version 1.0 <https://maxvwdv.wixsite.com/home/giv> (Letöltve: 2023.05.18)
- VERBUNT, M., GURTZ, J., JASPER, K., LANG, H., WARMERDAM, P.M.M. és ZAPPA, M. 2003: The hydrological role of snow and glaciers in alpine river basins and their distributed modeling. *Journal of Hydrology*, 282 (1-4), pp. 36–55.
- VINCENT, C., SORUCO, A., SIX, D. és LE MEUR, E. 2009: Glacier thickening and decay analysis from 50 years of glaciological observations performed on Glacier d'Argentière, Mont Blanc area, France. *Annals of Glaciology*, 50(50), pp. 73–79.
- WIRSIG, C., ZASADNI, J., CHRISTL, M., AKÇAR, N. és IVY-OCHS, S. 2016: Dating the onset of LGM ice surface lowering in the High Alps. *Quaternary Science Reviews*, 143, 37–50.

11. Internetes források

Link: <https://www.antarcticglaciers.org/>

Letöltve: 2023.04.16.

GLIMS adatbázis:

Link: <http://glims.colorado.edu/glacierdata/>

Letöltve: 2023.02.18.

ITS_LIVE webtérkép és adatbázis:

Link: <https://itslive-dashboard.labs.nsidc.org/>

Letöltve: 2023.02.13.

ITS_LIVE applikáció:

Link: <https://nsidc.org/apps/itslive/>

Letöltve: 2023.04.30.

ITS_LIVE projekt:

Link: <https://its-live.jpl.nasa.gov/>

Letöltve: 2023.04.30.

Leaflet könyvtár:

Link: <https://leafletjs.com/>

Letöltve: 2022.09.29.

Leaflet Sidebar:

Link: <https://github.com/Turbo87/leaflet-sidebar>

Letöltve: 2022.12.03.

MeteoSwiss, Federal Office of Meteorology and Climatology:

Link: <https://www.meteoswiss.admin.ch>

Letöltve: 2023.02.19.

Sentinel-2 műholdkép:

Link: <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser>

Letöltve: 2023.02.08.

Svájc LGM térképe:

Link: <https://opendata.swiss/en/dataset/die-schweiz-wahrend-des-letzteiszeitlichen-maximums-lgm-1-500000>

Letöltve: 2023.04.16.

UNESCO adatbázis, World Heritage Centre 1992-2023:

Link: <https://whc.unesco.org/en/list/1037/>

Letöltve: 2023.03.12.

USGS adatbázis - SRTM:

Link: <https://earthexplorer.usgs.gov/>

Letöltve: 2023.04.22.

12. Ábrajegyzék

1. ábra. Tömegegyensúly és a hozzá kapcsolódó fogalmak.	8
2. ábra. Gleccserhasadékok.....	10
3. ábra. Morénatípusok.	11
4. ábra. A regeláció folyamata.	13
5. ábra. Az alaskai Variegated-gleccser 'lezúdulása'	14
6. ábra. Szubglaciális vízhálózat egy éves fejlődési ciklusa.....	17
7. ábra. Tracking módszerek alapja.	19
8. ábra. Az ITS_LIVE adatbázis NetCDF fájlformátumú sebességtérképei.	20
9. ábra. Az ITS_LIVE webtérkép előszűrő kezelőfelülete.	21
10. ábra. Az Aletsch-gleccseren vizsgált pontok, zónák és az ezekhez közel eső meteorológiai állomások.	27
11. ábra. Leaflet és Leaflet kiegészítő csomag (Sidebar) behívása a programkódba. ...	29
12. ábra. CSS formázásra példa a programkódból.	30
13. ábra. A programkódba megírt weblap szerkezeti felépítése (<body>).	30
14. ábra. Példa a programkódból egy komplex, függvénnel módosított dinamikus szótár létrehozására.	31
15. ábra. Alpok kialakulásának tektonikus folyamatai.	33
16. ábra. Az Aletsch-gleccser környezetének földtani felépítése.	37
17. ábra. Svájc eljegesedésének mértéke az LGM idején.	37
18. ábra. Svájc átlagos évi csapadékösszeg és átlagos évi középhőmérséklet térképe (1991-2020).	38
19. ábra. Az Aletsch-gleccser sebességtérképei.	40
20. ábra. Az Aletsch-gleccseren felvett és vizsgált pontok (A1-A20) tengerszint feletti magassága.....	41
21. ábra. Az Aletsch-gleccser topográfiai vizsgálata SRTM alapú domborzatmodell felhasználásával.	44
22. ábra. Az idő előrehaladtával megfigyelhető növekvő adatsűrűség az Aletsch-gleccser A10-es pontjában mért sebességértékek példájában (2016-2021).	45

