

dc_2012_22

**Az utolsó glaciális időszak gyors
klímaváltozásainak ásványi por ciklust
érintő hatásai és visszacsatolásai az
észak-atlanti térség és Közép-Európa
vonatkozásában**

MTA doktori rövid értekezés tézisei

Újvári Gábor PhD
ELKH Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont
Földtani és Geokémiai Intézet

Budapest, 2022

1. Bevezetés

Az észak-atlanti térség éghajlata meglehetősen változatos volt az utolsó eljegesedés során, ami a poláris jégmagok és mélytengeri üledékek proxy adatsoraiban igen jól dokumentált. Az általánosan hideg klímát hirtelen, néhány évtized alatt bekövetkező felmelegedési fázisok szakították meg, amelyek hosszabb, ezeréves időskálájú ciklusoknak voltak a részei. Ezek az úgynevezett Dansgaard–Oeschger (D–O) ciklusok sokszor igen hideg, Heinrich stadiálisokban kulmináltak, ami intenzív jéghegyborjadzással járt a Labrador-félsziget körüli térségben (Bond et al., 1992, 1993; Dansgaard et al., 1993). Későbbi kutatások rámutattak, hogy ezek a gyors klímakilengések globális hatást gyakoroltak (WAIS Divide Project members, 2015) és érintették az Eurázsiai kontinenst éghajlatát is (Allen et al., 1999; Genty et al., 2003; Wang et al., 2008; Fleitmann et al., 2009). Ezek a folyamatok természetesen kihatottak a növényzetre (pl. Allen et al., 1999; Müller et al., 2011; Sirocko et al., 2016) és a kontinentális porkibocsátásra is, amely direkt és indirekt visszacsatolásokon keresztül visszahatott a globális klímára (Sokolik & Toon, 1996; Tegen et al., 1996; Satheesh & Krishna Moorthy, 2005; Mahowald, 2011). A közepes földrajzi szélességek, így pl. Eurázsia nagy területeit fedték be ebben az időszakban a szél által szállított por kiülepedéséből származó lösz üledékek (Lehmkuhl et al., 2021), amelyek unikális lehetőséget kínálnak a környezeti átalakulások és a porciklus változásainak együttes megismerésére a kontinenseken. A szárazföldi porforrások és a poláris jégmagokba zárt ásványi por közötti kapcsolatok felderítése pedig az északi félteke glaciális légkörzési mintázataiba enged

bepillantást. Kutatásaim során, amelyeket az OTKA/NKFIH, az MTA Bolyai János Kutatási Ösztöndíja, valamint Fulbright és Lise Meitner Kutatói Ösztöndíjak segítettek, két fő kutatási irányra koncentráltam, így egyfelől arra, hogy a lösz üledékek nagy pontosságú radiokarbon kormeghatározásával és újszerű kvantitatív proxy-k felhasználásával a korábbiaknál pontosabban érthessem meg a D–O események hatásait a Kárpát-medencében és tágabb értelemben Közép-Európában, illetve rávilágítsak az ezek mögött álló mechanizmusokra. Másfelől pedig a NGRIP (North Greenland Ice Core Project) jégmag glaciális aeroszol mintáinak és az északi félteke különböző kontinentális porforrás régióiból származó porminták felhasználásával és agyagásványtani, valamint tradicionális (Sr-Nd) és új izotópgeokémiai (Hf, $\delta^2\text{H}$) indikátorok segítségével egy világosabb képet szerettem volna nyerni a fő porforrás(ok)ról. A kutatások során nyert ún. paleo-adatok jelentősége a fentiek mellett abban is áll, hogy lehetővé teszi a jövő klímaváltozásának előrejelzésére használt klímamodellek tesztelését egy, a jelen interglaciálistól eltérő időszakban, amikor a klímát meghatározó feltételek/kényszerek (földpályaelemek, üvegházgázok, krioszféra, stb.) különböztek a maitól (Braconnot et al., 2012; Harrison et al., 2014; Zhu et al., 2021) és ahol a gyors éghajlati rezsimváltások is jellemzőek voltak. Ezen klímakilengések okainak, visszacsatolási mechanizmusainak és transzmissziójának jobb megismerése kulcsfontosságú a Föld-rendszer működésének pontosabb megértéséhez.

