

# LÖSZ-PALEOTALAJ SOROZATOKBAN MEGŐRZŐDÖTT FITOLITKÉSZLETEK KÖRNYEZETTÖRTÉNETI ÉS KÖRNYEZET RÉGÉSZETI VONATKOZÁSÚ KUTATÁSI LEHETŐSÉGEI

## ENVIRONMENTAL HISTORY AND ENVIRONMENTAL ARCHAEOLOGICAL RESEARCH OPPORTUNITIES OF PHYTOLITHS PRESERVED IN LOESS- PALEOSOIL SERIES\*

MILINKÓ István<sup>1</sup>, NOVOTHNY Ágnes<sup>1</sup>  & PETŐ Ákos<sup>2,\*</sup> 

<sup>1</sup> Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természetföldrajzi Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány P. sétány 1/C.,  
e-mail: [milinkoistvan@gmail.com](mailto:milinkoistvan@gmail.com)

<sup>2</sup> Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Vadgazdálkodási és Természetvédelmi Intézet, Természetvédelmi  
és Tájgazdálkodási Tanszék, 2100 Gödöllő, Páter K. u. 1.

\*Levelező szerző, e-mail: [Peto.Akos@uni-mate.hu](mailto:Peto.Akos@uni-mate.hu)

### Abstract

*Phytoliths are plant produced opal grains, which, due to their properties (e.g., production in large quantities, morphotypes with diagnostic value, relatively high resistance) are good indicators of former (local) vegetation. Phytolith assemblages extracted from soils, sediments, and sedimentary rocks can be valuable proxy data for environmental reconstruction. Phytoliths collected from archaeological contexts can play an important role in the reconstruction of human use of landscape and plants. Knowledge of the taphonomic processes affecting the phytolith pool and the estimation of their effects are essential for the proper evaluation of the extracted phytolith assemblages. Loess-paleosol series cover the surface of the continents in a considerable extent and thickness. The phytolith assemblages extracted from the loess-paleosol sequences can therefore be used in environmental reconstruction studies in a large area, covering a significant period (mostly the quaternary period). In order to properly evaluate the extracted phytolith assemblages in environmental reconstruction studies, it is necessary to understand the main taphonomic processes prevailing in the case of loess-paleosol sequences. Better knowledge of phytolith preservation in loess-paleosol sequences can provide enhanced confidence of environmental reconstruction.*

### Kivonat

*A fitolitok növények által termelt opálszemcsék, amelyek bizonyos tulajdonságaiknak köszönhetően (pl. nagy mennyiségben termelődnek, diagnosztikai értékkel bíró morfológiai típusok létezése, viszonylag nagy ellenállóképesség) az egykori (lokális) vegetáció indikátorai. Talajokból, üledékekből, üledékes kőzetekből kinyert fitolitikészlet értékes proxy adatot jelenthet a környezetrekonstrukciós vizsgálatokhoz. Régészeti kontextusból gyűjtött fitolitok az ember táj- és növényhasznosításának rekonstrukciójában játszhatnak fontos szerepet. A fitolitikészlet megfelelő kiértékeléséhez elengedhetetlen a fitolitikészletet érintő tafonómiai folyamatok ismerete, hatásuk becslése. Löss-paleotalaj sorozatok jelentős kiterjedésben és vastagságban borítják a szárazföldek felszínét. A löss-paleotalaj sorozatokból kinyert fitolitikészleteket ennél fogva nagy kiterjedésű területen, jelentős időtávot (elsősorban a negyedidőszakot) átfogva lehet felhasználni a környezetrekonstrukciós vizsgálatok során. A fitolitikészlet környezetrekonstrukciós vizsgálatokban történő megfelelő kiértékeléséhez szükséges ismerni a löss-paleotalaj sorozatok esetében érvényesülő főbb tafonómiai folyamatokat. A fitolitok löss-paleotalaj sorozatokban történő megőrződését befolyásoló folyamatok jobb megismerése megbízhatóbb környezetrekonstrukciót tesz lehetővé.*

