

EÖTVÖS LORÁND TUDOMÁNYEGYETEM

TERMÉSZETTUDOMÁNYI KAR

FÖLDTUDOMÁNYI ALAPSZAK

METEOROLÓGIA SPECIALIZÁCIÓ

A krioszféra megfigyelt és jövőbeli változásai

SZAKDOLGOZAT



Készítette:

Schmidt Zoltán

Földtudományi Bsc – Meteorológia specializáció

Témavezető:

Dr. habil. Mészáros Róbert

ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2020

NYILATKOZAT

Név: Schmidt Zoltán

ELTE Természettudományi Kar, szak: Földtudományi Alapszak

NEPTUN azonosító: J0EQ1R

Szakedolgozat címe:

A krioszféra megfigyelt és jövőbeli változásai

A **szakedolgozat** 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, 2020

Schmidt Zoltán

a hallgató aláírása

Tartalom

1. BEVEZETÉS	3
2. A KRIOSZFÉRA FOGALMA ÉS KUTATÁSÁNAK TÖRTÉNETE	6
2.1. A KRIOSZFÉRA ELEMEI.....	6
2.2. A JÉGFURATOK TÖRTÉNETE ÉS ELEMZÉSE.....	8
2.2.1. A jégfuratok fontossága	8
2.2.2. Jégfuratok története.....	8
2.2.3. Jégfuratok vizsgálata napjainkban	13
3. ARKTISZ.....	16
3.1. AZ ARKTISZ FOGALMA ÉS FONTOSSÁGA	16
3.2. VÁLTOZÁSOK AZ ELMÚLT IDŐSZAKBAN	17
4. ANTARKTISZ.....	19
4.1. SZEREPE ÉS VÁLTOZÁSA	19
4.2. ÖSSZEHASONLÍTÁSA AZ ARKTISSZAL	19
5. HEGYI GLECCSEREK.....	23
5.1. ELHELYEZKEDÉSÜK.....	23
5.2. VÁLTOZÁSOK ÉS KÖVETKEZMÉNYEIK.....	23
6. PERMAFROSZT	26
7. ÖSSZEFOGLALÁS	28
8. IRODALOMJEGYZÉK.....	29
9. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	34

1. Bevezetés

A krioszféra változó tendenciája nagy hatással van az éghajlat megváltozására, a tengerszint emelkedésére, az óceánok hőmérsékletének növekedésére, a természetes élőhelyekre és más-más formában Földünk nagy részére.

Az utóbbi évtizedek során a krioszféra területei rendkívül nagy ütemű olvadást mutatnak, mely mind a jelenben, mind pedig a jövőben komoly problémákkal sújtja a bioszféra valamely részét. Az egyik legjelentősebb gondot a tengerszint emelkedése jelenti. Grönland és az Antarktisz jegének olvadása a tengerszint emelkedését vonja maga után, mely az alacsonyan fekvő területeken élőket a lakóhelyük elhagyására kényszerítheti. A legjobb példa erre Hollandia, melynek jelentős része a tengerszint alatt helyezkedik el, így az ott élőket különösen nagy veszély fenyegeti. Ez a veszély szintén igaz a tengerek és óceánok szigetvilágára. De megemlíthetjük Nagy-Britannia partjait is, ahol a tenger eróziója okoz nagy gondot. Az 1985 és 2018 közötti időszakban a part menti erózió nagyjából 1 cm-rel növekedett évente (IPCC, 2019). Becslések szerint (IPCC, 2019) 2100-ra a globális tengerszint 0,43 méter és 0,84 méter közötti emelkedést fog mutatni az 1985 és 2005 közötti időszakhoz viszonyítva. Sajnálatos módon ez a tendencia a század vége után is megmarad, mivel az óceánok melegedése tovább folytatódik, így a grönlandi és az antarktisi jég olvadása valószínűleg több ezer éven át kitart. A jelenlegi tengerszint emelkedés évente 3,3 milliméter (<https://climate.nasa.gov/vital-signs/sea-level>), mely nagyjából 15 milliméterre nőhet 2100-ra, illetve ez több centiméterre gyarapodhat a 22. századra. A globális tengerszint változás azonban már 2050-re sok helyen fogja éreztetni hatását, leginkább az alacsonyan fekvő tengerpartoknál és szigeteknél. A fejlett országok ezért különböző módszerekkel védekeznek a vízszint megemelkedése ellen, melyek alapvetően hatékonynak bizonyulnak. Ez azonban rengeteg anyagi ráfordítást igényel, melyet a szegényebb országok nem engedhetnek meg maguknak, így akár otthonaik elhagyására is kényszerülhetnek (IPCC, 2019).

A jövőben kifejezetten fontos a gleccserek elemzése is, mivel a klímában bekövetkező változásokra rendkívül gyorsan reagálnak. Az óceánokkal való kapcsolatukat is lényeges kiemelni, ugyanis az elmúlt évszázadban az olvadás által több vizet juttattak az óceánba, mint a grönlandi és az antarktisi jégolvadás együttvéve (Gregory et al., 2013). A hatalmas mértékű jégolvadás miatt változások mennek végbe a szélrendszerekben is. A melegedés következményeként módosulnak a nyomási értékek, mely a szelek irányának és erősségének

átalakulását vonja maga után (Olason and Notz, 2014). Ez felgyorsíthatja a tengeri jég sodródásának sebességét, amely így távolabb sodródhat a fagyott régióktól, gondot okozva ezzel a vízi közlekedésnek.

A permafroszt olvadásának is rengeteg negatív hatása van a jövőre nézve. Legfontosabb kiemelni az erdőtüzek számának növekedését, mely a fagyott föld elvékonyodásának eredményeképpen játszódik le. Becslések szerint a 21. században az alaszakai tundra évente átlagosan leégett területe 270 km²-ről 500–610 km²-re fog növekedni (Hu et al., 2015), de a világ számos pontján hasonló következményekkel kell számolnunk. Fontos még megemlíteni a jégben megőrzött metánt, mely az olvadással a légkörbe jut, és hozzájárul a globális felmelegedés erősödéséhez, mivel igen jelentős üvegházhatású gáz. Egy 2017-es modell alapján 2100-ra az északi metán kibocsátás évente 18 Tg-ról (1 teragram = 1 millió tonna) 42 Tg-ra fog növekedni (Zhang et al., 2017).

Az óceánok melegedése az élővilágra is nagy hatással van, leginkább azokra az állatokra, melyek természetes élőhelye a hűvösebb területeken található. Bár ez fajonként különböző, a legnagyobb befolyás a bálnákra és a krillpopulációra nehezedik (Tulloch et al., 2019), melyek száma drasztikusan csökkenni fog a következő évtizedekben, így fejtve ki nagy hatást a tápláléklánc többi részére (Klein et al., 2018).

Az emberiség nagyjából 10%-a van közvetlen kapcsolatban a poláris régiókkal és a magashegységek hóval és jéggel fedett területeivel, 28% a part menti területeken él, míg 11% a tengerszint alatt több mint 10 méterrel (IPCC, 2019), így az itt élők vannak a legnagyobb mértékben kitéve az éghajlat – és így a krioszféra – változásainak. A technológia fejlődésével a krioszférát megfigyelő eszközök is pontosabbá váltak, melyek segítségével könnyebben meghatározható a változás mértéke és ebből kifolyólag a következmények is.

A jég olvadása rengeteg környezeti katasztrófát és gazdasági kárt okoz, mely sok ezer ember életét és megélhetését veszélyezteti. Az 1985 és 2018 közötti időszakban a part menti erózió nagyjából 1 cm-rel növekedett évente (IPCC, 2019). Az óceánok kémiai úton is változást mutatnak, savasodnak, mely a tengeri ökoszisztéma megváltozásához, a tápláléklánc felborulásához vezet. Hasonló következményekkel jár az óceánok felmelegedése is, mely különösen veszélyes a korallokra, a hínárra és az algákra. A jég kiterjedésének csökkenése az érintett állatok élőhelyét, vadászterületét is veszélybe sodorja. A permafroszt hőmérséklete is növekszik, mely nemcsak az állatokra veszélyes: mivel a jég térfogata nagyobb, mint a vízé,

ezért amikor a jég elolvad, kisebb helyet foglal el, így az erre a területre épített utak beszakadhatnak, a házak összeomolhatnak, az itt élőket komoly baj fenyegeti (IPCC, 2019).

Szakedolgozatom célja, hogy bemutassam a krioszféra különböző elemeit, ezek globális skálán betöltött szerepét, illetve azt, hogy ezek a jelenben milyen változásokon mennek keresztül, valamint, hogy a jövőben milyen következményekre számíthatunk. Az első részben a krioszféra tagjairól és ezek szerepéről számolok be, valamint részletesen bemutatom a jégfuratokat, történelmüket és ezek fontosságát, továbbá azt, hogy napjainkban milyen módon történik a furatok elemzése. A második és a harmadik fejezetben az Arktisz és az Antarktisz múltbeli változásaira mutatok rá és összehasonlítom a két területet. A negyedik fejezetben a hegyi gleccserekre térek ki, végül pedig a permafroszt helyzetét szemléltetem. Szakedolgozatom befejezéséként összefoglalom a krioszféra megváltozásának várható jövőbeli, globális következményeit.

