



Az Atlanti-óceán áramlási rendszerében történő változások hatása az éghajlatra

Bordi Sára, Szépszó Gabriella

HungaroMet Magyar Meteorológiai Szolgáltató Nonprofit Zrt., bordi.s@met.hu

DOI:10.56474/legkor.2024.K.6

Az Atlanti-óceán meridionális áramlási cirkulációja meghatározó szerepet játszik bolygónk éghajlatának alakításában, különös tekintettel Európa térségére. Mivel az óceán és a légkör folyamatos kölcsönhatásban áll egymással, a globális éghajlatváltozás az óceáni cirkulációt is módosíthatja. Az AMOC változásainak vizsgálata bonyolult feladat a kevés rendelkezésre álló műszeres mérés és a múltra vonatkozó rekonstrukciós adatok bizonytalansága miatt. Klímamodell szimulációk alapján az áramlási rendszer lassulása várható a klímaváltozás hatására a század végéig, ami összességében hűvösebb éghajlatot eredményezne Európában, mint napjainkban.

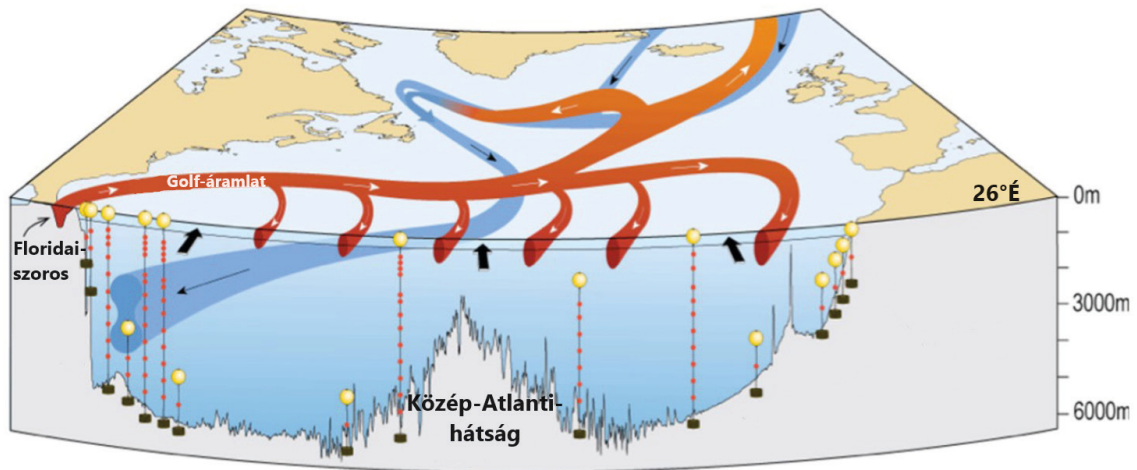
Impact of changes in the circulation system of the Atlantic Ocean on the climate

The Atlantic Meridional Overturning Circulation plays a major role in shaping the climate of our planet, especially in Europe. Because the ocean and atmosphere are in constant interaction, global climate change can also modify the ocean circulation. Investigating changes in the AMOC is a complicated task due to the insufficiency of the instrumental measurements and the uncertainty of historical reconstruction data. Based on climate model simulations AMOC is expected to slow down by the end of the century, which would result in an overall cooler climate in Europe than in present times.

Az Atlanti óceán áramlási rendszere

A légköri és óceáni áramlási rendszerek azért működnek bolygónkon, hogy a Naptól a Föld felszínére érkező, egyenlőtlen arányban eloszló sugárzás miatt fellépő hőmérséklet- és sűrűségkülönbségeket kiegyenlítsék. A két rendszer kölcsönösen, egymásra is hatással van, így az óceáni cirkulációk a szárazföldek klímájában is kulcsfontosságú szerepet játszanak.