KEYWORDS: LOESS, PHYTOLITH, PALEOENVIRONMENTAL RECONSTRUCTION, QUATERNARY, ENVIRONMENTAL HISTORY

KULCSSZAVAK: LÖSZ, FITOLIT, ŐSKÖRNYEZETTANI REKONSTRUKCIÓ, NEGYEDIDŐSZAK, KÖRNYEZETTÖRTÉNET

---

\* How to cite this paper: MILINKÓ, I.; NOVOTHNY, Á. & PETŐ, Á., (2023): Löss-paleotalaj sorozatokban megőrződött fitolitikészletek környezettörténeti és környezet régészeti vonatkozású kutatási lehetőségei / Environmental history and environmental archaeological research opportunities of phytoliths preserved in loess-paleosol series [in Hungarian with English abstract], *Archeometriai Műhely* XX/1 93–114.  
doi: [10.55023/issn.1786-271X.2023-006](https://doi.org/10.55023/issn.1786-271X.2023-006)

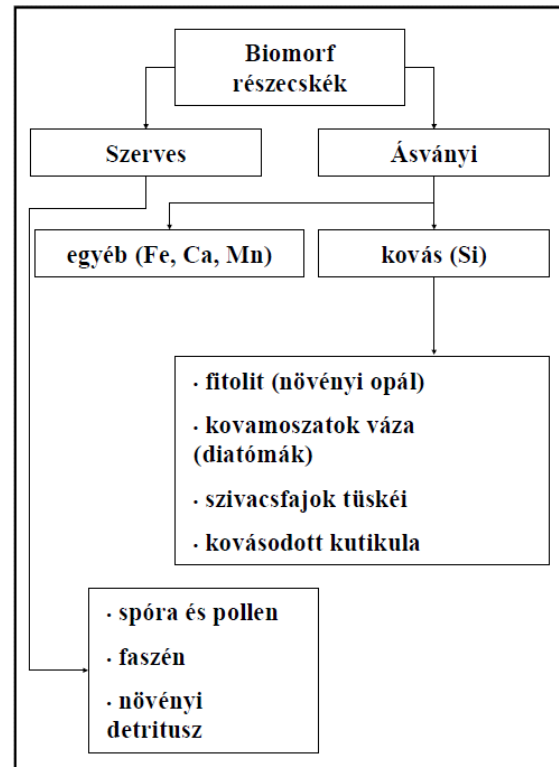
## Bevezetés

### Növényi opálszemcsék

A fitolitok, vagy más néven növényi opálszemcsék, kiválasztása és felhalmozódása az élő növény sejteiben belüli intracelluláris térben, valamint a sejtek közötti intercelluláris térben, illetve részben a sejtfalban történik (Piperno 2006). A fitolitok az adott növényi szövet elbomlása után kerülnek ki a környezetbe. A fitolitokat döntően (66–91%-ban)  $\text{SiO}_2$  alkotja, azonban változó mennyiségben egyéb elemek (pl. C, N, P, Al, Fe, K, Ca, Mg, Cu) is találhatóak bennük (Osterrieth et al. 2009; Pető 2009a; Li et al. 2013; Song et al. 2016; Lisztes-Szabó et al. 2019; Delplace et al. 2020). A fitolitok jelentős morfológiai diverzitást mutatnak, többek között az adott taxonómiai szint (pl. genus, faj), növényi szövet (melyben az akkumuláció végbement), az akkumuláció idején uralkodó környezeti viszonyok (pl. klimatikus viszonyok, a talajban hozzáférhető, oldott állapotban lévő monokovavas koncentrációja) függvényében (Pető 2009a; Lisztes-Szabó et al. 2013; Strömberg et al. 2018; Neumann 2019; Lisztes-Szabó 2019). A növényi opálszemcsék mérettartománya 2–2000  $\mu\text{m}$ , azonban a többségük 5–50  $\mu\text{m}$  méretű, míg sűrűségük 1,5–2,3  $\text{g/cm}^3$  között változik (Piperno 2006; Fishkis et al. 2010a; Strömberg et al. 2018).