2. A krioszféra fogalma és kutatásának története

2.1. A krioszféra elemei

Krioszférának (1. ábra) nevezzük a Földön elhelyezkedő hó- és jégtakarót. Részei valamennyi kontinensen megtalálhatók, fontosságukat pedig az adja, hogy a Föld teljes édesvíz készletének nagyjából 70%-át raktározzák el. Elemei közé tartozik az időszakos szárazföldi hótakaró, a tengeri jég, az állandó jégborítottságú Antarktisz és Grönland, a hegyi gleccserek és a legalább 2 évig fagyott terület, a permafroszt (2. ábra).

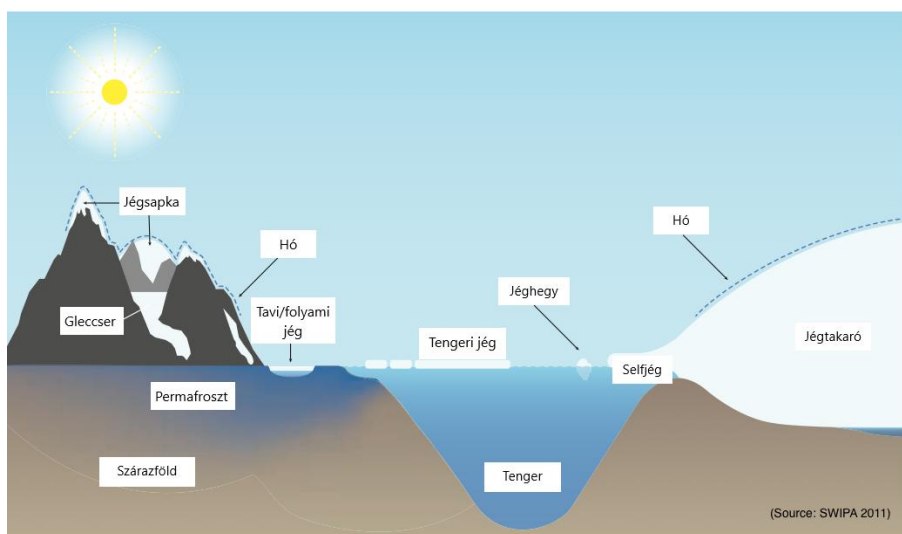
A fent említettek közül a szárazföldi hótakaró reagál a leggyorsabban a légkörben lejátszódó dinamikai folyamatokra, ez néhány naptól néhány hétig terjedő időintervallumot jelent. A hótakaró eltárolt hőmennyisége globális skálán igen csekély, viszont nagyon fontos éghajlati hatása van, mégpedig az, hogy a beérkező napsugarak nagy részét visszaveri, tehát nagy albedóval rendelkezik.

A tengeri jég ennél lassabban, évszakos időskálán reagál az éghajlati folyamatokra, a hőegyenlegben betöltött szerepe viszont hasonló a szárazföldi hótakaróhoz. Legfontosabb hatása az, hogy segít a mélytengeri víztömegek rétegződésének kialakulásában. A tengeri jég olvadása nem von maga után tengerszint emelkedést.

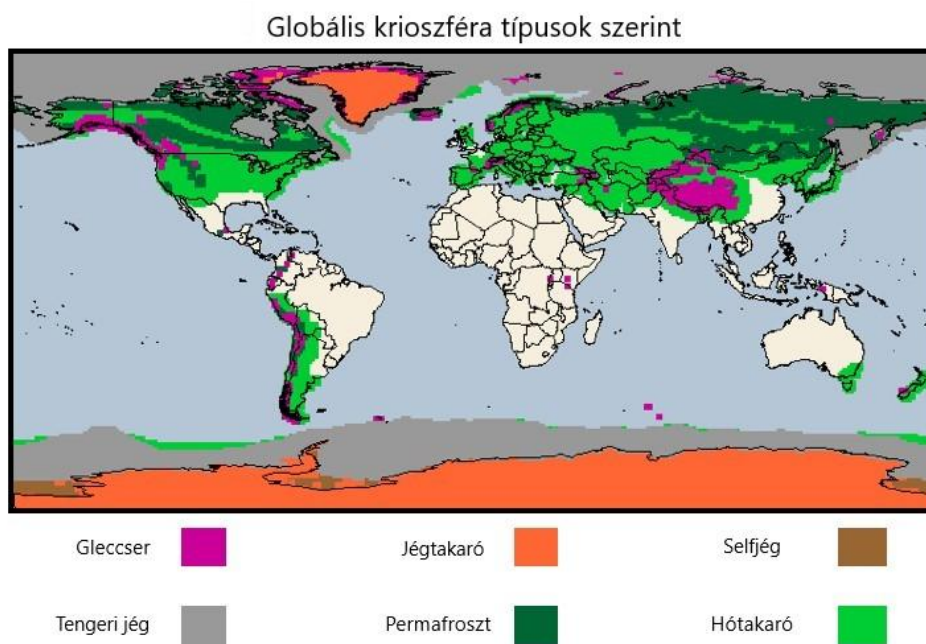
A Grönlandon és az Antarktiszon található hatalmas mennyiségű szárazföldi jég elolvadása ezzel ellentétben jelentős mértékű vízszint-emelkedéshez vezet. Grönland jegének elolvadása 7 méterrel, míg az Antarktisz jegének eltűnése 70 méterrel növelné meg a globális tengerszintet. Ezen területek legfőbb tulajdonsága az, hogy a Föld teljes édesvíz készletének 80%-át tartalmazzák, ezért a hidrológiai ciklusban jelentős a tározó szerepük (Bartholy et al., 2011).

A krioszféra kis részét képezik a hegyi gleccserek, melyek az éghajlat változásaira gyorsan reagálnak, továbbá Grönlandhoz és az Antarktiszhoz hasonlóan eltárolják az édesvizet. Olvadásuk szintén tengerszint emelkedést eredményez.

A permafroszt fontos szerepet tölt be a termohalin cirkuláció alakításában, mivel nagymértékben befolyásolja a tengerbe ömlő folyók vízhozamát és ezzel nagy hatással van az adott területek ökoszisztémájára is (Bartholy et al., 2011).



1. ábra: A krioszféra részei
 (Forrás: <https://globalcryospherewatch.org/about/cryosphere.html>)



2. ábra: A krioszféra elemeinek területi eloszlása
 (Forrás: <https://globalcryospherewatch.org/about/cryosphere.html>)

2.2 A jégfuratok története és elemzése

2.2.1. A jégfuratok fontossága

A jég birodalmának történelmét a jégfuratok által ismerhetjük meg. A gleccserek a leesett hó felhalmozódásából keletkeznek, melynek rétegei az idő múlásával összepréselődnek és egybefüggő jeget alkotnak. Ezek a rétegek viszont eltérnek egymástól mind kémiai, mind pedig a textúrájukat tekintve. A jég apró légbuborékokat is megköt az évszázadok-évezredek alatt, amiknek kiemelt szerepük van a jégfuratok elemzésénél. A buborékok megőrzik az adott időszak fontos információit, mint például a lokális hőmérsékletet, a légkör összetételét, kémiai jellemzőit, az üvegházhatású gázok koncentrációját, valamint a vulkanikus aktivitást és a naptevékenységet is (<https://icecores.org/about-ice-cores>). A jégfuratok analizálásával a tudósok pontos képet kaphatnak a múlt éghajlatáról, és – ami talán még fontosabb – ez alapján a jövőről is képesek precízebb előrejelzéseket készíteni.

2.2.2. Jégfuratok története

A krioszféra viselkedése már elég régóta foglalkoztatja a tudósokat, egészen az 1840-es évekig kell visszamenni ahhoz, hogy lássuk az első tudományos céllal történő próbálkozásokat, melyek Louis Agassiz, svájci-amerikai biológus és geológus nevéhez fűződnek. Ebben az időben a tudományos világ értetlenül állt ahhoz, hogy miért „folynak” a gleccserek (Clarke, 1987). A jégbe zárt szikladarabok ugyanis évről-évre lejjebb helyezkedtek el a gleccseren, melyet Franz Josef Hugi egy nagy kőtömbön demonstrált, mely 1827 és 1836 között 1315 métert „vándorolt”. A szkeptikusok természetesen elvetették azt a lehetőséget, hogy a gleccser jege mozgott volna, szerintük a szikla csak lecsúszott a jégár felszínén.

Agassiz kezdetben csak hőmérsékleti méréseket tervezett a gleccser belsejében, később viszont szakmai elhivatottságának tekintette a gleccserek mozgásának bebizonyítását és a mozgás sebességének meghatározását. Ezt úgy akarta elérni, hogy a jégfuratokba vasból készült rudakat helyezett, ezek elhajlásából határozta meg a gleccserjég változását. Az 1840 és 1842 között zajló munkálatokat sok tényező hátráltatta, mint például a felszerelés megrongálódása, a fúrólukak elhajlása és a munkások alacsony száma. Az általa fúrt legmélyebb lyuk 43 méter mély volt (Agassiz, 1866), mellyel nem ért el komolyabb eredményt.

Agassiz kutatásának kudarca elvette a tudósok kedvét a további próbálkozásoktól. Jelentős kísérleteket csak bő 50 évvel később R. Fitzgerald tett, aki az általa tervezett, kézzel működtetett fúrófej végére pengéket illesztett, így gyorsítva fel a fúrást. Egy másik tudós, Erich von Drygalski Grönland nyugati felén végzett méréseket egy speciális fúrófejjel, melynek pengéje spirál alakú volt és az eszközhöz további elemeket is lehetett illeszteni (Talalay, 2016). A jég elmozdulását bambusz rudakkal próbálták meghatározni. A legmélyebb furat végül 2,25 méter mély volt, de a tudós szerint ennél mélyebbre is juthattak volna.