2. Minták, analitikai módszerek

A NGRIP jégmagból 4 mintát biztosított a NGRIP Steering Committee a vizsgálataimhoz, amelyek az utolsó glaciális egyik legintenzívebben poros időszakához, a GS-3 stadiálishoz kötődnek, 25,6–24,8 ezer évek között. A vizsgált poranyagot ~ 0,6 kg jég megolvasztásával nyertük, a külső 3-5 mm jégréteg eltávolítását követően és az ezt követő izotópösszetétel elemzések elsősorban az aluminoszilikát frakciókra koncentráltak. A vizsgálatok során használt potenciális forrásterület (PFT) minták közé modern talajminták, sivatagi dűnehomokok, folyóvízi és tavi üledékek, valamint késő negyedidőszaki löszlerakódások tartoznak, amelyekről térkép és részletes lista az Újvári et al. (2022) által közölt tanulmányban található. A lösz üledékeket lumineszcens vagy radiokarbon kormeghatározással datált rétegsorokból gyűjtöttük és a legtöbbjük az adott forrásrégiók által az LGM vagy utolsó jégkorszak során kibocsátott port (L1 lösz) reprezentálja. Annak biztosítása érdekében, hogy a PFT és a jégmag porminták azonos szemcseméretű frakcióit hasonlítsuk össze, a PFT mintákat 5 µm-es, hidrofób Mitex filteren és/vagy nedves ülepítéssel választottuk szét és a <5 és <2 µm-es aluminoszilikát frakciókat használtuk az izotópelemzésekhez. A jégmag aeroszol és PFT mintákon számos anyagelemzés és a témához kapcsolódóan porciklus modellezés is készült:

- röntgen-pordiffrakciós mérések (Bécsi Tudományegyetem Földtani Tanszék, közreműködő: Susanne Gier)
- kombinált Hf-Sr-Nd izotópelemzések (oszlopkromatográfia és TIMS mérések a Bécsi Tudományegyetem Litoszférakutatási Tanszékén,

közreműködők: Urs Klötzli és Monika Horschinegg; MC-ICP-MS mérések a debreceni ATOMKI-ban, közreműködő: Palcsu László)

- $^2\text{H}/^1\text{H}$ izotóparány-elemzések (IRMS, Lausanne-i Egyetem, közreműködő: Torsten Vennemann)
- porciklus modellezések (WRF-Chem modell, Karlsruhe-i Műszaki Egyetem Meteorológiai és Klímakutatási Tanszék, közreműködő: Patrick Ludwig).

A paleoklíma rekonstrukciók a dunaszekcsői löszrétegsor vizsgálatai alapján történtek (Dunántúli-dombság, É.sz. $46^{\circ}05'25''$, K.h. $18^{\circ}45'45''$, 135 m tengerszint feletti magasság), ahonnét 5 cm-es felbontással vettünk mintákat lösz szemcseméret-elemzésekhez, illetve 5–30 cm-es felbontással csigahéj/faszén alapú radiokarbon kormeghatározáshoz, valamint stabilizotóp- és kapcsoltizotóp-mérésekhez a profil bizonyos részein. A csigahéjak/faszének kinyeréséhez $15 \times 5 \times 10$ cm (szélesség/magasság/hosszúság) méretű blokkokat vágtunk ki a löszből és a mintatömböket ezt követően desztillált vízben áztatva szuszpendáltuk. A faszén maradványokat és a csigahéjakat az üledék 1 mm-es szitán keresztül történő átmosásával nyertük ki, majd 50°C -on szárítottuk és kesztyűvel, valamint előre megtisztított csipesz segítségével kézzel szedtük ki. A témában készült analitikai vizsgálatok:

- ^{14}C kormeghatározás (MICADAS, debreceni ATOMKI Hertelendi Ede Környezetanalitikai Laboratóriuma, közreműködő: Molnár Mihály)
- lösz és kvarc szemcseméret-elemzése (lézer-diffraktométer, Pécsi Tudományegyetem)

Szentágothai János Kutatóközpont, közreműködő:
Kovács János)

- csigahéjak szén és oxigén stabilizotóp-, valamint kapcsoltizotóp-mérései (IRMS, ETH Zürich Geológiai Intézete, közreműködő: Stefano Bernasconi).