A fitolitok a talajokban, üledékes kőzetekben, természetes és antropogén eredetű üledékekben előforduló kovás ásványi biomorf részecskék csoportjába tartoznak (1. ábra). A fitolitok mellett ebbe a csoportba tartoznak a kovamoszatok vázai (diatómák), szivacsfajok tüskéi, valamint kovásodott kutikula fragmentumok is (Pető 2009a). A hasonló tulajdonságoknak (pl. összetétel, fajsúly, méret) köszönhetően a fitolitok kinyerésére kidolgozott eljárások során a fitolitokon kívül egyéb kovás ásványi biomorf részecskék feltárása is megtörténhet. Magyarországi recens talajok fitolitikészletének elemzése során különösen a szivacsfajok tüskéi kerülhetnek elő nagyobb mennyiségben, amelyeknek fontos környezetjelző szerepük lehet (Pető 2009a).

A növényi fitolit-termelés jellemző tulajdonságai a multiplicitás, valamint a redundancia (Strömberg et al. 2018). Multiplicitás alatt azt értjük, hogy egy adott növényi egyed élete során többféle fitolit morfortípust állíthat elő, míg a redundancia a fitolitok esetében azt jelenti, hogy egy adott morfortípust több, akár egymástól jelentős taxonómiai távolságra levő növényfaj is előállíthat. Ennélfogva bár bizonyos diagnosztikus morfortípusok segítségével akár a fitolitok genus-, vagy fajsintű azonosítása is lehetséges, mégis érdemes a teljes feltárt fitolit készletet elemezni.



**1. ábra:** Talaj, üledékes kőzetek és egyéb üledékek biológiai eredetű mikromaradványainak morfo-genetikus felosztása (Golyeva 2001 nyomán)

**Fig. 1.:** Morphogenetic subdivision of microremains of biological origin in soil, sedimentary rocks and other sediments (based on Golyeva 2001)

Diagnosztikus morfortípusok azonosítása mellett szükséges az egyes morfortípusok relatív gyakoriságát, az abban bekövetkező változásokat is figyelembe venni (Lisztes-Szabó et al. 2013; McCune & Pellatt 2013; Strömberg et al. 2018).

A növényi opálszemcsék által közvetített környezeti információt egyaránt értelmezhetjük a régészeti növénytan és a környezettörténet keretein belül is. A régészeti növénytani kutatások esetében elsősorban az emberi tevékenységből származó ún. antropogén üledékek jelentik a mintavétel forrását. Az abból feltárt fitolit együttesek az ember és a növények közötti történeti kapcsolatról árulkodnak. A környezettörténeti vonatkozású kutatások esetében a bolygatatlan üledékek és talajokból származó minták adják az értelmezés alapját.

A régészeti növénytani értelmezésen belül számos lehetőség van arra, hogy a növényi opálszemcséket proxyként használjuk az egykori emberi közösségek növénytermesztési, növényhasznosítási és táplálkozástörténeti jellegzetességeinek megértéséhez. Ehhez a régészeti lelőhely biztosította mesterséges megtelepedési nyomok, sírok, antropogén üledék felhalmozódások adják a mintavételi pontokat. A lelőhelyen belüli minták csak szelektíven reprezentálják az adott emberi közösség, vagy időhorizont környezeti feltételeit. A

tudatosan, vagy véletlenszerűen behurcolt növényekkel, illetve a környezetben lezajló folyamatokkal (vö. **3. ábra**) lelőhelyen belülről került növényi opálszemcsék fontos, de jellemzően csak kiegészítő elemei egy-egy elvi környezet-rekonstrukciónak.