23. ábra. Az Aletsch-gleccser A9-es pontjának átlagos sebessége és annak szórása az átlag mínusz szórás és átlag plusz szórás megjelenítésével (2016-2019).	46
24. ábra. Pontokban vizsgált havi átlagsebességek éves összehasonlítása az Aletsch-gleccser ablációs zónájában (2016-2021).....	47
25. ábra. A7-A5-A8 pont 6 éves átlagsebességeinek és keresztmetszeti profilban vizsgált jégvastagság változásának összevetése.	48
26. ábra. Pontokban vizsgált havi átlagsebességek éves összehasonlítása az Aletsch-gleccser átmeneti zónájában (2016-2021).....	49
27. ábra. Pontokban vizsgált, havi sebességek éves összehasonlítása az Aletsch-gleccser akkumulációs zónájában (2016-2021).....	50
28. ábra. Pontokban vizsgált, hat évre átlagolt havi sebességek szórása az Aletsch-gleccser ablációs zónájában (2016-2021).....	52
29. ábra. Pontokban vizsgált, hat évre átlagolt havi sebességek szórása az Aletsch-gleccser átmeneti zónájában (2016-2021).....	53
30. ábra. Pontokban vizsgált, hat évre átlagolt havi sebességek szórása az Aletsch-gleccser akkumulációs zónájában (2016-2021).. ..	54
31. ábra. A webtérkép kezelőfelülete és funkciói.....	55
32. ábra. Az infógomb alatt található jelmagyarázat.	56
33. ábra. A három zóna pontokban mért havi átlagsebességének összehasonlítása a hőmérsékleti és csapadékadatokkal.....	59
34. ábra. MILLAN, R. et al. (2021) jégvastagsági értékeinek összehasonlítása az Aletsch-gleccseren az átlagos, pontban mért jégfelszíni gleccsersebességgel.	61
35. ábra. A vizsgált pontok jégfelszíni és gleccseraljzat lejtőszög értékei és azok összehasonlítása az Aletsch-gleccser átlagsebességével.....	62
36. ábra. Az Aletsch-gleccseren vizsgált pontokban mért éves átlagsebességek összehasonlítása a tengerszint feletti magassággal	64
37. ábra. Az Aletsch-gleccseren vizsgált pontokban mért éves átlagsebességek összehasonlítása Leinss-féle, Rabatel-féle és Millan-féle sebességeredményekkel.	65

13. Függelék

1. táblázat. Az Aletsch-gleccseren vizsgált pontok földrajzi koordinátái (°).

Az Aletsch-gleccseren vizsgált pontok földrajzi koordinátái (°)		
Vizsgált pontok	Y tengely koordinátája	X tengely koordinátája
A1	46,41602649	8,057889231
A2	46,43767959	8,074616842
A3	46,45926130	8,075211708
A4	46,47828604	8,063148732
A5	46,49104495	8,050298751
A6	46,50007102	8,037945198
A7	46,48698202	8,045658802
A8	46,49457250	8,053534818
A9	46,51552365	8,022708901
A10	46,53009785	7,997486614
A11	46,54108799	7,998557371
A12	46,53049939	7,983328821
A13	46,51668662	8,043100881
A14	46,54241454	8,039829122
A15	46,49333815	8,006516668
A16	46,51371229	7,982722058
A17	46,49943552	7,979599016
A18	46,48679464	7,994321931

A19	46,48084598	7,974096512
A20	46,48709207	7,956250555

2. **táblázat. Az Aletsch-gleccseren vizsgált pontokban mért domborzati értékek.** A kitétség értékei jelölik az északias (0-22,5° és 337,5-360°); északkeleties (22,5-67,5°); keleties (67,5-112,5°); délkeleties (112,5-157,5°); délies (157,5-202,5°); délnyugatias (202,5-247,5°); nyugatias (247,5-292,5°); északnyugatias (292,5-337,5°) fekvésű területeket.

Aletsch-gleccseren vizsgált pontokban mért domborzati paraméter értékek					
Vizsgált pontok	Kitétség (fok)	Lejtőszög (fok)	Gleccseraljzat lejtőszöge (fok)	Tszf. magasság (m)	Jégvastagság (m)
A1	182,12	6,25	7,17	2056	367,19
A2	200,56	3,96	6,29	2272	454,86
A3	171,87	3,28	6,94	2410	478,50
A4	191,31	2,37	5,75	2514	534,53
A5	164,74	7,89	5,62	2639	510,12
A6	172,87	3,74	6,94	2712	652,69
A7	198,43	4,40	11,23	2615	481,91
A8	102,53	4,28	68,00	2635	396,61
A9	135,00	1,97	14,91	2810	520,78
A10	184,24	12,38	14,01	3038	257,23
A11	175,91	18,85	24,30	3302	164,36
A12	93,92	16,52	20,02	3275	130,60
A13	241,56	12,48	12,58	2958	248,84
A14	162,90	6,29	18,26	3294	339,06
A15	36,57	8,89	8,51	2848	424,65

A16	146,94	16,95	20,39	3362	132,45
A17	100,12	12,99	16,02	3161	171,57
A18	23,20	5,29	19,46	2933	399,04
A19	153,43	5,18	7,89	3071	318,99
A20	74,36	11,89	10,24	3305	201,49

3. táblázat. Az Aletsch-gleccser vizsgált területein mért domborzati értékek.