1894-ben Adolf Blümcke és Hans Hess sorozatos kutatásokat kezdtek meg a Hintereisgleccseren. Mivel Agassiz óta nem volt komolyabb kutatás a jégfúrás terén, semmiféle példa nem állt rendelkezésükre, amit követhettek volna, ezért egy sörfőzde hűtőkamrájában kísérleteztek különböző fúrófejekkel. A Drygalski által tervezett fúrót is elemezték és kipróbálták, ez azonban túl gyengének bizonyult ahhoz, hogy hosszabb ideig tartó fúrásokat végezzenek vele. Saját fúrót készítettek tehát, melynek spirális pengékkel felszerelt fejét egy karral forgatták (3. ábra), hogy a kifúrt jeget felhúzzák a felszínre, ezt a módszert viszont hamar elvetették, mivel túlzottan időigényes volt. Ehelyett a fúrót bizonyos időközönként felhúzták és egy csövet engedtek a helyére, vizet pumpálva a lyukba, ami így felemelte a jeget és a felszínre hozta. Ez egy teljesen új módszer volt, melynek tökéletesítése sok próbálkozással és hibával járt, de még így is sikerült elérniük a 40 méteres mélységet. A következő évben átalakították a fúrót úgy, hogy a közepén át a víz fel tudott áramlani a felszínig, így a jeget a fúró kiemelése nélkül tudták kinyerni a furat aljából (Blümcke and Hess, 1899).



3. ábra: Hans Hess által használt fúró
(Forrás: Blümcke and Hess, 1910)

A fúrást sok probléma kísérte: a jég mozgása miatt a lyuk eldeformálódott, így a fúró rendszeresen beszorult; sokszor kődarabokat hozott fel a furatba pumpált víz, mely nem tett jót a pengék állapotának. A legnagyobb akadályt viszont az üregek jelentették. Amikor ugyanis egy ilyen üreghez ért a fúró, a víz fennakadt a lyukban és a feldarabolódott jég nem tudott távozni, mely hátráltatta a fúró további működését. Blümcke és Hess erre egy új módszert dolgoztak ki, mely szerint egy csővel kiszivattyúzzák a vizet, ez azonban túl költségesnek és nehezen kivitelezhetőnek bizonyult, mivel akárhányszor előfordult volna ez a probléma, annyiszor kellett volna használni az új, ám drága technikát.

1899-ben aztán két helyen is sikerült elérniük a gleccser alját egy 66 és egy 85 méter mély furattal. Ezt a sikert elég meggyőzőnek találta a Német és Osztrák Alpesi Klub ahhoz, hogy támogatást nyújtson a további kutatásokhoz, és hogy továbbfejlesztett felszerelést biztosítson a fúráshoz, mely 1901-től állt rendelkezésükre. Az egyik legjelentősebb ilyen fejlesztés során a fúró szélére is pengéket szereltek, mely lehetővé tette, hogy az eldeformálódott furatok újbóli kifúrása során a fúrófej ne szoruljon be. Problémák azonban így is adódtak, mivel a felfejlesztett felszerelés csaknem 4000 kg volt, ennek szállítása és a csapat fenntartása igen költségessé tették a kutatást (Blümcke and Hess, 1899).

Blümcke és Hess munkásságával egyidőben, 1897-ben egy másik tudós, Émile Vallot egy 7 kilogramm tömegű fúróval 25 méter mély lyukat fúrt, mellyel bizonyította, hogy egy könnyű szerkezettel is nagy eredményeket lehet elérni. Eleinte csak 1 métert haladtak óránként, viszont egy 20 kilogrammos fémrúd hozzáadásával ezt 2 méterre növelték. A fúrás technikája is megemlítené, hiszen a forgó mozgás mellett a fúrót felemelték és hagyták beleesni a lyukba, így alakítva ki gyakorlatilag egy kezdetleges ütvefúrót (Vallot, 1898).

A 20. század elejére a jégfúrás nagy hírnévnek örvendett főleg a tudomány terén, de egy pont után a munkák elakadtak. Az okot a már említett Drygalski példáján lehet jól szemléltetni. 1902-ben ugyanis a grönlandi kutatásai során könnyedén elérte a 15 méteres mélységet, azonban utána a jég annyira kemény volt, hogy a fúráshoz használt víz a lyukba való visszajuttatása után azonnal megfagyott, mely ellehetetlenítette a fúró rotációját (Drygalski von, 1904).

1905-ben egy svájci meteorológus, Paul Mercanton azt tanácsolta a kutatóknak, hogy a fúró forgását és a víz pumpálását is benzinmotorral végezzék, így megrövidítve a fúrás időtartamát (Mercanton, 1905). Azt már korábban észrevették, hogy a lyuk mélyedésével a vízpumpa nehezebben használható és több ember szükséges a működtetéséhez. Továbbá, Blümcke és

Hess fűrója 60 liter vizet igényelt percenként, mely Mercanton ötletével ennek 5%-a alá lehetett volna csökkenteni úgy, hogy a kifolyt vizet visszaengedik a fűrófejhez, így csökkentve a víz iránti igényt. Ezzel a módszerrel 11 lyukat fűrtak és nagy eredményeket értek el: a legmélyebb lyuk mélysége elérte a 224 métert (Clarke, 1987), valamint a gleccserjég mozgását is tudták demonstrálni, melynek sebessége a gleccser felszínén volt a legnagyobb (Talalay, 2016).

A fentebb említett probléma arra ösztönözte a kutatókat, hogy új módszert dolgozzanak ki. 1942-ben Mario Calciati a Hosand- és a Miage-gleccseren használta azt a technikát, mely szerint egy fafűtéses bojlerrel a furatba juttatott vizet felmelegítették, így az nem tudott megfagyni (termálfúrás). Az újítás sikeresnek bizonyult: óránként 4 métert tudtak lefelé haladni, és a gleccserjég alját is elérték egy 119 méter mély furattal (Nizery, 1951). 1946-ban aztán ezt a technikát egy francia tudós, René Koechlin továbbfejlesztette, és megalkotta az elektro-termál fűrőt, melynél – nevéből adódóan – elektromossággal melegítették fel a vizet (Koechlin, 1946). A fűrófejbe egy kábelt vezettek, melyen keresztül bele tudták vezetni a vízbe az áramot, így növelve meg a fűrés hatékonyságát. Ezzel a módszerrel 2,1 métert fűrtak a jégbe óránként.

1938-ban Gerald Seligman, Tom Hughes és Max Perutz hőmérsékleti kutatásokat végeztek a Berni-Alpokban, a 3466 méter magas, úgynevezett Jungfrauoch átjárónál (Seligman, 1941). A céljuk az volt, hogy megvizsgálják a hó firnhóvá és a firnhó jéggé alakulását a mélység növekedésével. 20 méter mély aknákat fűrtak és furatokat is kialakítottak Hans Ahlmann, svéd geográfus tanácsait követve. 1948-ban Perutz visszatért a gleccserhez, hogy meghatározza a gleccserjég elmozdulását. A terve az volt, hogy fémrudakat helyez a jégbe, melyhez a következő, illetve az azutáni évben visszatér, így a rúd elmozdulásából elemezni tudta a jég helyváltoztatását különböző mélységekben. A kísérlethez egy amerikai vállalat, a General Electric szállította volna a víz melegítéséhez szükséges alkatrészt, mely azonban későn érkezett a kijelölt helyre. Perutz-nak ezért személyesen kellett elmennie az alkatrészeért, melyet a visszafelé vezető vonatúton véletlenül kiejtett az ablakon, Calais környékén. Egyik munkatársa egy cserkészcsoporthoz szervezett, hogy megtalálják az elveszett részt, de az nem került elő. A gleccseren található kutatócsoport vezetőjének ajánlására Perutz felkeresett Bernben egy embert, aki biztosította számára az alkatrészt. 1948 júliusában kezdték el a munkálatokat és két hét alatt sikerült elérniük a gleccserjég alját egy 137 méter mély furattal. A munkálatokat most is sok dolog hátráltatta: a fűrőt kétszer kellett kiemelni a furatból, egyszer egy csavarkulcsot kellett kiszedni a lyukból, a másik alkalommal pedig a vízmelegítő

eszköz hevült túl. 1950-ig végeztek kutatásokat (4. ábra), az eredmények pedig azt mutatták, hogy a gleccserjég a felszínén mozdult el a legnagyobb mértékben (Gerrard et al., 1952).



4. ábra: Különböző fúrófejek az 1950-es évekből
(Forrás: Ract-Madoux and Reynaud, 1951)

Az 1960-as években F. Howorka új típusú fúrót tervezett, mely a gőz erejét használta fel a fúráshoz (Howorka, 1965). Erre azért volt szükség, mert a kifúrt lyuk egy idő után eldeformálódott és az újbóli kifúrása időigényes volt. Az újítás sikerességét bizonyítja, hogy 30 perc alatt 8 méteres lyukat tudtak kialakítani.

A 60-as évektől kezdve egyre nagyobb újításokat végeztek a jégfúrás terén. A termál és az elektro-termál fúrók hatékonyabban működtek és 1966 júniusára sikerült elérni az 1391 méteres mélységet. A fúrófejekből, annak érdekében, hogy a jeget felolvassák, etilén-glikolt engedtek a furatba, így nagy mélységeket sikerült elérni. De nem csak a technikán változtattak; a fúrórudak tömegén is módosítani kellett, hiszen egy több tonnás szerkezet megmozgatása túl idő- és energiaigényes volt. Ezért az 1980-as évekre elterjedtek az olyan fúrók, melyeknek tömege méterenként 1 kilogramm volt.