A környezetrekonstrukció teljesebbé tételéhez bolygatatlan üledékek, talajok vizsgálata vihet közelebb. Ebben a tekintetben a lösz-paleotalaj (-talaj) sorozatok jó elvi alapot kínálnak arra, hogy az időben jól lehatárolható felszínfejlődéssel kapcsolatban környezeti információhoz jussunk. A talajokban tárolódó növényi opálszemcsék fitolit készletet alkotnak, amelyek környezettörténeti, illetve egy adott időhorizont vonatkozásában, környezetrégészeti értelmezése nem lehet teljes a háttérhatások, tafonómiai folyamatok értékelése nélkül.

### ***A fitolit készlet fogalma, interpretációja***

#### **Fitolit készlet**

Talajból, üledékből, üledékes kőzetből feltárt fitolit készlet az egykori vegetációról nyújt információt, azonban szükséges azt is figyelembe venni, hogy az egykori vegetáció összetétele és az egykori növényzet szubsztrátumát alkotó talajokban, egyéb üledékekben, üledékes kőzetekben megőrződött, majd a terepi és laboratóriumi munka során kinyert fitolit készlet között nem vonható egyértelmű és teljes körű párhuzam. A kettő között számos helyen torzulások léphetnek fel, amelyekkel az őskörnyezeti rekonstrukció során számolni kell (Osterrieth et al. 2009; Pető 2011; Madella & Lancelotti 2012). Bekövetkezhet információvesztés (pl. különböző növényfajok eltérő, akár minimális, vagy hiányzó fitolit produkciója, vagy a tafonómiai folyamatok által szelektíven érintett fitolit morfortípusok), többletinformáció hozzáadása transzportfolyamatok által (allochton fitolitok akkumulálódása), vagy az információ átrendeződése (pl. pedogén folyamatok által a fitolit szignál talajszelvényen belüli vertikális átrendeződése, lásd: Pető 2011). Az egykori vegetációra vonatkozó információvesztésként értelmezhető az egyes növénycsoportok eltérő fitolit produkciója. A pázsitfűfélék (*Gramineae*) nagy mennyiségben állítanak elő fitolitokat, köztük diagnosztikus morfortípusokat (pl. Grass Silica Short Cell Phytoliths /GSSCP-k/, lásd **2. ábra**), míg például a fenyőfélék fitolit produkciója jellemzően sokkal kisebb, ennek megfelelően a hozzájuk köthető morfortípusok általában alulreprezentáltak a fitolit készletben, míg egyes lombhullató fajok egyáltalán nem is képeznek detektálható fitolitokat (McCune & Pellatt 2013; Strömberg et al. 2018; Lisztes-Szabó et al. 2019).

A helyi vegetációból, az adott növényi szövetből, annak bomlása során a környezetbe kerülő fitolitok által alkotott „elsődleges” fitolit készletben bekövetkező további torzulásokért a tafonómiai folyamatok a felelősek.

