

FOGYATKOZÓ FAGYOTT FÖLDEK

# Olvad a világunk!?

Az éghajlatváltozásról hallva elsőként a sarki jégsapkák olvadása és a hőmérséklet emelkedése juthat az eszünkbe. A veszélyeztetett területek lakói viszont inkább a permafroszt területek felolvadását, vagy a jégmezők zsugorodása következtében megemelkedő, hamarosan lakott területeket veszélyeztető tengerszintet emlegetné a kifejezés hallatán, mint a globális felmelegedés társadalomra gyakorolt legsúlyosabb következményeit.

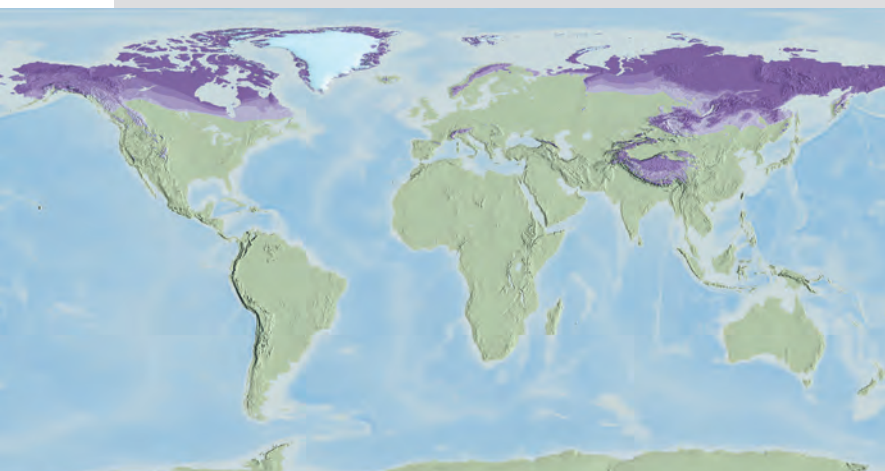
## Az „örök” fagy birodalma

A Föld hatalmas állandó fagy uralta területei sok milliárd tonna üvegházhatású gázt tartanak fogva, amely most a kutatók figyelmeztetése szerint a globális felmelegedés hatására kiszabadulhat. A permafroszt (örök- vagy állandó fagy) a fagyott talajréteget jelöli, amely leginkább az északi-féltekét borítja, ahol a szárazföld mintegy negyedét teszi ki, kora pedig általában több ezer év. Az északi-sarkkör és a boreális erdőségek között húzódó széles sáv Alaszkán, Kanadán, Észak-Európán és Oroszországon ível keresztül (1. ábra). A déli féltekén szinte alig-alig találunk a permafrosztra emlékeztető területeket, köszönhetően a keskenyebb kontinensrészeknek és a gyérebb talajtakarónak. Mélységét tekintve a néhány méteres vastagságtól egészen a több mint 100 méteresig terjedhet.

A permafrosztban közel  $1,7 \cdot 10^{12}$  tonna szén található megfagyott szerves anyag formájában. Amikor az állandó fagy felenged, a benne őrzött organikus összetevők bomlani kezdenek, a magukban raktározott szén pedig szén-dioxid és metán – a két legjelentősebb üvegházhatást okozó gáz – formájában kibocsátják. A fagyott talaj nagyjából kétszer annyi szenet tartalmaz, főként az említett gázok révén, mint amennyi a légkörben található. Úgy gondolják, hogy e készletek többsége meglehetősen közel található a felszínhez.

A permafrosztból felszabaduló gázok egy ördögi kör csíráját jelenthetik, amely veszélyeztetheti a 2015-ös párizsi megállapodás céljainak megvalósítását is, amelyben a hőmérséklet-emelkedés maximumát  $1,5^\circ\text{C}$ -ban határozták meg. A  $\text{CO}_2$  a legnagyobb mennyiségben előforduló globális felmelegedésért felelős

1. ábra. A permafroszt területi eloszlása bolygónkon  
(Forrás: NASA)



2. ábra. Egy rénszarvascsoport elpusztult egyedei hordozhatták a gyilkos kórt

gáz, a hó csapdázásában viszont a metán 25-ször hatékonyabb. Bármely gázból is jut több a légkörbe, az tovább mélyítené a problémákat, hatásukra ugyanis fokozódhat az olvadás, következtében pedig még több szén-dioxid és metán szabadul fel, és így tovább. Ha a felmelegedés mértéke a megállapodásban foglaltak szerint stabilizálna is  $1,5^\circ\text{C}$  körül, a permafroszt 30%-a 2100-ig mindenképpen eltűnne.