A technológia fejlődésével az 1990-es évekre már nagyon korszerű fúrókat terveztek: ezeket egy motor működtette és egy rugót is szereltek rá, mellyel vertikális vibrációt tudtak kialakítani, ami a forgó mozgással együtt rendkívül hatékonynak bizonyult, 6–8 méter/perces sebességgel tudta a jeget kifúrni.

2.2.3. Jégfuratok vizsgálata napjainkban

A Föld valamennyi kontinensén végeznek fúrásokat, nagyrészüket viszont főleg az Antarktiszról és Grönlandról származik. Itt található a legnagyobb összefüggő jégtakarók, ahonnan több mint 3 kilométeres jégfuratot használnak fel. A mélyebb fúrásokat kétféle módszerrel végzik: mechanikus- és termálfuratokkal. A mechanikus fúrók (5. ábra) egyszerű felépítésűek, egy forgó fúrófejből állnak, melyet egy elektromechanikus motor vezérel. A termálfúrók (6. ábra) egy felhevített fúrófejjel rendelkeznek, mellyel a furat körülötti jeget olvasztják meg. A két módszer közötti különbség a használatukban is megmutatkozik: a mechanikus fúrókat hidegebb környezetben használják, ahol a jég $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ alatt van, a termálfuratókat pedig melegebb jégnél alkalmazzák. Ha azonban csak a jég felső 20–30 méter mély rétegéből akarnak kinyerni adatokat, a kézi fúrókkal (7. ábra) ez egyszerűbben megoldható. Általában egy 'T' alakú, forgatható rúddal végzik ezt, de motorral működtetett is gyakran vesznek igénybe. Előbbi módszerrel a fent említett mélységet lehet elérni maximálisan, míg az utóbbival akár 40 méter mélyre is lejutathatják a fúrót (<https://icecores.org/about-ice-cores>).



5. ábra: Mechanikus fúrófej
(Forrás: <https://icecores.org/about-ice-cores>)



6. ábra: Termálfúró
(Forrás: <https://icecores.org/about-ice-cores>)



7. ábra: Kézi fúró működésbe helyezése Grönlandon
(Forrás: <https://icecores.org/about-ice-cores>)

A jégfuratok tárolását, ellenőrzését és elemzését a The National Science Foundation Ice Core Facility (NSF-ICF) végzi. Legfontosabb feladatuk, hogy a fent említetteket biztonságosan és szakszerűen vigyék véghez. Jelenleg összesen 17000 méter jégfuratot tárolnak nagyjából 1500 m²-en és -36°C-on (8. ábra). Amikor egy újonnan szállított furat megérkezik, óvatosan kivesszük a tartójából és vizsgálat alá vetik. Erre a tudósok egy 350 m² területű vizsgálótermet

használnak, melyet állandó -25°C -on tartanak. A vizsgálat időtartama függ a jég szerkezetének bonyolultságától, naponta átlagosan 30–35 méter jégfuratot elemeznek, melyet, ha egy 1000 méter hosszú furatra vetítünk, ez nagyjából 6–8 hét tanulmányozást vesz igénybe. Az elemzés azonban sok fontos információt hordoz. Segítségével összehasonlítható a krioszféra múlt-, jelen- és jövőbeli helyzete, melyekben kifejezetten nagy eltérést találunk.



8. ábra: A jégfuratok tárolása
(Forrás: <https://icecores.org/about-ice-cores>)

3. Arktisz

3.1 Az Arktisz fogalma és fontossága

Az Arktisz a Föld északi részén elhelyezkedő terület, melynek legnagyobb részét a Jeges-tenger foglalja el, de az északi országok szárazföldi tájait is magába foglalja. Több definíciót is használnak a határának kijelölésére, az általánosan elfogadott megfogalmazást a 10 C°-nál alacsonyabb júliusi középhőmérséklettel rendelkező területekre használjuk (9. ábra).



9. ábra: Az Északi-sarkvidék területi elhelyezkedése a júliusi középhőmérséklet alapján (piros görbe)

(Forrás: <https://nsidc.org/cryosphere/arctic-meteorology/arctic.html>)

A terület fontosságát az adja, hogy hideg jellegének köszönhetően hűti a bolygót, illetve mérsékli a klímát. A hóval és jéggel borított területek magas albedóval rendelkeznek, vagyis a napsugarak által szállított hő 80%-át visszaverik, továbbá a tengeráramlatokkal is igen szoros kapcsolatban állnak, mivel ezek az áramlatok választják el ezen térségeket a szárazföldtől, így a melegebb régióktól is (<https://nsidc.org/cryosphere/quickfacts/seaiice.html>). Fontos még kiemelni, hogy az itt található állatok nagy része sehol máshol a Földön nem fordul elő, így a régión bekövetkező változások könnyen a kihalás szélére sodorhatnak sok, a táplálékláncban kiemelkedő szerepet betöltő fajt.

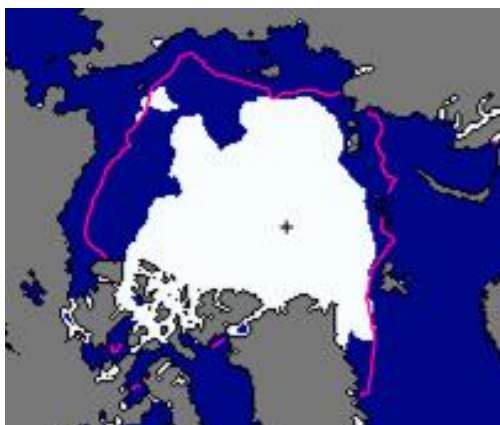
3.2. Változások az elmúlt időszakban

Az Északi-sarkvidék hóval és jéggel borított területei az elmúlt évtizedek során drasztikus változásokon mentek keresztül, melyekért főleg az üvegházhatású gázok kibocsátása a felelős (IPCC, 2019). E területek felett elhelyezkedő légréteg ugyanis sokkal érzékenyebben reagál a légkörben lejátszódó folyamatokra, amit jól szemléltet az a tény, hogy az elmúlt két évtized alatt a Föld ezen része kétszer gyorsabb ütemben melegedett, mint a bolygó többi területe (Notz and Stroeve, 2016). A melegedés következményeként a hó- és jégtakaró valamint a tengeri jég olvadni kezd, mely csökkenti a terület albedóját. A légkör vízgőztartalma is növekszik, mely az északi térségek feletti felhőborítottságot változtatja meg (Goosse et al., 2018) oly módon, hogy sokkal több vihar kialakulását teszi lehetővé (Dickson et al., 2000).

Ezek a módosulások ún. visszacsatolási mechanizmust idéznek elő: az elolvadt hó által megjelenő víz és szárazföld több hőt képes elnyelni a napsugárzásból, mely így még nagyobb melegedéshez vezet, a folyamat gyakorlatilag önmagát gyorsítja. Ugyanez történik akkor, amikor a korábban jégbe fagyott állatok és növények kiolvadnak, így metánt és szén-dioxidot juttatnak a légkörbe, valamint a már említett vízgőz mennyiségének növekedése is hasonló eredményt mutat, hiszen a vízgőz üvegházhatású gáz (<https://nsidc.org/cryosphere/seaice/index.html>).

Az északi-sarki tengeri jég az 1980-as évektől kezdve folyamatosan gyengül (Barber et al., 2017), melyet az is elősegít, hogy – az Antarktisszal ellentétben – a jég nem tud nagy területen szétterjedni, mivel az északi kontinensek szárazföldi területei útját állják. A jégveszteség leginkább a nyári időszakban mutatkozik meg, hiszen ekkor van a legmelegebb a területen. Ezen periódus alatt az olvadás a Kelet-szibériai-tengeren megy végbe a legnagyobb mértékben (Onarheim et al., 2018), míg télen a Barents-tengerre gyakorol nagy hatást (Onarheim and Árthun, 2017).

A melegedés mértékét könnyedén szemléltethetjük, ha összehasonlítjuk az 1981 és 2010 közötti időszak átlagos minimum jégborítottságát a 2016-os év ugyanazon időszak minimum jégborítottságával (10. ábra).



10. ábra: Az Északi-sarkvidék jégborítottságának összehasonlítása 2016-ban (fehér terület) és az 1981–2010 közötti időszakban (lila görbe által határolt terület)
(Forrás: <http://nsidc.org/arcticseaicenews/2016/>)

Az ábrán jól látható, hogy kiemelkedően magas az eltérés a két említett időszak között. A problémát az okozza, hogy ennek a területnek a felmelegedése a Föld valamely pontjára kifejti hatását a tengeráramlatok és az óceánokban található só közvetítésével. Ezen két elem körforgását nevezzük termohalin cirkulációnak, melynek legfontosabb szerepe, hogy a kontinensek időjárását egyensúlyban tartja. Alapvető mechanizmusa a víz hőmérsékletén és sótartalmán alapszik. Az Egyenlítő környékén lévő melegebb víz az északi területek felé áramolva lehül, sűrűsége megnő és lesüllyed. Ezután visszaáramlik az Egyenlítő felé, ahol ismét felmelegszik, csökken a sűrűsége és a felszín felé áramlik, ezzel bezárva a kört. Amikor az északi részek vize melegedésnek indul, közvetlen hatást fejt ki erre a cirkulációra. A melegedés által kiváltott jég olvadása során édesvíz kerül az óceánokba, melynek sűrűsége kisebb, így nem süllyed le, mely megszakíthatja a cirkulációt. Ennek rengeteg negatív következménye lehet, mivel az időjárásra való befolyása miatt az egész bolygón érezheti hatását (<https://nsidc.org/cryosphere/quickfacts/seaice.html>). A probléma súlyosságát jól szemlélteti a tény, hogy a Grönlandon található jég nagyjából 186 gigatonnát veszített évente a tömegéből a 2003 és 2010 közötti időszakban (Kjeldsen et al., 2015).