3. Tudományos eredmények (tézispontok)

A grönlandi utolsó glaciális por eredetéhez kapcsolódó tézisek

1. Új módszert dolgoztam ki kőzetek ammónium-bifluoridos (ABF, NH_4HF_2) feltárására, nagy mintaszámú, kombinált Hf-Sr-Nd izotóp elemzésekhez, amely alkalmas igen kis mennyiségben (1–5 mg) rendelkezésre álló minták vizsgálatához is, mint például a jégmagokban lévő aeroszolok. Az ABF-módszer teljes kémiai háttere (vakértéke/blank-je) 0.5 ng a Sr, 0.2 ng a Nd, és <25 pg a Hf esetén és a mért $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, illetve $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ izotóparányok hibahatáron belül átfednek a tesztelés során használt geológiai referencia kőzetmintákra megadott, nagynyomású bombák használatával nyert referencia értékekkel. A mérési eredmények reprodukálhatóságai összehasonlíthatóak voltak a referencia módszerével (bombák) és a 10–20 ppm nagyságrendbe estek. [Kapcsolódó publikáció: Újvári et al. (2021b)]

2. Löszminták ecetsav kezelt finom (<10 és <5 μm) frakcióinak ismételt vizsgálataival rámutattam, hogy míg a Sr izotóp összetételt jelentősen befolyásolhatják ($\Delta^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$: 0,0032-0,0059) a szemcseösszetétel finom eltérései, illetve a savas kezelés (pl. időtartam), addig a Nd izotóp összetételt nem vagy alig befolyásolják ($\Delta^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$: 0,000010-0,000026). Ezek a 0,2-0,5 ϵNd egységnyi eltérések összevethetők a Nd izotóp mérések analitikai reprodukálhatóságával. [Kapcsolódó publikációk: Újvári et al. (2015, 2022)]
3. Három eolikus porminta <5, <3 és <2 μm frakcióinak ismételt méréseivel megmutattam, hogy a Hf izotópelemzések reprodukálhatósága 0,3–0,8 ϵHf egység közötti az ABF-módszerrel ($\Delta^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$: 0,000009–0,000023). Ezek a reprodukálhatósági értékek általában az egyedi mérések analitikai hibáján belül vannak. [Kapcsolódó publikáció: Újvári et al. (2022)]
4. A potenciális forrásterület (PFT) minták $\delta^2\text{H}_{\text{aszv}}$ értékei, azaz a mintákban lévő agyagásványok szerkezeti vizének $^2\text{H}/^1\text{H}$ (D/H) izotóp összetétele térbeli mintázatot mutat. A legnegatívabb $\delta^2\text{H}_{\text{aszv}}$ értékek (–116 és –101 ‰ között) a legészakibb forrásokból (Yukon lösz és ÉK-szibériai lösz) származó pormintákra jellemzőek, míg a kevésbé negatív értékek (–67 és –62 ‰ között) Észak-Afrikából és a kelet-ázsiai B sivatagi régióból származnak. Ez a földrajzi mintázat a $\delta^2\text{H}_{\text{aszv}}$

szélességfüggését jelzi a vizsgált mintákban és emlékeztet a modern légköri vízgőz és csapadék sarkok felé deutériumban szegényedő összetételére. [Kapcsolódó publikáció: Újvári et al. (2022)]

5. Mesterséges keverékek $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ izotóp adatai révén bizonyítottam, hogy a korábban a Sr-Nd izotópösszetételi adatok alapján Biscaye et al. (1997) által javasolt cirkum-pacifikus vulkanitok és kelet-ázsiai por közötti keveredési modell nagy biztonsággal kizárható a közép-grönlandi jégmagokban lévő utolsó glaciális por összetételének magyarázataként. [Kapcsolódó publikáció: Újvári et al. (2022)]
6. Az agyagásványtani és izotópösszetételi eredmények segítségével rámutattam, hogy a közép-grönlandi glaciális aeroszolok egyik legvalószínűbb direkt forrása a Takla-Makán és/vagy Tengger-sivatagok lehetnek. Az adatok szerint azonban a poranyag közép-európai forrásokból is származhat, amit a modellszimulációk eredményei is alátámasztanak. Ezek egyértelműen bizonyítják, hogy az európai glaciális porforrásokból kibocsátott aeroszolok minden évszakban elérhették a grönlandi jégtakarót, bár évszakonként változó gyakorisággal. [Kapcsolódó publikációk: Újvári et al. (2015, 2022)]

Az észak-atlanti hirtelen klímakilengések kárpát-medencei illetve közép-európai porfelhalmozódásra és öskörnyezetre gyakorolt hatásaira vonatkozó tézisek