Az AMOC (Atlantic Meridional Overturning Circulation) az Atlanti-óceán fő tengeráramlási rendszere – egy termohalin cirkuláció, ami a hőmérséklet- és a sótartalombeli különbségek kiegyenlítésére törekszik (*1. ábra*). Az Egyenlítő térségében erőteljesebb a besugárzás, emiatt a víz melegebb és az intenzívebb párolgás miatt sósabb, mint a pólusok térségében. A sűrűségkülönbségek kiegyenlítésére a felszíni vízréteg az északi félgömbön észak felé kezd áramlani



1. ábra. Az AMOC áramlási rendszer é.sz. 26°-tól északra. A piros szín a felszíni, meleg áramlatokat, a kék szín a mély, hideg áramlatokat jelöli (McCarthy et al, 2017).

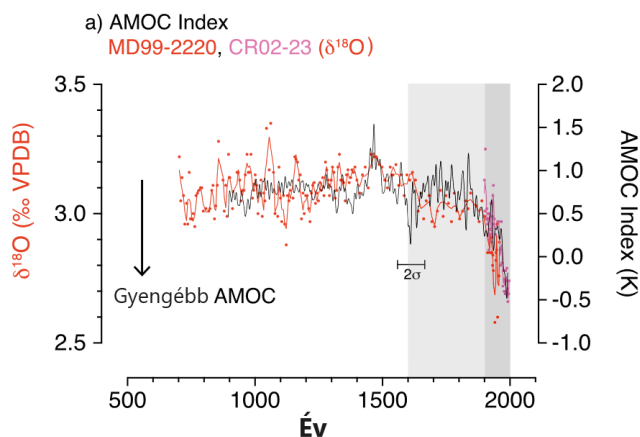
a Golf-áramlattal (a Mexikói-öböl felől Európa nyugati partja irányába), miközben többlet hőjét a légkörnek adja le. Amikor Grönland térségébe ér, már elegendő mértékben lehűl ahhoz, hogy hőmérséklete megegyezzen az óceán fenekén lévő vízrétegével, így itt az áramlás kormányzásában a hőmérséklet elveszti meghatározó szerepét. Helyette a különböző vízrétegek között fellépő sótartalombeli különbségek válnak jelentőssé, melyek vertikális irányú áramlást generálnak. Mivel az egyenlítői eredetű felszíni vízréteg sósabb – s ezáltal nehezebb –, mint a mélységi vízréteg, ezért Grönlandnál a felszíni víz süllyedni kezd, majd a mélyben az Egyenlítő térségéből kiáramló víztömeg pótlására dél felé indul meg. Mivel a leáramlás egy kis területre koncentrálódik, a poláris területek változásai a teljes óceáni cirkulációra hatással lehetnek.

Az északias irányú meleg Észak-atlanti-áramlat a Brit-szigeteken és Európa nyugati partvidékén enyhébb teleket eredményez a hasonló szélességi körökön fekvő kontinentális, partvidéktől távolabb eső térségek időjárásához képest (McCarthy et al., 2017; IPCC, 2021). A jövőben a klímaváltozás hatására bekövetkező magasabb léghőmérsékletek miatt azonban megnőhet a sós tengervízbe beáramló édes olvadékvíz mennyisége a grönlandi térségben, így a felszíni vízréteg veszítene a sótartalmából. Ez által a vízrétegek közötti sűrűségkülönbség is csökkenne, amely a függőleges irányú áramlás intenzitásának gyengülését (az átlagosan szállított víz mennyiségének csökkenését, az áramlás lassulását) eredményezné. Ekkor

az óceáni cirkuláció egyensúlya megbomlana, aminek következtében gyengülne a Golf-áramlat intenzitása is. Mivel ez táplálja az Európa térségébe érkező Észak-atlanti-áramlatot, az is megváltozna, és így az általa nagy mértékben befolyásolt szárazföldi éghajlat is.