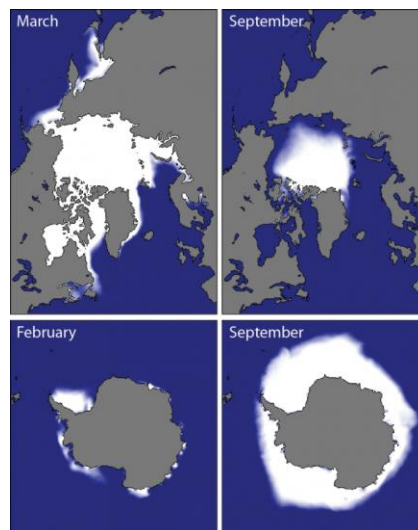
4. Antarktisz

4.1. Szerepe és változása

Bár az Antarktisz viszonylag távol helyezkedik el a többi kontinenstől, hatását hasonló módon tudja érvényesíteni, mint az Arktisz, az áramlatoknak köszönhetően. Fontosságát az adja, hogy a Föld teljes jégborítottságának 90%-át teszi ki, valamint az édesvíz készlet 70%-ával rendelkezik (Fretwell et al., 2013). Kiemelt szerepe van a légnyomásnak, a levegő nedvességének és hőmérsékletének, valamint a szélrendszereknek a szabályozásában. Elemzésének bonyolultsága abban rejlik, hogy, míg nyugati része drasztikus változásokon megy keresztül és kétszer-háromszor gyorsabban melegszik a globális átlagnál, addig a keleti régió átlagon aluli melegedést mutat (Turner et al., 2014). Említésre méltó a nyugati térrész változása, ahol megfigyelések kezdete óta a 12 selfjég közül 3 jelentős mértékben visszahúzódott, 4 pedig összeomlott, ezzel a tengeri jég 18%-a tűnt el (Cook és Vaughan, 2010).

4.2. Összehasonlítása az Arktisszal

Azt gondolhatnánk, hogy a Föld két poláris régiója hasonló módon játszik szerepet a bolygó életében és paramétereikben is megegyeznek, azonban ez nem így van. Ha összehasonlítjuk a két területet, sok eltérést figyelhetünk meg (11. ábra).

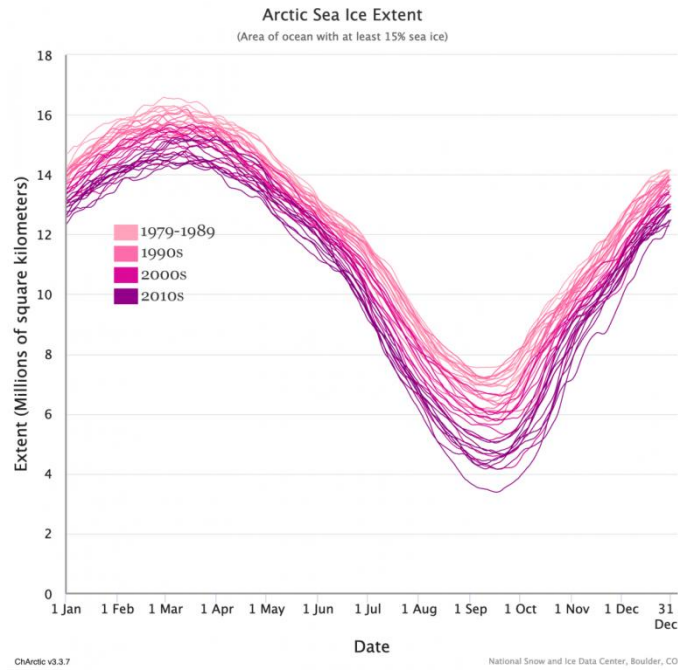


11. ábra: Az Arktisz (felső képek) és az Antarktisz (alsó képek) minimum (jobb felső illetve bal alsó kép) és maximum (bal felső illetve jobb alsó kép) jégborítottságának összehasonlítása (Forrás: <https://nsidc.org/cryosphere/seaice/characteristics/difference.html>)

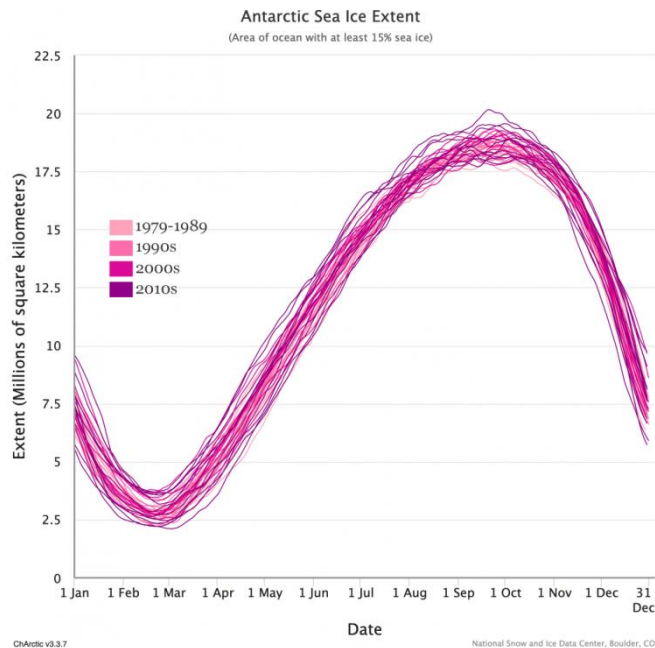
A legelső szembetűnő különbség a már korábban említett tengeri jég kiterjedésére való lehetőség, aminél a két rész gyakorlatilag teljes ellentéte egymásnak. Az Arktisz jége csupán a szárazföldre tud terjedni, ez egyfajta gátat jelent a jég további terjedésének, így maximalizálva a területét. Bár megemlítendő, hogy sok olyan rész található itt, mely átvészeli a nyári olvadást és télen tovább növekszik, tehát az itt található tengeri jég viszonylag lassan húzódik vissza. Az Arktisz maximális kiterjedése nagyjából 15 millió km², nyáron pedig ez 7 millió km²-re csökken. Ezzel ellentétben az Antarktisz nem szárazföld, hanem óceán veszi körül, mely sokkal szabadabb utat biztosít a tengeri jég terjedésének, amely így északabbra vándorol. A melegebb vizekhez érve gyors olvadásnak indul és gyakorlatilag a tengeri jég nagy hányada eltűnik. Az antarktisi tengeri jég legnagyobb kiterjedése 18 millió km², melyet szeptemberben ér el, míg a tél végi területe csupán 3 millió km². A jég olvadásának sebességéhez köthető az a tény, hogy az északi régiók jége 2–3 méter vastag, míg délen ez 1–2 méterre tehető.

Különbséget találunk a csapadékban is, melynek oka a térségek környezetére vezető vissza. Mivel az északi poláris régió nagy részét szárazföld veszi körbe, ezért a csapadék is csekély, kivételt a jég pereme képez, mely kapcsolatban áll az északi országok jégmentes térrészeivel. Ezzel ellentétben a délen található fagyott területek szoros kapcsolatban vannak az óceánnal, így a csapadék mennyisége is jelentősen nagyobb, mint északon, melyhez az is hozzáadódik, hogy a lehullott hó tömege miatt a jéggel borított régió széle a víz alá süllyedhet, így néhány területet sós óceánvíz önt el.

További szembeötlő eltérést láthatunk a két térrész maximum és minimum jégborítottságú időszakai között (12. és 13. ábra).