7. Kimutattam, hogy bizonyos csigafajok (*Succinella oblonga*, *Chondrula tridens*, *Trochulus hispidus*, Clausiliidae család) héjai hibahatáron belül megegyeznek a referenciaként használt faszenek koraival a dunaszekcsői löszrétegsorban, tehát jól használhatók lösz kronológiák kidolgozásához. A radiokarbon koradatok alapján nyert Bayes-i kormodellek 200–800 évek közötti 95%-os bizonytalansággal rendelkeznek. Ez egy nagyságrenddel kisebb, mint ami a lumineszcens kormeghatározással jelenleg elérhető. [Kapcsolódó publikációk: Újvári et al. (2016b, 2017)]
8. A dunaszekcsői lösz és abból szeparált kvarcok szemcseméret-eloszlásai révén rámutattam, hogy a szemcseösszetétel több, gyakran sztochasztikus folyamat által befolyásolt, ami arra utal, hogy a szemcseösszetételi proxy-k változásainak egy faktor (pl. szélesebbesség) révén történő interpretálása nagy valószínűséggel helytelen és pontatlan. [Kapcsolódó publikáció: Újvári et al. (2016a)]
9. Rámutattam, hogy míg a grönlandi stadiális-interstadiális (GS/GI) mintázatok a dunaszekcsői lösz és a benne lévő kvarc szemcseméreteiben nem láthatók, addig azok a porfelhalmozódási rátákban (BMAR/DMAR) világosan megjelennek. A

dunaszekcsői feltárásban orbitális időskálákon a porfelhalmozódás növekedése a 45° északi szélességre számított, csökkenő tavaszi-nyári inszolációt követi. Rövidebb, ezeréves időskálákon a dunaszekcsői rétegsor porfelhalmozódási minimumai a kormeghatározási bizonytalanságokon belül egybeesnek a NGRIP jégmag $\delta^{18}\text{O}$ és Ca^{2+} adatsoraiban látható grönlandi interstadiális (GI) fázisokkal, míg a grönlandi stadiális (GS) fázisokban a porfluxusok jelentős növekedése figyelhető meg. A dunaszekcsői BMAR és a NGRIP, illetve 7H $\delta^{18}\text{O}$ adatsorok közötti hasonlóságok alapján rámutattam, hogy a kelet-közép-európai porciklus változások fő okozói valószínűleg a nagyléptékű légköri átrendeződések lehetnek, így elsősorban a poláris jet stream északra és délre tolódása. [Kapcsolódó publikáció: Újvári et al. (2017)]

10. Csigahéjak kapcsoltizotóp-mérési eredményei alapján 16–18 °C közötti interstadiális T_{MO} (május-október közötti aktív időszaki hőmérséklet) értékek rekonstruálhatók a GI-5.1 és 3 interstadiálisokra, amik meleg nyarakra (T_{JJA} : 18–21 °C) és viszonylag magas éves középhőmérsékletekre (MAT: 9–11 °C) utalnak. A GI-5.1 és 3 előtti és utáni stadiálisok rekonstruált T_{MO} értékei 7–14 °C között mozogtak, amelyek igen alacsony éves középhőmérsékleteket (MAT: –3 és 2,5 °C között) feltételeznek. A dunaszekcsői löszből rekonstruált hőmérsékletnövekedés mind a

GI-5.1 (~7 °C), mind a GI-3 (~4–6 °C) fázisok során viszonylag jelentős volt a stadiálisban jellemző őshőmérsékletekhez képest, amit a közeli, U–Th korolt PK-6 cseppkőkéreg $\delta^{18}\text{O}$ adatai is alátámasztanak. [Kapcsolódó publikáció: Újvári et al. (2021a)]

11. Kombinált $T\Delta_{47\text{-héj}}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{héj}}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{héj}}$ és BMAR adatok alapján a stadiálisok során hidegebb nyári időszakok voltak jellemzőek a Kárpát-medencében, amelyekben több lehetett a rendelkezésre álló csapadék, míg a téli-tavaszi időszakok szárazabbak/viharosabbak voltak, ami fokozott porkibocsátással és -felhalmozódással járt. Elméletem szerint a kelet-közép-európai stadiálisokat a délibb poláris jet pozíciók jellemezték. Ezzel szemben az interstadiális időszakokban, amikor a poláris jet északabbra tolódott, a kelet-európai nyarak szárazabbak voltak (pozitívabb $\delta^{18}\text{O}_{\text{héj}}/\delta^{13}\text{C}_{\text{héj}}$ értékek), elsősorban a magasabb nyári és aktív időszaki léghőmérséklet miatt (magasabb $T\Delta_{47\text{-héj}}$), míg a téli-tavaszi időszak a stadiális időszakokhoz képest nedvesebb és kevésbé viharos lehetett, ami csökkent porfelhalmozódással járt. Mindezek arra utalnak, hogy a nagyléptékű utolsó jégkorszaki légköri cirkuláció változékonysága lehet az a kulcsfontosságú mechanizmus, amelynek révén a D–O események során bekövetkező éghajlati változások áttérjednek Európába és potenciálisan tovább Ázsiába. [Kapcsolódó publikációk: Újvári et al. (2017, 2021a)]