Múltbeli változások az AMOC-ban

A több száz, több ezer évvel ezelőtti múltbeli klíma jellemzőinek meghatározására ún. *proxykat* alkalmaznak. Ezek segítségével például fossziliák fizikai, kémiai tulajdonságai alapján becsülhető bizonyos jellemzők lehetséges múltbeli alakulása (Báldi, 2006). Mivel a proxykból kinyert információ nem közvetlenül műszeres mérésekből származik, hanem köztes számításokat is végezni kell bizonyos feltételezések mellett, a megbízhatósága is sokkal kisebb, mint egy mért adatsornak. Az AMOC változásainak feltérképezésére jellemzően a tengerfelszín hőmérsékletét, a tengerszint magasságát és a sótartalmat vizsgálják. Ezekről azonban rendszeres mérések csak a kétezres évek elejétől állnak rendelkezésre, így a távolabbi múltra vonatkozóan ezeket az információkat tengeri üledékek jellemzőinek oxigén- vagy szénizotópos vizsgálatával, méretelemzéssel állítják elő. Az ilyen proxy információ alapján a múltban az AMOC mind erősségében, mind vertikális szerkezetében többször is változáson esett át, s ezek a klímában történt változásokkal is kapcsolatba hozhatók. Az egyik nevezetes klímával kapcsolatos oszcilláció, a Dansgaard-Oeschger ciklusok,



2. ábra. Az AMOC változásai a múltban proxy adatok alapján. Piros és lila pontok és vonal: a 18-as tömegszámú oxigénizotóp koncentrációváltozása különböző vizsgálatok eredményei alapján. Fekete vonal: a oxigénizotópos vizsgálatokból számított AMOC index, amely csökkenése az AMOC intenzitásának gyengülésére utal (Thibodeau et al., 2018).

a legutóbbi jégkorszakban (14–70 ezer évvel ezelőtt) több alkalommal előfordult (Dansgaard et al., 1993). A jégkorszak legintenzívebb periódusában (kb. 20 ezer évvel ezelőtt) az AMOC jelenlegi állapotához képest gyengébb volt, mely az északi félgömbön erőteljes lehűlést eredményezett, míg a déli félgömbön melegebbé hozott. A hemiszférák közti hőmérséklet-különbség azonban éppen azt segítette elő, hogy az AMOC áramlási rendszere újra megerősödjön. A jégkorszak után, kb. 8 ezer év óta az AMOC relatíve stabilnak tekinthető, de időszakos ingadozások továbbra is előfordultak (Gulev et al., 2021).

Az elmúlt évezredet tekintve az AMOC jelenleg a leggyengébb pontján van, a gyengülése feltehetően a 19. század végén kezdődött (2. ábra). A proxy adatok azonban nagy bizonytalansággal terheltek, ugyanis ezeket sok folyamat befolyásolja (pl. a levegő hőmérséklete, a légköri nyomás, a csapadékmennyiség). Emellett további bizonytalanság származik abból is, hogy az AMOC nagy változékonyságú, így a biztos, hosszú távra vonatkozó trend felállítása nehezebb feladat. Az éghajlatváltozás fizikai hátterével és folyamataival foglalkozó IPCC (2021) jelentés emiatt csak alacsony megbízhatóságot társít az elmúlt évszázadban tapasztalt gyengüléshez. 2004-től azonban már direkt mérések is rendelkezésre álltak az AMOC monitorozására, pl. tengeri bóják, műholdas információk. Ezek alapján az atlanti-óceáni áramlás intenzitása ténylegesen gyengült a 2004–2015 időszakban, ám azt, hogy

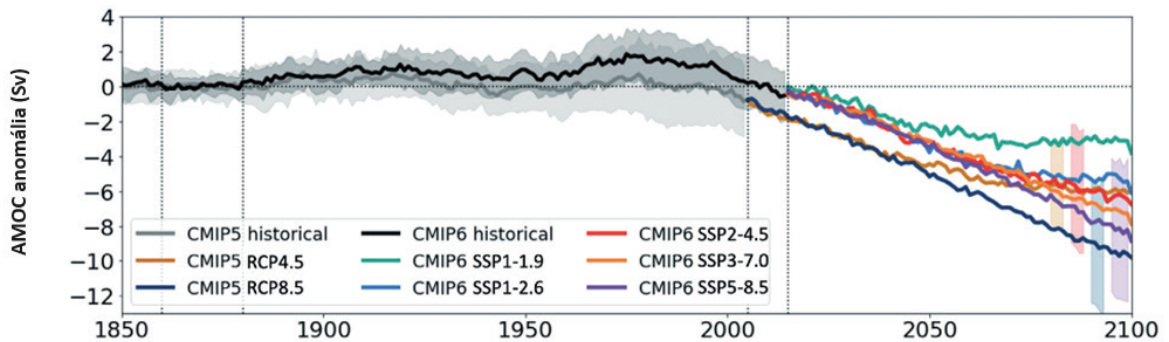
ez a gyengülés egy hosszútávú trend eredménye, vagy csak egy időszakos ingadozás, a rövid mérési időszak miatt egyelőre még nem lehet meghatározni.