#### **Fitolit készletet érintő tafonómiai folyamatok**

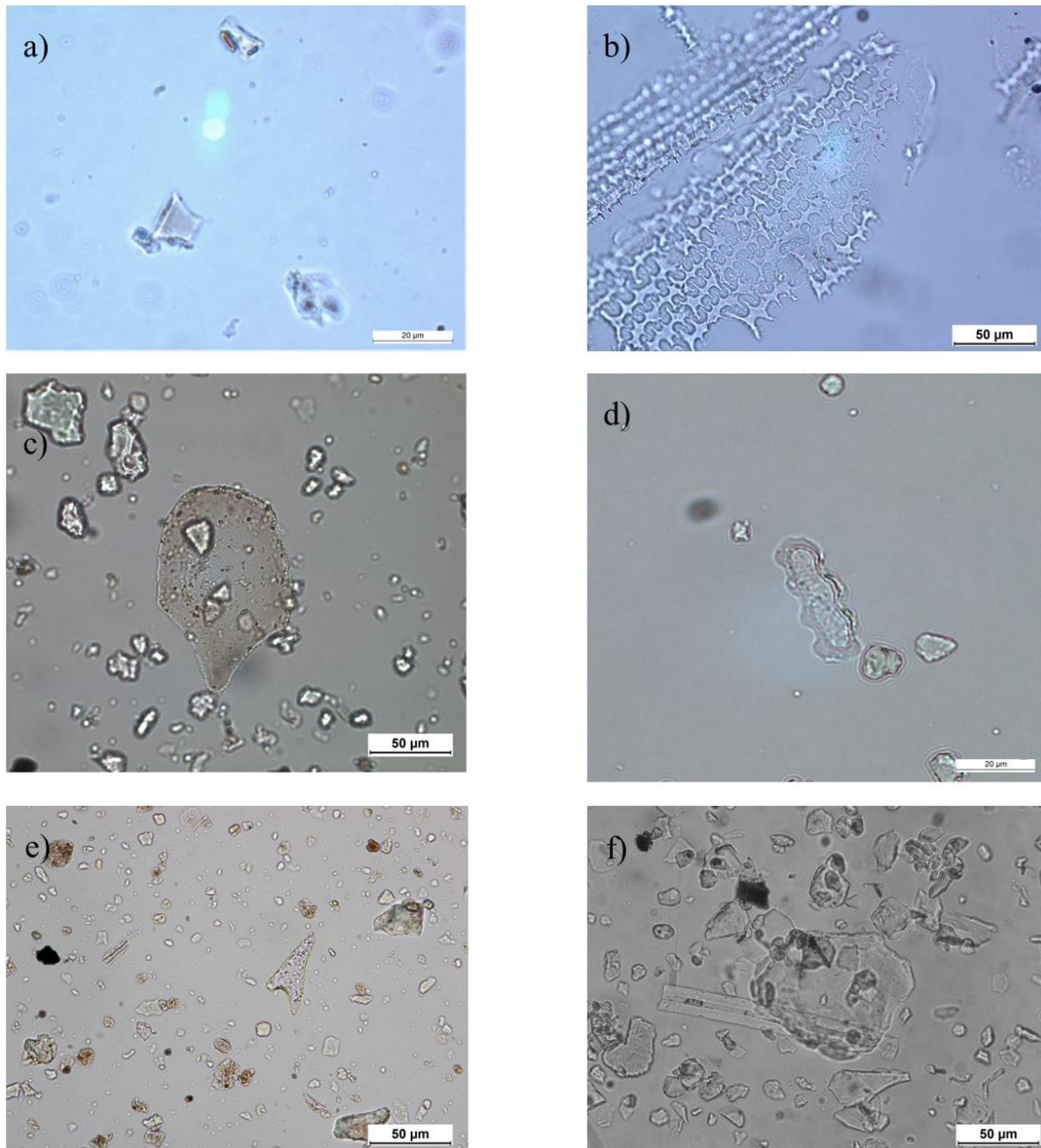
Tafonómia alatt Efremov az eredeti megfogalmazásában azt a folyamatot értette, amelynek során az állati és növényi maradványok a bioszférából a litoszféra részévé válnak, miközben a maradványok, maradvány-együttesek különböző módosulásokat szenvednek el (Lyman 2010; Madella & Lancelotti 2012). Általánosságban tafonómia alatt mindazokat a folyamatokat értjük, amelyek az adott állati, vagy növényi maradványra, maradvány-együttesre hatnak, befolyásolják azok állapotát, megjelenését, összetételét (Madella & Lancelotti 2012).

A tafonómiai folyamatokat jellemzően három részre szokás bontani (**3. ábra**). 1) Az első a nekrolízis, mely az adott élőlény halála (vagy az adott élőlény valamely testrésze, szerve elvesztése) idején lejátszódó folyamatokat tekinti át. 2) A biosztratinómia az élőlény halála/szerv elvesztése és a maradványok betemetődése között ható folyamatokra koncentrál, 3) míg a pedogenezis/ /diagenezis a betemetődés után lejátszódó folyamatokat jelenti (Osterrieth et al. 2009; Lyman 2010; Madella & Lancelotti 2012).