12. ábra: Az arktiszi jég kiterjedése 1979 és 2010 között az egyes évtizedekben
(Forrás: <https://nsidc.org/cryosphere/seaice/characteristics/difference.html>)



13. ábra: Az antarktisi jég kiterjedése 1979 és 2010 között az egyes évtizedekben
(Forrás: <https://nsidc.org/cryosphere/seaice/characteristics/difference.html>)

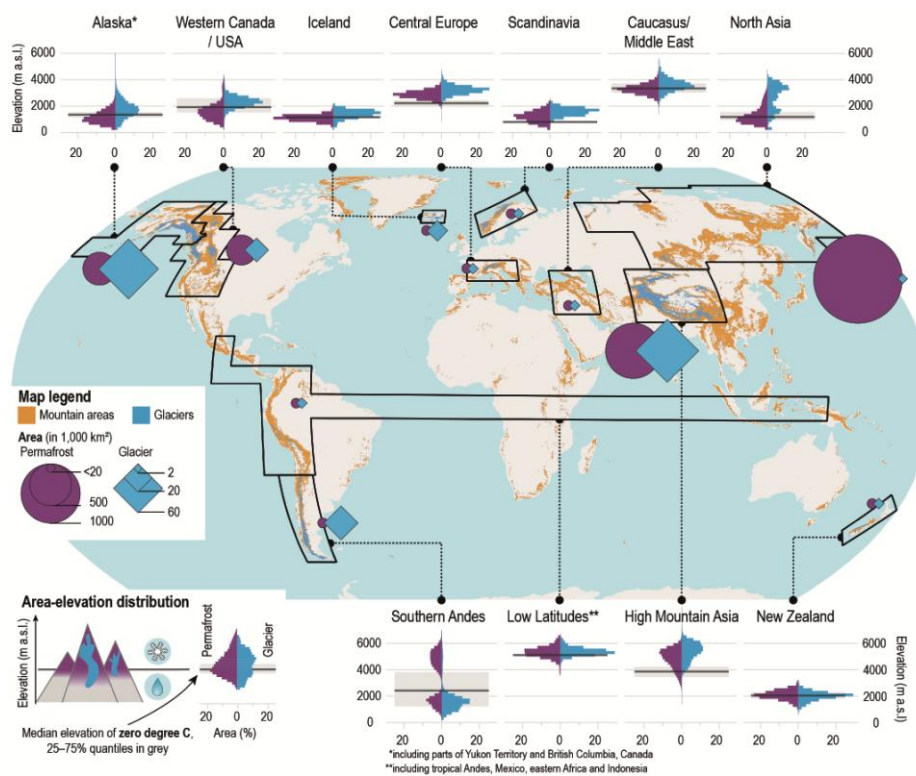
Mindkét régió jégborítottságának kiterjedése hasonló évi menetet követ. Északon a maximum a tél végi időszakban található, míg a minimum szeptemberben, délen pedig pont fordítva zajlik le ez a folyamat. Két további információ is kiemelhető az ábrákról. Az Antarktisz jegére

vonatkozó görbék (13. ábra) sokkal inkább együtt futnak, ami azt jelenti, hogy nem tapasztalható drasztikusan nagy változás a jéggel borított területek kiterjedésében az évtizedek során. A minimum és a maximum kiterjedés között viszont jóval nagyobb különbség mutatkozik, mint az Északi-sark vidék jegénél, amely azt jelenti, hogy a jégborítottság nagyobb intervallumban módosul az adott év során. Továbbá megállapítható, hogy az Arktiszra vonatkozó ábra (12. ábra) görbéi az idő múlásával egyre távolabb helyezkednek el egymástól, mely arra utal, hogy azokon a térrészeken jelentős visszaesés figyelhető meg (<https://nsidc.org/cryosphere/seaice/characteristics/difference.html>).

5. Hegyi gleccserek

5.1. Elhelyezkedésük

A hegységek hóval fedett vidékei (14. ábra) az emberiség nagyjából 10%-ának adnak otthont, mely 2016-ban 671 millió embernek felelt meg. Ez a szám 2050-re becslések szerint 736–844 millióra fog emelkedni (Jones and O’Neill, 2016). A krioszféra ezen részeinek megváltozása viszont nemcsak az itt élőket veszélyezteti, hanem a hegységek lábánál, illetve a területéről lejtő folyók partja és torkolata mentén lakókat is (Huggel et al., 2015).



14. ábra: A hegységek elhelyezkedése a Földön, valamint az adott területek gleccsereinek (kék) és a permafrosztnak (lila) az aránya (Forrás: IPCC, 2019)

5.2. Változások és következményeik

A hegységekben a legnagyobb problémát a földfelszín melegedése jelenti, az elmúlt néhány évtizedben ugyanis átlagosan 0,3 C°-kal nőtt e területek hőmérséklete. Ennek következményeként a hóval fedett időszak évtizedenként átlagosan nagyjából 5 nappal

csökkent, ebben a legnagyobb változást az alacsonyabb magasságokban találjuk. A gleccserek olvadása nagy eltéréseket mutat az egyes hegységek között, de minden esetben negatív tömegváltozásról beszélhetünk. A 2006–2015 közötti időszakban körülbelül 123 gigatonna volt évente a Földön elhelyezkedő hegységek jégvesztesége. (IPCC, 2018).

A negatív következmények nagy része nem a természetre veszélyes, hanem a hegységekben, illetve ezek közelében élőkre, a kockázatot pedig jelentősen növeli, hogy a hegyi turizmus az elmúlt években nagymértékű virágzásnak indult. A lejtőket borító hó és jég olvadásnak indulása növeli a lavinaveszélyt, továbbá amikor az eső a fagyott talajon folyik le, nagy erejű áradattá alakulhat, mely szintén az emberek életét veszélyezteti. A gyors olvadásnak köszönhetően az erdőtüzek kiterjedése és száma is növekszik, mivel a növények előbb jelennek meg a talajon, így növelve meggyulladásuk kockázatát. Ez főleg az USA nyugati felén lakókat sújtja (IPCC, 2018).

A mezőgazdaságnak (mely a hegységekből lejövvő folyók vizét használja a növények és állatok vízigényének kielégítésére) is komoly veszélyekkel kell szembenéznie. A téli periódusban ugyan a több csapadék miatt a folyók vízhozama nő, nyáron ezzel ellentétben ez a mennyiség jelentősen csökken, így a mezőgazdasági tevékenység is akadozik.

A hegységek élővilága is változásokon megy keresztül a gleccserek visszahúzódása és a permafroszt olvadása miatt. A térségek átalakulása a helyi tápláléklánc megváltozását idézi elő, mely főleg az állatvilágot érinti. Azok a ragadozók ugyanis, melyek természetes élőhelye a hegységek magasabb, hófedte régióiban található, feljebb kényszerülnek menni, így több teret adnak a nekik áldozatul eső növényevőknek, melyek populációja folyamatos növekedésnek indul. A növények szempontjából nézve a kialakult helyzetről pozitívan beszélhetünk, hiszen a permafroszt visszahúzódása a bioszféra ezen részének burjánzásához vezet.

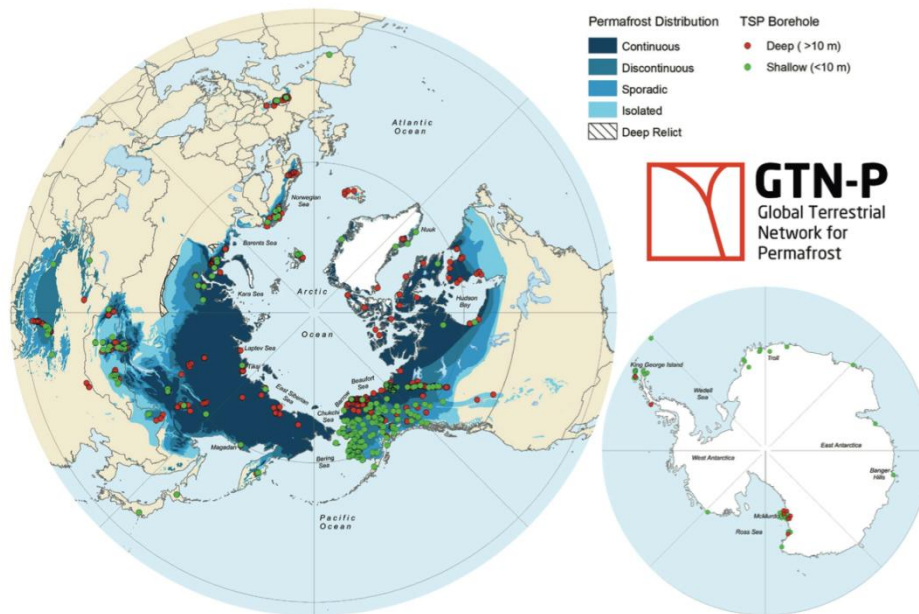
A társadalomra és így a turizmusra vonatkozó veszélyek közül kiemelhetjük a téli sportokat választók számának csökkenését. Ez egyrészt a lejtők veszélyesebbé válásának következményeként tudható be, másrészt pedig, hogy a hó olvadása miatt a síparadicsomok már nem tudják kihasználni a lejtők adta előnyöket, mivel hóborítottság nélkül a téli sportok jelentősen veszítenek az élvezetükből, a turistáknak nem éri meg befektetni erre (IPCC, 2018).

Így gyakorlatilag elmondható, hogy a hegyi gleccsereket borító hó- és jégtakaró megváltozása a lokális bioszféra minden tagjára hatással van valamilyen szinten. Bár a növényzet egy

részének előnyére válik, az ott élő emberek és az állatvilág érdekében fontos lenne gyors és határozott lépéseket tenni a folyamat megfékezésére.

6. Permafroszt

Permafrosztnak nevezzük azon talajokat, melyek 2, vagy annál több évig fagyott állapotban vannak. Az északi hemiszférán nagyjából 23 millió km² a kiterjedése ezeknek a területeknek. Ehhez hozzátartozik még az alaszakai régió 80%-a valamint az Antarktika csupasz, jéggel nem borított földterületei is (15. ábra).



15. ábra: A permafroszt elhelyezkedése a Földön
(Forrás: Brow et al., 1997)

A permafrosztnak kiemelt szerepe van arra a területre nézve, melyen elhelyezkedik, ugyanakkor a föld összetétele is hatást gyakorol a permafrosztra. A földben található tőzeg (mely akkor keletkezik, amikor az elhalt növények nem bomlanak le megfelelően) az alatta lévő réteget hidegen tartja és segít a felső réteg hőcseréjében a légkörrel. A permafroszt állapotát sok más tényező is befolyásolja, az adott terület növényzetétől kezdve a folyókon és tavakon keresztül egészen az adott rész klímájáig (Zhang et al., 2003).