Az AMOC múlt- és jövőbeli változásainak vizsgálatára klímamodell szimulációkat is alkalmaznak, így az áramlási rendszer éghajlatváltozással való kapcsolatáról is kaphatunk egy hozzávetőleges képet. A elmúlt években széleskörűen alkalmazott globális szimulációegyüttes (CMIP5) eredményeiben nem volt jelen a proxy adatokból készült rekonstrukcióban a 20. században megmutatkozó AMOC gyengülés (Cheng et al., 2013). Ennek feltehetőleg az a fő oka, hogy a szimulációk (50–350 km-es) felbontása nem kellőképpen finom ahhoz, hogy az AMOC-kal kapcsolatos örvénylő mozgásokat helyesen le tudja írni, s így alábecsli az áramlási rendszer belső változékonyságát. Az újabb, jobb (50–250 km-es) felbontású CMIP6 szimulációk esetében a rekonstrukciókhoz képest ellentétes irányú változás is megjelenik: 1940 és 1985 között az AMOC erősödését mutatják, majd 1990-től jelentkezik egy kisebb gyengülés (Menary et al., 2020). Ezek a szimulációk korszerűbb módon veszik figyelembe az aeroszol részecskék hatását, amelyek nagyobb mértékű időszakos változásokat idéznek elő, ellensúlyozva az üvegházhatású gázok koncentrációnövekedése által keltett változások gyengítő hatását. Az egyes szimulációk között nagy eltérések vannak, ami a modellek bizonytalanságára utal.

Bizonytalansággal terheltek ugyanakkor a rekonstrukciók is: a tenger felszínének hőmérsékletét például az AMOC-on kívül légköri hatások is befolyásolják, a szubpoláris áramlási körben (ahonnan a legtöbb proxy adat származik) egyéb, AMOC-tól független változékonyság is felléphet, például a szél változékonyságának hatására. Az, hogy a szimulációs eredmények és a proxy rekonstrukciók is eltérnek egymástól, tovább nehezíti a múltbeli viszonyok feltérképezését (Eyring et al., 2021; Fox-Kemper et al., 2021).

Jövőbeli projekciók a klímaváltozás tükrében

A CMIP6 modellszimulációk alapján a 19. században elkezdődött AMOC gyengülés a jövőben is folytatódni fog, de hogy milyen időtávon, azt nagyban befolyásolja a választott antropogén kibocsátási scenárió (3. ábra). Az alacsony üvegházhatású gáz kibocsátást feltételező forgatókönyvek alapján 2060 után az AMOC stabilizálódik, és nem gyengül tovább, míg a magas kibocsátással számoló scenáriók esetén az AMOC 2060 után is tovább gyengül. Mivel



3. ábra. AMOC által szállított víztömeg anomáliájának multi-modell átlaga (1 Sv = 109 kg/s) CMIP5 és CMIP6 ensemble alapján, a 35° északi szélességre vonatkozóan (Fox Kemper et al., 2021).

a termohalin cirkuláció erőssége arányos az Atlanti-óceán északi és déli medencéje között fellépő sűrűség- és nyomáskülönbséggel, a két térség jövőbeli melegedésének mértéke és ritmusa fontos meghatározó tényező a cirkuláció intenzitásában, stabilitásában (Weijer et al., 2019). Megfigyelések alapján a poláris területek már eddig is nagyobb mértékben melegedtek, mint az Egyenlítő térsége, és a klímamodellek szerint a két térség közti hőmérsékletkülönbség a jövőben tovább fog csökkenni (Rantanen et al., 2022), így a cirkuláció gyengülése is várható. Kibocsátási scenáriótól függően az AMOC intenzitás csökkenésének várható mértéke kb. 24–39% lesz 2100-ig. Annak az esélye, hogy a cirkuláció teljesen leálljon, és az AMOC rendszere összeomoljon 2100 előtt, a mai modelleredmények alapján kicsi, 2300-ra viszont bekövetkezhet. Itt azonban fontos megjegyezni, hogy a CMIP6 szimulációk nem veszik figyelembe a grönlandi édes olvadékvíz beáramlását, ami több tanulmány szerint is nagy mértékben gyengítheti az AMOC intenzitását, így a leállás esélyét is megnövelheti (Lohmann and Ditlevsen, 2021).