Radiánban számolt, átlagos lejtőkitettség fokba átváltott értékei láthatók a második sorban.

Aletsch-gleccser mért zonális domborzati statisztikai értékei				
Vizsgált terület	Átmeneti zóna	Ablációs zóna	Akkumulációs zóna	Teljes terület
Terület (%-os megoszlásban)	52,54	19,25	28,21	100
Átlagos lejtőkitettség (fok)	148,51	179,28	160,26	162,68
Átlagos lejtőszög (fok)	9,49	4,62	18,69	10,94
Legnagyobb lejtőszög (fok)	65,78	33,39	72,05	57,07
Gleccseraljzat átlagos lejtőszöge (fok)	25,94	20,26	24,60	23,60
Legkisebb tengerszint feletti magasság (m)	2666,00	1589,00	3124,00	2459,67
Legnagyobb tengerszint feletti magasság (m)	3237,00	2677,00	4108,00	3340,67
Átlagos tengerszint feletti magasság (m)	2905,85	2309,44	3430,08	2881,79

4. táblázat. Az Aletsch-gleccseren vizsgált 20 pontban (2016-2021 időszakban) mért éves átlagsebességek. (ITS_LIVE adatbázis sebességtérképek eredményeiből)

Aletsch-gleccser pontjaiban mért éves átlagsebességek (méter/év)						
Vizsgált pontok	2016	2017	2018	2019	2020	2021
A1	85,28	107,95	104,97	91,58	96,56	88,44
A2	129,84	144,18	147,98	133,22	129,26	126,10
A3	101,29	117,14	117,76	120,35	120,99	117,89
A4	145,94	152,61	131,23	133,33	124,96	154,09
A5	164,53	177,86	182,51	164,04	155,92	160,10
A6	110,90	137,35	136,69	130,57	117,44	138,80
A7	102,43	115,36	130,18	108,73	99,99	85,35
A8	100,73	109,46	114,30	105,26	96,12	108,99
A9	100,31	135,71	114,51	150,27	110,35	138,21
A10	171,61	168,29	164,79	177,17	172,78	173,28
A11	103,63	115,57	98,40	93,65	99,67	94,52
A12	94,60	119,44	104,89	115,80	101,59	102,92
A13	303,87	294,51	279,50	285,54	270,67	274,67
A14	100,76	157,27	149,21	148,44	124,04	140,10
A15	133,21	146,60	160,03	148,29	143,90	139,80
A16	100,88	107,69	99,11	102,95	94,13	96,04
A17	116,38	128,52	133,04	120,77	118,17	103,31
A18	125,58	134,16	127,12	115,19	112,48	124,48

A19	87,10	110,71	127,34	123,57	123,32	104,97
A20	158,52	170,18	168,68	164,59	155,56	163,40

5. *táblázat. Az Aletsch-gleccseren pontokban mért sebességi értékek összehasonlítása.* Rabatel-féle (RABATEL et al. 2023b), Leinss-féle (LEINSS 2021), Millan-féle (MILLAN et al. 2021) sebességértékek és az ITS_LIVE adatbázis sebességértékeinek pontokban mért átlagos sebességértékek vizsgálata.

Aletsch-gleccseren mért sebességértékek (méter/év)					
Vizsgált pontok	Rabatel-féle	Leinss-féle	Millan-féle	ITS_LIVE	4 mérés átlaga
A1	75,91	74,61	79,70	95,79	81,50
A2	111,28	105,12	128,23	135,10	119,93
A3	100,48	93,37	95,68	115,90	101,36
A4	141,58	125,27	135,46	140,36	135,67
A5	156,74	146,34	178,64	167,49	162,30
A6	89,99	83,96	112,00	128,63	103,64
A7	112,66	124,72	115,31	105,41	114,52
A8	100,43	45,81	113,14	106,04	91,36
A9	89,10	58,43	77,18	124,89	87,40
A10	162,27	148,51	157,06	171,32	159,79
A11	68,99	58,79	66,28	100,91	73,74
A12	65,17	52,06	71,05	106,54	73,70
A13	281,08	292,42	274,09	284,79	283,09
A14	146,99	63,45	65,68	136,64	103,19

A15	142,08	115,63	144,09	145,31	136,78
A16	88,23	58,55	96,61	100,13	85,88
A17	127,28	74,73	120,58	120,03	110,66
A18	139,88	97,74	80,79	123,17	110,39
A19	126,29	70,62	95,09	112,84	101,21
A20	151,84	99,77	143,33	163,49	139,61