Az állandó fagy olvadása a felszabaduló üvegházhatású gázok mellett régen elfeledett és jégbe fagyott vírusok és baktériumok felszabadulásával is fenyeget. Sajnos erre már akad példa a közelmúltból is. 2016-ban Észak-Szibériában egy gyerek lépfenében vesztette életét, a kutatók pedig megállapították, hogy 70 évvel ezelőtt eltemetett, ám a permafroszt olvadása nyomán előkerült rénszarvas tetemek hordozhatták a baktériumot (2. ábra). A kutatók olyan további, a jég fogságában szunnyadó kórokozókra figyelmeztetnek – ilyen például a himlő – amelyek a felmelegedés hatására újjáéledhetnek.

## Ingoványos talajon

Az olvadás természetesen nem csak az emberekre, hanem az általuk alkotott építményekre is kedvezőtlen hatású, különösen az olaj- és bányáipar, valamint az infrastruktúra sínlyi meg ezt a folyamatot.

Hasonló probléma kezd kibontakozni az Északkelet-Szibériában található Jakutföld egyik leghidegebb orosz városában, Jakutszkban, ahol az éghajlatváltozás hatására a fagyott talaj olvadása már komolyabban veszélyezteti a lakóépületek biztonságát. Jakutszkban az átlaghőmérséklet a legutóbbi évszázadhoz képest mintegy 2,5°C-kal emelkedett, állítják az itteni Melnikov Permafroszt Intézet kutatói. Ez a világ egyetlen, kizárólag ezzel foglalkozó intézménye. A szovjet érában épült lakótömböket betonelemekből rakták össze, amelyek oszlopokon állnak. Főként a permafroszt fűtés hatására történő felolvadásának megelőzését biztosítja. A jég által összetartott talaj ugyanis csak addig stabil, amíg benne a víz teljesen fagyott állapotban marad. A fokozódó nyári felmelegedések azonban egyre inkább felolvasztják a felső rétegeket, az elfolyósodott talajnak pedig utak, épületek, tavak és mezőgazdasági területek látják kárát (3. ábra).

Állandó fagy borítja majdnem teljes Jakutföldet – Északkelet-Szibéria Jeges-tengerig húzódó régióját – aminek területe ötször nagyobb, mint Franciaországé. (Összességében Oroszország 65%-át borítja permafroszt.) Háromszázezer fős lakosságával Jakutszk a világ legnagyobb örök fagyra épült és egyben annak olvadása miatt a legveszélyeztetettebb városa. A régebbi építésű



3. ábra. Az utak már egyre több helyen járhatatlanok

házaknál ugyanis még nem volt szempont a globális éghajlatváltozás. A 60-as években mindössze annyit írtak elő, hogy a cölöpöknek legalább 6 méter mélységig kell hatolniuk a fagyott talajba, amely az olvadás miatt napjainkban már korántsem lenne elegendő. Néhány épületet már most le kellett bontani, és még több esetben helyezik ezt kilátásba egyre romló állapotuk miatt (4. ábra). Az orosz környezeti minisztérium idén kiadott jelentése szerint a permafroszt romló állapota egyre nagyobb teherként nehezedik az emberekre és az élővilágra, emellett hatással van az ivóvíz-, szennyvíz-

és olajvezetékekre. Az olvadó örökfagy továbbá lehetőséget teremt azoknak a környezeti károkat okozó anyagoknak a gyorsabb és nagyobb mértékű elterjedésére, amelyeket eddig a felső fagyott talajréteg meggátolt abban, hogy a felszínre szivároghassanak.

A kutatóintézet föld alatti laborjaiban – melyek a permafroszt fagyos talajában kialakított alagutak és helyiségek hálózatát alkotják – a kutatók és mérnökök jelenleg is olyan építészeti megoldásokon dolgoznak, amelyek akkor is fagyott állapotban tartják a talajt, ha a légkör épp melegszik. Az egyik módszer szerint olyan függőlegesen földbe süllyesztett fém csöveket töltenének fel fagyálló anyaggal – freonnal, vagy kerozinnal – amelyeket épületek alatt vagy körül helyeznének el, végei pedig kilógnának a talajból. Télen az anyag a hideg hatására besűrűsödne, és lesüllyedne a cső aljára, lassan kiengedve pedig nyáron is hidegen, fagyott



4. ábra. Az épületek alátámasztása folyamatosan romlik

állapotban tartná a talajt. Ez a technológia azonban jelenleg még túl költséges, ráadásul az építőiparban való kötelező felhasználását a törvény még nem írja elő. Az olvadó állandó fagyott területek gyorsítják a sarkvidéki partvidékek erózióját is. Jakutföldön például évente körülbelül már 2 métert is hátrál a szárazföld.