Ditlevsen és Ditlevsen (2023) más módszert alkalmazott az esetleges leállás bekövetkezésének tanulmányozására: vizsgálatukban a Hadley Centre 1870 és 2020 közötti tengerjég- és tengerfelszín-hőmérséklet re-analízis idősorán (Rayner et al., 2003) hajtottak végre elemzéseket. Megközelítési módjuk alapja, hogy úgy tekintik, az AMOC jelenleg egyensúlyi állapotban van, azonban ha egy a folyamatban részt vevő kontroll paraméter (vizsgálatukban az édesvíz Észak-Atlanti -ceánba történő beáramlásának mértéke) elér egy kritikus értéket, a rendszer előbb instabillá válik, majd egy ún. bifurkációs ponton áthaladva új stabil állapot felvételére törekszik. Ekkor következhet be az AMOC teljes leállása, mint új stabil állapot. Az átalakulásnak

azonban vannak figyelmeztető jegyei: olyan statisztikai paraméterek, amelyek közvetlenül az átalakulás előtt változnak meg nagy mértékben. Az AMOC esetében a kritikus mértékű lassulást és a stabilitás csökkenését tekintik ilyen korai jeleknek; az előbbit az autokorreláció, míg az utóbbit a variancia növekedésével számszerűsítik. A szerzők a globális és az északi sarkhoz közeli területek tengerfelszín-hőmérséklet idősorainak vizsgálatával lényegében a bifurkáció időpontját becsülték meg, s arra az eredményre jutottak, hogy az AMOC leállása az évszázad közepére várható (a 95%-os megbízhatóságú időintervallum 2025–2095).

Az AMOC változásának hatása térségünk éghajlatára

Gyakran esik szó arról, hogy az AMOC leállása egyben a Golf-áramlat leállítását jelenti-e. Az óceáni vízkörzésben a Golf-áramlat kettős szerepet tölt be: egyfelől fontos része a sűrűségkülönbségek által vezérelt AMOC-nak, másfelől a szél hajtotta felszíni áramlási rendszerben az atlanti szubtrópusi áramlási kör észak és nyugat felé irányuló ága (4. ábra). A felszíni áramlások önmagukban is zárt rendszert alkotnak, ami az AMOC leállása esetén is megmarad. Paleoklimatológiai és modell vizsgálatok alapján az AMOC teljes leállítására, majd újraindulására volt már példa az elmúlt 12–115 ezer évben. Ennek becsült légköri hatásai (l. alább) nem elhanyagolhatók, de nem vezetnek a teljes óceáni cirkuláció (benne a Golf-áramlat) összeomlásához.