Az utóbbi években a kutatók rekord magas hőmérsékleteket mértek a permafroszt területein (AMAP,2017). Globális skálán a 2007–2016 közötti időszakban átlagosan 0,29 C°-kal növekedett ezen területek hőmérséklete, de volt példa olyan területre is, ahol 2–3 C°-kal magasabb hőmérsékletet mértek, mint 30 évvel ezelőtt (Biskaborn et al., 2019). A melegedés

gyorsuló ütemére konkrét példaként megemlíthető a Dél-Amerikában fekvő Ojos del Salado vulkáni komplexum, melyen a permafroszt már csak rendkívül vékony, csupán néhány centiméteres rétegre terjed ki (Nagy et al., 2018). A fagyott föld globális elemzésében azonban bizonytalanságok is megmutatkoznak, hiszen az egyes területek más-más módon és ütemben változnak, így például a föld aktív rétegének vastagságának növekedése nem minden permafroszt területre igaz (Shiklomanov et al., 2012).

A fagyott területek olvadása súlyosan érinti a légkört is, hiszen a jég rengeteg metánt és széndioxidot tárol magában apró buborékok formájában (Schuur et al., 2015). Az északi hemiszférán található permafroszt megközelítőleg 1600 petagramm (1 petagramm 10^{12} kilogrammnak felel meg) szenet raktároz el (Schuster et al., 2018), ennek felszabadulása pedig a légkörre kifejezetten nagy veszélyt jelent. Továbbá a gyakori hóhullámok is gondot okozhatnak, hiszen ezek alkalmával a permafroszt legyengül, így a felette elhelyezkedő növényzet is korábban olvad fel, ezáltal az erdőtüzek is előbb kialakulhatnak. A leginkább érintet területek Alaszka és Kanada nyugati része (IPCC, 2019).

7. Összefoglalás

Összességében elmondható, hogy az utóbbi évtizedekben a krioszféra változása jelentős mértékben felgyorsult. Mivel részei a Föld összes kontinensén megtalálhatók, ezért a bolygó valamely pontjára kifejti hatását, a jövőben ez pedig csak erősödni fog. E hatás leginkább a bioszférát érinti, mely maga után von sok negatív következményt. A jövőben sok állatfaj kihalásával és a tápláléklánc megváltozásával kell számolnunk. Az időjárás változása is a jég olvadásának eredménye, mely már az emberiséget közvetlen módon is veszélyezteti az extrém időjárási jelenségek számának gyarapodása folytán. Szerencsére elmondható, hogy az utóbbi évtizedekben a témával kapcsolatos cikkek, könyvek és hírek száma is növekedett, így a probléma fokozatosan beíródik a köztudatba és eljut a világ valamely pontjára. Egyre több ember ismeri fel a helyzet súlyosságát és érti meg, hogy cselekvés nélkül a katasztrófa elkerülhetetlen. Gyakorlatilag életünk minden részére hatással van, mely megmutatkozik a mezőgazdaságban és az iparban is, a tengeri forgalom miatt a közlekedésben, a lakóhelyeken, sőt, még a politikában is. Mindannyiunk felelőssége tehát, hogy a folyamatot lelassítsuk, amennyire lehet, mert megállítani sajnos már nem tudjuk.

Dolgozatomban bemutattam a krioszféra elemeit, valamint a jégfuratok történetét és elemzését. Részletesen beszámoltam az Arktisról és az Antarktiszról, ezen két terület közötti különbségekről és jelenbeli változásaikról. Ismertettem a hegyi gleccsereken történt változásokat és ezek várható következményeit. Betekintést nyújtottam a permafroszt területeibe, és ezek módosulásainak lehetséges kihatásaira. Végül pedig összefoglaltam munkámat.

8. Irodalomjegyzék

Agassiz, L., 1866: Geological Sketches. Ticknor and Fields, Boston. 323 pp.

AMAP, 2017d: Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA). Arctic Council Secretariat, Oslo, 269 pp.

Barber, D. G., Meier, W. N., Gerland, S., Mundy, C. J., Holland, M., Kern, S., Li, Z., Michel, C., Perovich, D. K., Tamura, T., 2017: Arctic Sea Ice. In: Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA). Arctic Monitoring and Assessment Programme, Oslo, pp. 103–136.

Bartholy, J., Haszpra, L., Horányi, A., Mika, J., Pongrácz, R., Práger, T., Szentimrey, T., Szépszó, G., 2011: Globális éghajlatváltozás. (Szerk.: Bartholy, J., Bozó, L., Haszpra, L.). Egyetemi jegyzet. Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszék, Budapest, pp. 11–37.

Biskaborn, B. K., Smith, S. L., Noetzli, J., Matthes, H., Vieira, G., Streletskiy, A., Schoeneich, P., Romanovsky, V. E., Lewkowicz, A. G., Abramov, A., Allard, M., Boike, J., Cable, W. L., Christiansen, H. H., Delaloye, R., Diekmann, B., Drozdov, D., Etxelmüller, B., Grosse, G., Guglielmin, M., Ingeman-Nielsen, T., Isaken, K., Ishikawa, M., Johansson, M., Johannsson, H., Joo, A., Kaverin, D., Kholodov, A., Konstantinov, P., Kröger, T., Lambiel, C., Lanckman, J. P., Luo, D., Malkova, G., Meiklejohn, I., Moskalenko, N., Oliva, M., Phillips, M., Ramos, M., Sannel, A. B. K., Sergeev, D., Seybold, C., Skryabin, P., Vasiliev, A., Wu, Q., Yoshikawa, K., Zheleznyak, M., Lantuit, H., 2019: Permafrost is warming at a global scale. *Nature Communications*, 10. 264.

Blümcke, A., Hess, H., 1899: Untersuchungen Am Hintereisferner. Deutschen und Österreichischen Alpenvereins. Deutschen und Österreichischen Alpenvereins, München, 105 pp.

Blümcke, A., Hess, H., 1910: Tiefbohrungen am Hintereisgletscher 1909. In: *Zeitschrift für Gletscherkunde, für Eiszeitforschung und Geschichte des Klimass* (Szerk: Brückner, E.). Gebrüder Borntraeger, Grenoble. 66–70 pp.

Brow, J., Ferrinas, O. J., Heginbottom Jr, J. A., Melnikov, E. S., 1997: Circumarctic map of permafrost and ground ice conditions. United States Geological Survey, Map CP-45, scale 1:10,000,000.

Clarke, G. K. C., 1987: A short history of scientific investigations on glaciers. *Journal of Glaciology*. 33. 4–24.

Cook, A. D., Vaughan, D. G., 2010: Overview of areal changes of the ice shelves on the Antarctic Peninsula over the past 50 years. *Cryosphere*, 4. 77–98.

Dickson, R. R., Osborn, T. J., Hurrell, J. W., Meincke, J., Blindheim, J., Adlandsvik, B., Vinje, T., Alekseev, G., Maslowski, W., 2000: The Arctic Ocean response to the North Atlantic Oscillation. *Journal of Climate*, 13. 2671–2696.

Fretwell, P., Pritchard, H. D., Vaughan, D. G., Bamber, J. L., Barrand, N. E., Bell, R., Bianchi, C., Bingham, R. G., Blankenship, D. D., Casassa, G., Catania, G., Callens, D., Conway, H., Cook, A. J., Corr, H. F. J., Damaske, D., Damm, V., Ferraccioli, F., Forsberg, R., Fujita, S., Gim, Y., Gogineni, P., Griggs, J. A., Hindmarsh, R. C. A., Holmlund, P., Holt,

J. W., Jacobel, R. W., Jekins, A., Jokat, W., Jordan, T., King, E. C., Kohler, J., Krabill, W., Riger-Kusk, M., Langley, K. A., Leitchenkov, G., Leuschen, C., Luyendyk, B. P., Matsuoka, K., Mouginot, J., Nitsche, F. O., Nogi, Y., Nost, O. A., Popov, S. V., Rignot, E., Rippin, D. M., Rivera, A., Roberts, J., Ross, N., Siegert, M. J., Smith, A. M., Steinhage, D., Studinger, M., Sun, B., Tinto, B. K., Welch, B. C., Wilson, D., Young, D. A., Xiangbin, C., Zirizzotti, A., 2013: Bedmap2: improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica. *The Cryosphere*. 7. 375–393.

Gerrard, J.A.F., Perutz, M. F., Roch, A., Taylor, G. I., 1952: Measurement of the velocity distribution along a vertical line through a glacier. *Proceedings of Royal Society of London*, 213. 546–558.

Goosse, H., Kay, J. E., Armour, K. C., Bodas-Salcedo, A., Chepfer, H., Docquier, D., Janko, A., Kushner, P. J., Lecomte, O., Massonnet, F., Park, H. S., Pithan, F., Svensson, G., Vancoppenolle, M., 2018: Quantifying climate feedbacks in polar regions. *Nature Communications*, 9. 1919.

Gregory, J. M., White, N. J., Church, J. A., Bierkens, M. F. P., Box, J. E., van den Broeke, M. R., Cogley, J. G., Fettweis, X., Hanna, E., Huybrechts, P., Konikow, L. F., Leclercq, P. W., Marzeion, B., Oerlemans, J., Tamisiea, M. E., Wada, Y., Wake, L. M., van de Wal, R. S. W., 2013: Twentieth-century global-mean sea level rise: Is the whole greater than the sum of the parts? *Journal of Climate*. 26 (13), 4476–4499.