## Az olvadó sziget

Maga az olvadási folyamat korántsem új keletű jelenség az emberi történelem során, ami leginkább aggasztóvá teszi, az inkább annak egyre gyorsuló üteme. Az északi félgömbön maradván a továbbiakban Grönland felszíni jégtakarójának csökkenéséről lesz szó, amely még a 19. század közepén kezdett felgyorsulni, a 20. század során drámaian felerősödött





5. ábra. A felolvadó jégmező felszínén lefutó vízfolyások  
(Forrás: WHOI)

és most, a 21. század elején már halvány jele sincs a mérséklődésnek. Az erről szóló tanulmány a *Nature* tudományos folyóiratban jelent meg.

„A grönlandi jégmező olvadása túlságosan előre haladt. Ennek eredményeként pedig napjainkban sokkal inkább hozzájárul a tengerszint-emelkedéshez, szemben az elmúlt három és fél évszázaddal” – mondta Luke Trusel, a Rowen Egyetem glaciológusa, a Woods Hole Oceánográfiai Intézet (WHOI) munkatársa és a tanulmány fő szerzője. Ez a folyamat pedig részben a 18. század közepén kibontakozó környezet-átalakító tevékenységünkkel állhat összefüggésben. „Az ipari forradalom kezdete óta közel 50%-os az olvadákvíz hozamának növekedése, míg a 20. század óta nagyjából 30%-os az emelkedés” – mondta Sarah Das, a WHOI glaciológusa és a tanulmány társszerzője.

6. ábra. A jégmagok tárolják a legfontosabb információkat  
(Forrás: WHOI)



A grönlandi jégvesztés az egyik kulcsszereplője a tengerszint-változásnak. A gleccserek pereméről jéghegyek szakadnak le, így az addig fagyott állapotban lévő víz utat talál az óceánba (5. ábra). Az olvadákvíz nagyja is egyrészt a gleccserekből, másrészt a magasabb területek hóval borított vidékeiről származik. Mindez pedig hozzájárul a már most sem lassú tengerszint-emelkedés további gyorsulásához.

Ahhoz, hogy a kutatócsoport a múlt századok jégolvadását tanulmányozza, a jégmezőből származó fúrómagokat használtak. Lehetőség szerint minél mélyebb jég rétegeket kerestek, hogy a mintavétel a lehető legtávolabbra nyúljon az időben. A kutatóknak végül egészen a 17. századi jég rétegekig sikerült lehatolni. Ebből kiderül, hogy a grönlandi meleg nyári napok alkalmával az olvadás javarészt a jégmező felszínén történt. Alacsonyabb magasságokban, ahol a legintenzívebb az olvadás, az olvadákvíz lefutott a jégmezőn és hozzájárult a tengerszint gyarapodásához, ennek azonban nem maradtak nyomai. Nagyobb magasságokban viszont a nyári olvadákvíz gyorsan újrafagyott, miután találkozott a fagyponthoz alacsonyabb hőmérsékletű hóval, megakadályozva ezzel a lefolyását, így különféle jeges sávokat formált, amelyek az idő múlásával sűrű jég rétegekké tömörültek és ezeket tudják most a kutatók vizsgálni.

A mintavételt követően a jégmagokat több kutatóintézetbe, köztük a Woods Hole-ba szállították, ahol azokat a szakemberek különféle fizikai és kémiai vizsgálatoknak vetették alá, hogy meghatározzák az olvadt rétegek vastagságát és korát. A jégmagokat sötét sávok tagolják, akárcsak a rovátkák a vonalzókat, lehetővé téve a kutatók számára, hogy évről évre nyomon követhessék az olvadásban bekövetkezett változásokat (6. ábra). A vastagabb olvadt rétegek az erősebb, míg a vékonyabbak a gyengébb olvadási periódusokat jelzik.

A különböző furatokból származó információt a műholdas megfigyelések adataival, valamint éghajlati modellekkel összekapcsolva a kutatók képesek lettek az évenként gyarapodó olvadt rétegekből nem csak a mintavételi területek olvadási ütemét meghatározni, hanem egész Grönlandét. Ezzel az áttöréssel pedig el tudták különíteni azokat a területeket, amelyek leginkább hozzájárulnak a tengerszint emelkedéséhez.

A jégmagokban rejlő információk azért is fontosak, mivel a napjainkban elterjedt műholdas mérések – amellyel az éghajlatváltozás hatásait leginkább nyomon követhetjük – ehhez kapcsolódó adatai mindössze az 1970-es évek végétől állnak rendelkezésre, így pusztán ezekből nincs megfelelő összehasonlítási alap a korábbi évszázadokról a kutatók számára. A mostani vizsgálat is rávilágított, hogy napjaink sarkvidéki jégolvadási ütemének növekedése történelmi kontextusba helyezve már több mint rendellenes.

SZOUCEK ÁDÁM