Irodalomjegyzék

A tézisek alapjául szolgáló publikációk (PhD fokozatszerzés óta)

- Újvári, G.**, Stevens, T., Svensson, A., Klötzli, U.S., Manning, C., Németh, T., Kovács, J., Sweeney, M.R., Gocke, M., Wiesenberg, G.L.B., Markovic, S.B., Zech, M. (2015). Two possible source regions for central Greenland last glacial dust. *Geophysical Research Letters* 42, 10399–10408.
<https://doi.org/10.1002/2015GL066153>
- Újvári, G.**, Kok, J. F., Varga, Gy., Kovács, J. (2016a). The physics of wind-blown loess: Implications for grain size proxy interpretations in Quaternary paleoclimate studies. *Earth-Science Reviews* 154, 247–278.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.01.006>
- Újvári, G.**, Molnár, M., Páll-Gergely, B. (2016b). Charcoal and mollusc shell ¹⁴C-dating of the Dunaszekcső loess record, Hungary. *Quaternary Geochronology* 35, 43–53.
<https://doi.org/10.1016/j.quageo.2016.05.005>
- Újvári, G.**, Stevens, T., Molnár, M., Demény, A., Lambert, F., Varga, Gy., Jull, A. J. T., Páll-Gergely, B., Buylaert, J.-P., Kovács, J. (2017). Coupled European and Greenland last glacial dust activity driven by North Atlantic climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 114, 10622–10631.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1712651114>
- Újvári, G.**, Bernasconi, S. M., Stevens, T., Kele, S., Páll-Gergely, B., Surányi, G., Demény, A. (2021a).

Stadial-interstadial temperature and aridity variations in East Central Europe preceding the Last Glacial Maximum. *Paleoceanography and Paleoclimatology* 36, Paper: e2020PA004170.

<https://doi.org/10.1029/2020PA004170>

Újvári, G., Klötzli, U., Horschinegg, M., Wegner, W., Hippler, D., Kiss, G. I., Palcsu, L. (2021b). Rapid decomposition of geological samples by ammonium bifluoride (NH₄HF₂) for combined Hf-Nd-Sr isotope analyses. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 35, Paper: e9081.

<https://doi.org/10.1002/rcm.9081>

Újvári, G., Klötzli, U., Stevens, T., Ludwig, P., Vennemann, T., Gier, S., Horschinegg, M., Palcsu, L., Hippler, D., Kovács, J., Di Biagio, C., Formenti, P. (2022). Greenland ice core record of last glacial dust sources and atmospheric circulation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 127, e2022JD036597.

<https://doi.org/10.1029/2022JD036597>

További hivatkozott irodalmak (a téziseket bizonyító publikációk nélkül)

Allen, J. R. M., Brandt, U., Brauer, A., Hubberten, H.-W., Huntley, B., Keller, J., Kraml, M., Mackensen, A., Mingram, J., Negendank, J. F. W., Nowaczyk, N. R., Oberhänsli, H., Watts, W. A., Wulf, S., Zolitschka, B. (1999). Rapid environmental changes in southern Europe during the last glacial period. *Nature* 400, 740–743. <https://doi.org/10.1038/23432>

Bond, G., Heinrich, H., Broecker, W., Labeyrie, L. (1992). Evidence of massive discharges of icebergs

into the North Atlantic during the last glacial period. *Nature* 360, 245–249.