Hock, R., Rasul, G., Adler, C., Cáceres, B., Gruber, S., Hirabayashi, Y., Jackson, M., Kääb, A., Kang, S., Kutuzov, S., Milner, A., Molau, U., Morin, S., Orlove, B., Steltzer, H., 2019: High Mountain Areas. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)].

Howorka, F., 1965: Instruments and methods: a steam-operated drill for the installation of ablation stakes on glaciers. *Journal of Glaciology*, 5 (41), 749–750.

Hu, F. S., Higuera, P. E., Duffy, P., Chipman, M. L., Rocha, A. V., Young, A. M., Kelly, R., Dietze, M. C., 2015: Arctic tundra fires: natural variability and responses to climate change. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 13. 369–377.

Huggel, C., Carey, M., Clague, J. J., Kääb, A., 2015: *The high-mountain cryosphere.: Environmental changes and human risks*. Cambridge University Press, Cambridge, 868 pp.

IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.-O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P. R., Pirani, A., Moufouma-Okia, W., Péan, C., Pidcock, R., Connors, S., Matthews, J. B. R., Chen, Y., Zhou, X., Gomis, M. I., Lonnoy, E., Maycock, T., Tignor, M., Waterfield T., (eds.)]. World Meteorological Organization, Geneva, 32. pp.

IPCC, 2019: Technical Summary [Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Alegría, A., Nicolai, M., Okem, A., Petzold, J., Rama, B., Weyer, N. M., (eds.)]. In: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in*

a Changing Climate [Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Alegría, A., Nicolai, M., Okem, A., Petzold, J., Rama, B., Weyer, N. M., (eds.)].

Jones, B., O'Neill, B. C., 2016: Spatially explicit global population scenarios consistent with the Shared Socioeconomic Pathways. *Environmental Research Letters*, New York, 11. 1748–9326.

Kjeldsen, K. K., Korsgaard, N., Bjork, A. A., Khan, S. A., Box, J. E., Funder, S., Larsen, N. K., Bamber, J. L., Colgan, W., van den Broeke, M., Siggaard-Andersen, M. L., Nuth, C., Schomacker, A., Andresen, C. S., Willerslev, E., Kjaer, K. H., 2015: Spatial and temporal distribution of mass loss from the Greenland Ice Sheet since AD 1900. *Nature*, 528. 396–400.

Klein, E. S., Hill, S. L., Hinke, J. T., Phillips, T., Watters, G. M., 2018: Impacts of rising sea temperature on krill increase risks for predators in the Scotia Sea. Department of Agriculture and Water Resources.

Koehlin, R., 1946: Procédé pour sonder les glaciers et installation pour sa mise en oeuvre. *Revue de Géographie Alpine*, 35. 385–386.

Mercanton, P. L., 1905: Forages glaciaires. *Archives des Sciences Physiques et Naturelles*. 367–379, 451–471 pp.

Meredith, M., Sommerkorn, M., Cassotta, S., Derksen, C., Ekaykin, A., Hollowed, A., Kofinas, G., Mackintosh, A., Melbourne-Thomas, J., Muelbert, M. M. C., Ottersen, G., Pritchard, H., Schuur, E. A. G., 2019: Polar Regions. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Alegría, A., Nicolai, M., Okem, A., Petzold, J., Rama, B., Weyer, N. M., (eds.)].

Nagy, B., Kovács, J., Ignéczi, Á., Beleznai, Sz., Mari, L., Szalai, Z., 2018: Mi történik a Föld legmagasabban fekvő sivatagának aljzatában? - Az aktív réteg hőmérsékleti elemzése a Száraz-Andokban. In: Aktuális környezeti problémák az időjárás és az éghajlat összefüggésében. *Egyetemi Meteorológiai Füzetek*. 30. 138–149.

Nizery, A., 1951: Electrothermic rig for the boring of glaciers. *Eos, Transactions American Geophysical Union, American Geophysical Union*, 32. 66–72.

Notz, D., Stroeve, J., 2016: Observed Arctic sea-ice loss directly follows anthropogenic CO₂ emission. *Science*, 354. 747–750.

Olason, E., Notz, D., 2014: Drivers of variability in Arctic sea-ice drift speed. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119. 5755–5775.

Onarheim, I. H., Årthun, M., 2017: Toward an ice-free Barents Sea. *Geophysical Research Letters*, 44. 8387–8395.

Onarheim, I. H., Eldevik, T., Smedsrud, L. H., Stroeve, J. C., 2018: Seasonal and regional manifestation of Arctic sea ice loss. *Journal of Climate, American Meteorological Society*, 31. 4917–4932.

Oppenheimer, M., Glavovic, B. C., Hinkel, J., van de Wal, R., Magnan, A. K., Abd-Elgawad, A., Cai, R., Cifuentes-Jara, R., DeConto, R. M., Ghosh, T., Hay, J., Isla, F., Marzeion, B.,

- Meysignac, B., Sebesvari, Z., 2019: Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Alegria, A., Nicolai, M., Okem, A., Petzold, J., Rama, B., Weyer, N. M., (eds.)].
- Ract-Madoux, M., Reynaud, L., 1951: L'exploration des glaciers en profondeur. *La Houille Blanche*, 1951. 299–308.
- Schuster, P. F., Schaefer, K. M., Aiken, G. R., Antweiler, R. C., Dewild, J. F., Gryziec, J. D., Gusmeroli, A., Hugelius, G., Jafarov, E., Krabbenhoft, D. P., Liu, L., Herman-Mercer, N., Mu, C., Roth, D. A., Schaefer, T., Striegl, R. G., Wickland, K. P., Zhang, T., 2018: Permafrost Stores a Globally Significant Amount of Mercury. *Geophysical Research Letters*, 45. 1463–1471.
- Schuur, E. A. G., McGuire, A. D., Schädel, C., Grosse, G., Harden, J. W., Hayes, D. J., Hugelius, G., Koven, C. D., Kuhry, P., Lawrence, D. M., Natali, S. M., Olefeldt, D., Romanovsky, V. E., Schaefer, K., Turetsky, M. R., Treat, C. C., Vonk, J. E., 2015: Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature*. 520. 171–179.
- Seligman, G., 1941: The structure of a temperate glacier. *The Geographical Journal*, 97. 295–315.
- Shiklomanov, N. I., Streletskiy, D., Nelson, F. A., 2012: Northern Hemisphere component of the global Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) program.
- Talalay, P. G., 2016: *Mechanical Ice Drilling Technology*. Springer Singapore, Peking, 284 pp.
- Tulloch, V. J. D., Plagányi, É. E., Brown, C., Richardson, A. J., Matear, R., 2019: Future recovery of baleen whales is imperiled by climate change. *Global Change Biology*, 25. 1263–1281.
- Turner, J., Barrand, N. E., Bracegirdle, T. J., Convey, P., Hodgson, D. A., Jarvis, M., Jenkins, A., Marshall, G., Meredith, M. P., Roscoe, H., Shanklin, J., French, J., Goose, H., Guglielmin, M., Gutt, J., Jacobs, S., Kennicutt, M. C., Masson-Delmotte, V., Mayewski, P., Navarro, F., Robinson, S., Scambos, T., Sparrow, M., Summerhayes, C., Speer, K., Klepikov, A., 2014: Antarctic climate change and the environment: an update. *Polar Record*, 50. 237–259.
- Vallot, J., 1898: Exploration des moulins de la mer de glace: Forage de M. Émile Vallot. *Annales de l'Observatoire météorologique du Mont-Blanc, Párizs*, 190–193 pp.
- von Drygalski, E., 1904: *Zum Kontinent des eisigen Südens*. G. Reimer, Berlin, 668 pp.
- Zhang, Z., Zimmermann, N. E., Stenke, A., Li, X., Hodson, E. L., Zhu, G., Huang, C., Poulter, B., 2017: Emerging role of wetland methane emissions in driving 21st century climate change. *National Academy of Sciences*, 114. 9647–9652.
- Zhang, T., Heginbottom, J. A., Barry, R.G., Brown, J., 2000: Further statistics on the distribution of permafrost and ground ice in the northern hemisphere. *Polar Geography*, 24. 126–131.

Zhang, T., Barry, R. G., Knowles, K., Ling, F., Armstrong, R. L., 2003: Distribution of seasonally and perennially frozen ground in the Northern Hemisphere. *Permafrost*, 2. 1289–1294.

Internetes hivatkozások:

<https://climate.nasa.gov/vital-signs/sea-level>

<https://globalcryospherewatch.org/about/cryosphere.html>

<https://icecores.org/about-ice-cores>

<https://nsidc.org/cryosphere/arctic-meteorology/arctic.html>

<https://nsidc.org/cryosphere/quickfacts/seaice.html>

<https://nsidc.org/cryosphere/seaice/index.html>

<https://nsidc.org/arcticseaicenews/2016/>

<https://nsidc.org/cryosphere/seaice/characteristics/difference.html>

9. Köszönetnyilvánítás

Mindenekelőtt szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, Dr. habil. Mészáros Róbertnek, aki útmutatásával, szakmai tudásával és lelkiismeretes munkájával hozzájárult szakdolgozatom létrejöttéhez.

Hálámat szeretném kifejezni családom és rokonaim valamennyi tagjának, akik motiváltak az egyetemen eltöltött időszakom alatt, és segítettek előrehaladásomat.

Végül pedig szeretném megköszönni barátaimnak és szaktársaimnak, amiért támogattak és bátorítottak szakdolgozatom elkészítésében.