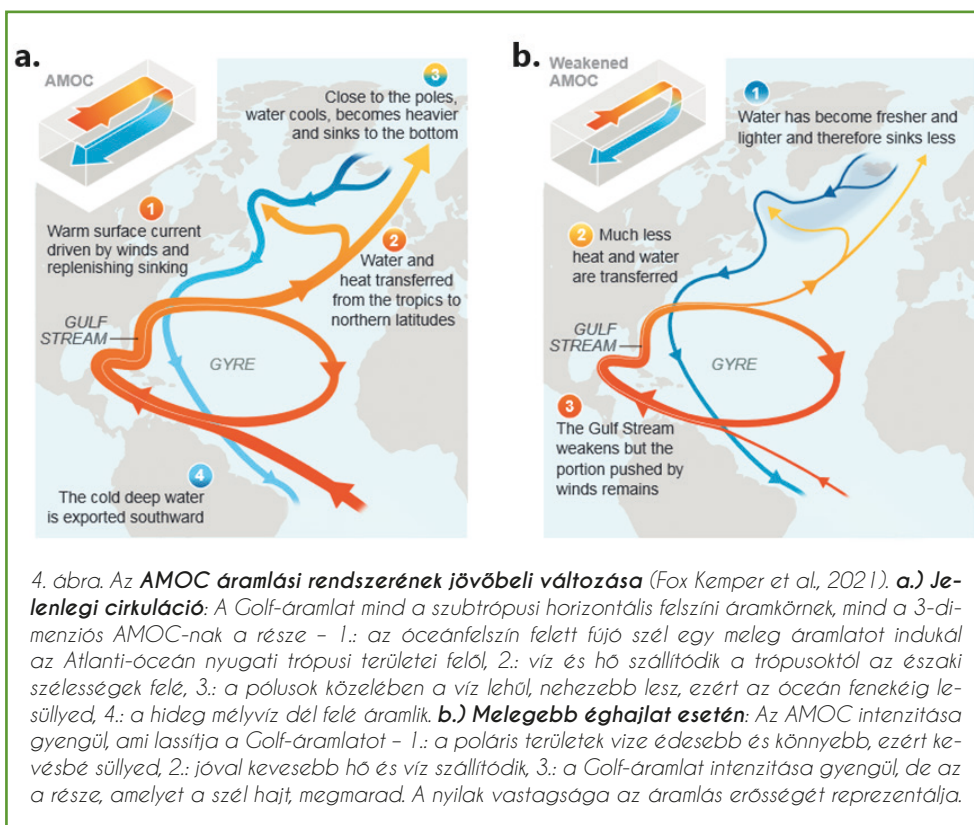
Az AMOC lassulásának folytatódása befolyásolja a jövőbeli éghajlat alakulását. Azt, hogy ez a változás milyen mértékű lenne, klímamodellek szimulációkkal vizsgálhatjuk. A korábban említett globális CMIP5 és CMIP6 szimulációk segítségével hozzávetőleges képet kaphatunk Európa térségének jellemző

égghajlatában fellépő, tengeráramlatok keltette változásokról. Azonban ezeknek a modelleknek a felbontása általában több száz kilométeres, ami túlságosan durva ahhoz, hogy a jelenleg hatását kifejezetten a Kárpát-medencére vonatkozóan pontosan le tudja írni. Ilyen jellegű vizsgálathoz regionális klímamodellek alkalmazása lenne célszerű, amelyek csak kisebb területet fednek le, felbontásuk viszont sokkal finomabb (néhány tíz km), mint a globális modelleké. Mivel a rendelkezésre álló regionális modelleket jelenleg csak 2100-ig futtatják, az AMOC leállása azonban az elő-

rejelzések szerint csak 2100 után következhet be, a leállás hatásának regionális modellekkel történő vizsgálatára egyelőre még nincs lehetőség.

Annak érdekében, hogy az AMOC változásának hatását kifejezetten Európa térségére vonatkozóan ismertetni tudják, *Jackson et al.* (2015) a rendelkezésre álló legfinomabb felbontású (60 km) HadGem3 GC2 (*Hewitt et al.*, 2011; *Williams et al.*, 2015) globális modellt alkalmazta a vizsgálatok elvégzésére. Kísérletükben a tengervíz sótartalmának perturbálásával érzékeltették az édes olvadékvíz beáramlásának a hatását úgy, hogy az AMOC fokozatosan lelassuljon, majd leálljon. A légkör szén-dioxid koncentrációját állandó értéknek vették a teljes időszakra vonatkozóan, így biztosítva, hogy kizárólag az AMOC-ban fellépő változások hatása szerepeljen az eredményekben. Mivel vizsgálatuk nem egy modellegyüttesen, hanem csak egyetlen modellkísérleten alapszik, a bizonytalanság nem mutatkozik meg a végeredményekben, és arról sem kapunk képet, hogy a modellszimuláció milyen jellegű hibákkal lehet terhelve.