<https://doi.org/10.1038/360245a0>

- Bond, G., Broecker, W., Johnsen, S., McManus, J., Labeyrie, L., Jouzel, J., Bonani, G. (1993). Correlations between climate records from North Atlantic sediments and Greenland ice. *Nature* 365, 143–147 (1993). <https://doi.org/10.1038/365143a0>
- Braconnot, P., Harrison, S. P., Kageyama, M., Bartlein, P. J., Masson-Delmotte, V., Abe-Ouchi, A., Otto-Bliesner, B., Zhao, Y. (2012). Evaluation of climate models using palaeoclimatic data. *Nature Climate Change* 2, 417–424. <https://doi.org/10.1038/nclimate1456>
- 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., 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>
- Fleitmann, D., Cheng, H., Badertscher, S., Edwards, R. L., Mudelsee, M., Göktürk, O. M., Fankhauser, A., Pickering, R., Raible, C. C., Matter, A., Kramers, J., Tüysüz, O. (2009). Timing and climatic impact of Greenland interstadials recorded in stalagmites from northern Turkey. *Geophysical Research Letters* 36, L19707. <https://doi.org/10.1029/2009GL040050>
- Genty, D., Blamart, D., Ouahdi, R., Gilmour, M., Baker, A., Jouzel, J., Van-Exter, S. (2003). Precise dating of Dansgaard-Oeschger climate oscillations in western

- Europe from stalagmite data. *Nature* 421, 833–837.
<https://doi.org/10.1038/nature01391>
- Harrison, S. P., Bartlein, P. J., Brewer, S., Prentice, I. C., Boyd, M., Hessler, I., Holmgren, K., Izumi, K., Willis, K. (2014). Climate model benchmarking with glacial and mid-Holocene climates. *Climate Dynamics* 43, 671–688.
<https://doi.org/10.1007/s00382-013-1922-6>
- Lehmkuhl, F., Nett, J. J., Pötter, S., Schulte, P., Sprafke, T., Jary, Z., Antoine, P., Wacha, L., Wolf, D., Zerboni, A., Hošek, J., Marković, S. B., Obreht, I., Sümegi, P., Veres, D., Zeeden, C., Boemke, B., Schaubert, V., Viehweger, J., Hambach, U. (2021). Loess landscapes of Europe – mapping, geomorphology, and zonal differentiation. *Earth-Science Reviews* 215, 103496.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103496>
- Mahowald, N. (2011). Aerosol indirect effect on biogeochemical cycles and climate. *Science* 334, 794–796. <https://doi.org/10.1126/science.1207374>
- Müller, U. C., Pross, J., Tzedakis, P. C., Gamble, C., Kotthoff, U., Schmiedl, G., Wulf, S., Christanis, K. (2011). The role of climate in the spread of modern humans into Europe. *Quaternary Science Reviews* 30, 273–279.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.11.016>
- Sirocko, F., Knapp, H., Dreher, F., Förster-Albert, M. W. J., Brunck, H., Veres, D., Dietrich, S., Zech, M., Hambach, U., Röhner, M., Rudert, S., Schwibus, K., Adams, C., Sigl, P. (2016). The ELSA-Vegetation-Stack: Reconstruction of landscape evolution zones (LEZ) from laminated Eifel maar sediments of the

- last 60,000 years. *Global and Planetary Change* 142, 108–135.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.03.005>
- Satheesh, S. K., Krishna Moorthy, K. (2005). Radiative effects of natural aerosols: a review. *Atmospheric Environment* 39, 2089–2110.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.12.029>
- Sokolik, I. N., Toon, O. B. (1996). Direct radiative forcing by anthropogenic airborne mineral aerosols. *Nature* 381, 681–683.
<https://doi.org/10.1038/381681a0>
- Tegen, I., Lacis, A. A., Fung, I. (1996). The influence on climate forcing of mineral aerosols from disturbed soils. *Nature* 380, 419–422.
<https://doi.org/10.1038/380419a0>
- WAIS Divide Project Members (2015). Precise inter-polar phasing of abrupt climate change during the last ice age. *Nature* 520, 661–665.
<https://doi.org/10.1038/nature14401>
- Wang, Y., Cheng, H., Edwards, R. L., Kong, X., Shao, X., Chen, S., Wu, J., Jiang, X., Wang, X., An, Z. (2008). Millennial- and orbital-scale changes in the East Asian monsoon over the past 224,000 years. *Nature* 451, 1090–1093.
<https://doi.org/10.1038/nature06692>
- Zhu, J., Otto-Bliesner, B. L., Brady, E. C., Poulsen, C. J., Tierney, J. E., Lofverstrom, M., DiNezio, P. (2021). Assessment of equilibrium climate sensitivity of the Community Earth System Model version 2 through simulation of the Last Glacial Maximum. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL091220.
<https://doi.org/10.1029/2020GL091220>