Eredményeik azt támasztják alá, hogy az AMOC lassulásának folytatódása Európa jövőbeli klímájára is hatással lenne. A 3-dimenziós áramlási rendszer intenzitás gyengülése önmagában alacsonyabb átlag-



4. ábra. Az AMOC áramlási rendszerének jövőbeli változása (Fox Kemper et al., 2021). **a.) Je-lenlegi cirkuláció:** A Golf-áramlat mind a szubtrópusi horizontális felszíni áramkörnek, mind a 3-dimenziós AMOC-nak a része – 1.: az óceánfelszín felett fújó szél egy meleg áramlatot indukál az Atlanti-óceán nyugati trópusi területei felől, 2.: víz és hő szállítódik a trópusoktól az északi szélességek felé, 3.: a pólusok közelében a víz lehül, nehezebb lesz, ezért az óceán fenekéig lesüllyed, 4.: a hideg mélyvíz dél felé áramlik. **b.) Melegebb éghajlat esetén:** Az AMOC intenzitása gyengül, ami lassítja a Golf-áramlatot – 1.: a poláris területek vize édesebb és könnyebb, ezért kevésbé süllyed, 2.: jóval kevesebb hő és víz szállítódik, 3.: a Golf-áramlat intenzitása gyengül, de az a része, amelyet a szél hajt, megmarad. A nyílak vastagsága az áramlás erősségét reprezentálja.

hőmérsékletet eredményezne a kontinens legnagyobb részén. Míg a nyári csapadékmennyiség általánosságban csökkenne (s így az aszály esélye növekedne), a tél csapadékosabb lenne, és a csapadék nagyobb része hullana hó formájában. A téli megnövekedett csapadékmennyiség főként a téli viharok gyakoriságának növekedésével függene össze. A vegetáció és a végezhető mezőgazdasági tevékenységek a hűvösebb klíma és kisebb rendelkezésre álló vízkészlet miatt csökkenne (*Jackson et al.*, 2015). Ezeknél a következményeknél a globális légköri melegedés hatása nem szerepel, azonban a valóságban mindenképpen fontos ezt is figyelembe venni. Bár a gyengülő AMOC valóban kevesebb hőt fog szállítani Európa térségébe (4. ábra), az évtizedekig töretlenül folytatódó melegedés miatt a légkör több hőt ad majd kontinensünknek. Így összességében a tengeráramlat okozta hűlés sokkal inkább azt eredményezi majd, hogy Európa néhány része lassabban melegedjen, mint ahogyha csak az általános légköri és óceáni felmelegedés játszana szerepet a térség klímájának megváltozásában. Modellszimulációk alapján Európában a változás emellett intenzívebb viharokkal és csökkenő átlagos csapadékmennyiséggel járna (*Fox Kemper et al.*, 2021).

Irodalomjegyzék

- Báldi, K., 2006: Paleohőmérséklet becslésére szolgáló korszerű módszerek ("proxy"-k), a tengeri mikropalantológiában. *Földtani Közlemények* 136, 191–200.
- Cheng, W., Chiang, J.C.H., and Zhang, D., 2013: Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC) in CMIP5 Models: RCP and Historical Simulations. *J. Climat.* 26, 7187–7197. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00496.1>
- Dansgaard, W., Johnsen, S.J., Clausen, H.B., Dahl-Jensen, D., Gundestrup, N.S., Hammer, C.U., Hvidberg, C.S., Steffensen, J.P., Sveinbjörnsdóttir, A.E., Jouzel, J., and Bond, G., 1993: Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature* 364, 218–220. <https://doi.org/10.1038/364218a0>
- Ditlevsen, P. and Ditlevsen, S., 2023: Warning of a forthcoming collapse of the Atlantic meridional overturning circulation. *Nature Commun.* 14, 4254. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39810-w>
- Eyring, V., N.P. Gillett, K.M. Achuta Rao, R. Barimalala, M. Barreiro Parrillo, N. Bellouin, C. Cassou, P.J. Durack, Y. Kosaka, S. McGregor, S. Min, O. Morgenstern, and Y. Sun, 2021: Human Influence on the Climate System. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 423–552. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.005>
- Fox-Kemper, B., H.T. Hewitt, C. Xiao, G. Aðalgeirsdóttir, S.S. Drijfhout, T.L. Edwards, N.R. Golledge, M. Hemer, R.E. Kopp, G. Krinner, A. Mix, D. Notz, S. Nowicki, I.S. Nurhati, L. Ruiz, J.-B. Sallée, A.B.A. Slangen, and Y. Yu, 2021: Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1211–1362. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.011>
- Gulev, S.K., P.W. Thorne, J. Ahn, F.J. Dentener, C.M. Domingues, S. Gerland, D. Gong, D.S. Kaufman, H.C. Nnamchi, J. Quaa, J.A. Rivera, S. Sathyendranath, S.L. Smith, B. Trewin, K. von Schuckmann, and R.S. Vose, 2021: Changing State of the Climate System. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 287–422. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.004>
- Hewitt, H.T., Copsey, D., Culverwell, I.D., Harris, C.M., Hill, R.S.R., Keen, A.B., McLaren, A.J., and Hunke, E.C., 2011: Design and implementation of the infrastructure of HadGEM3: the next-generation Met Office climate modelling system. *Geosci. Model Develop.* 4, 223–253. <https://doi.org/10.5194/gmd-4-223-2011>
- IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Lohmann, J. and Ditlevsen P.D., 2021: Risk of tipping the overturning circulation due to increasing rates of ice melt. *Proc. Acad. Sci.* 118, e2017989118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2017989118>
- Jackson, L.C., Kahana, R., Graham, T., Ringer, M.A., Woollings, T., Mecking, J.V., and Wood, R.A., 2015: Global and European climate impacts of a slowdown of the AMOC in a high resolution GCM. *Clim. Dyn.* 45, 3299–3316. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2540-2>
- McCarthy, G., Smeed, D., Cunningham, S., and Roberts, C., 2017: Atlantic Meridional Overturning Circulation. *MCCIP Sci. Review 2017*, 7 pages <https://doi.org/10.14465/2017.ARC10.002-ATL>
- Menary, M.B., Robson, J., Allan, R.P., Booth, B.B.B., Cassou, C., Gastineau, G., Gregory, J., Hodson, D., Jones, C., Mignot, J., Ringer, M., Sutton, R., Wilcox, L., and Zhang, R., 2020: Aerosol-Forced AMOC Changes in CMIP6 Historical Simulations. *Geoph. Res. Lett.* 47, e2020GL088166. <https://doi.org/10.1029/2020GL088166>
- Rantanen, M., Karpechko, A.Y., Lipponen, A., Nordling, K., Hyvärinen, O., Ruosteenoja, K., Vihma, T., and Laaksonen, A., 2022: The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Commun. Earth & Env.*, 3, 1–10. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>
- Rayner, N.A., Parker, D., Horton, E.B., Folland, C., Alexander, L., Rowell, D., Kent, E., and Kaplan, A., 2003: Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late Nineteenth Century. *J. Geoph. Res.* 108. <https://doi.org/10.1029/2002JD002670>
- Thibodeau, B., Not, C., Zhu, J., Schmittner, A., Noone, D., Tabor, C., Zhang, J., and Liu, Z., 2018: Last Century Warming Over the Canadian Atlantic Shelves Linked to Weak Atlantic Meridional Overturning Circulation. *Geoph. Res. Lett.* 45, 12,376–12,385. <https://doi.org/10.1029/2018GL080083>
- Weijer, W., Cheng, W., Drijfhout, S.S., Fedorov, A.V., Hu, A., Jackson, L.C., Liu, W., McDonagh, E.L., Mecking, J.V., and Zhang, J., 2019: Stability of the Atlantic Meridional Overturning Circulation: A Review and Synthesis. *J. of Geoph. Res.: Oceans*, 124, 5336–5375. <https://doi.org/10.1029/2019JC015083>
- Williams, K.D., Harris, C.M., Bodas-Salcedo, A., Camp, J., Comer, R.E., Copsey, D., Fereday, D., Graham, T., Hill, R., Hinton, T., Hyder, P., Ineson, S., Masato, G., Milton, S.F., Roberts, M.J., Rowell, D.P., Sanchez, C., Shelly, A., Sinha, B., Walters, D.N., West, A., Woollings, T., and Xavier, P.K., 2015: The Met Office Global Coupled model 2.0 (GC2) configuration. *Geosci. Model Dev.* 8, 1509–1524. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1509-2015>