#### *Nekrolízis és biosztratinómia*

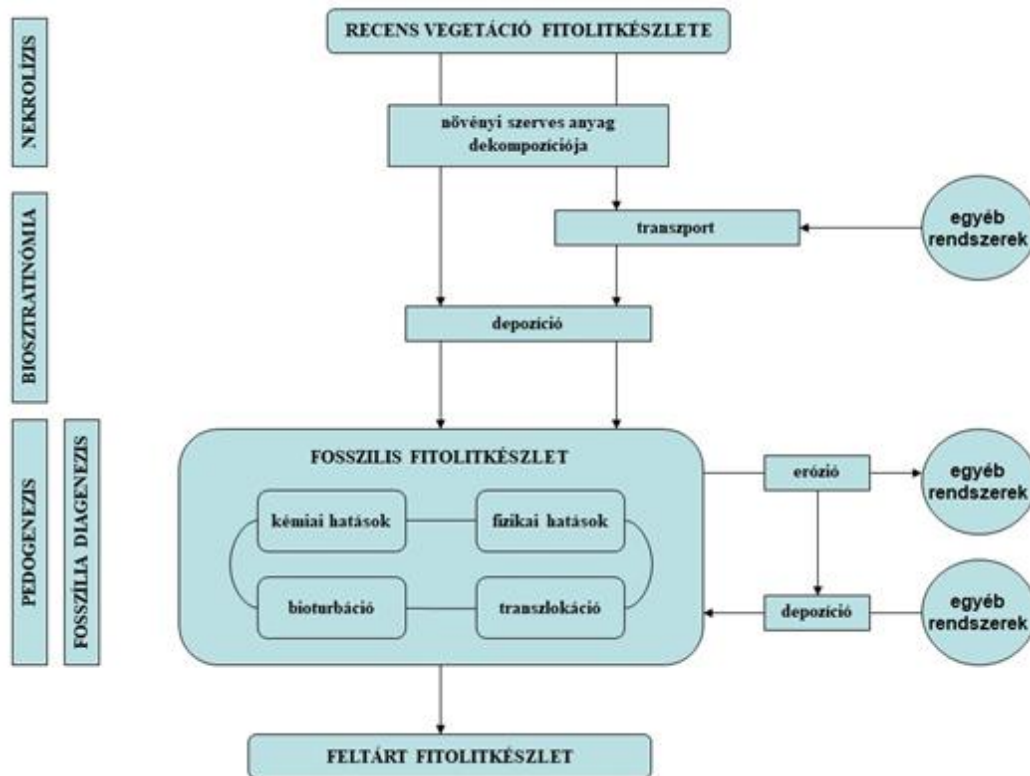
Fitolitok esetében a nekrolízis alatt az adott növényi szövet elbomlását (ami jelentheti a növény halálát, vagy csak a növény egyes részeinek, pl. termés, levél elvesztését) értjük. A biosztratinómia során jellemzően a különböző transzportfolyamatok hatnak. Elsősorban az adott növényi szövet, vagy a fitolitok tulajdonságaitól (pl. méret, tömeg), a nekrolízis során a maradvány környezetbe kerülésének módjától, valamint bizonyos környezeti faktoroktól (pl. szél erősség, domborzat, hidrológiai viszonyok, növényzeti borítottság) függ, hogy ezek a transzportfolyamatok milyen távolságra képesek eljuttatni az adott növényi szövetet, vagy a dekompozíció után az adott növényi opálesteket.

Mivel a fitolitok általában nem a nagyobb távolságok megtételére optimalizált szövetekből szabadulnak fel, valamint maguk a fitolitok viszonylag nagyobb méretűek és tömegűek, így a transzportfolyamatokban korlátozottan vesznek részt. Általában kisebb távolságokat képesek megtenni, így a talajokból kinyert fitolit készlet jellemzően a lokális vegetációt reprezentálja, ennek megfelelően lokális indikátornak tekinthetjük (Madella & Lancelotti 2012; Strömberg et al. 2018).



**2. ábra:** A szövegben említett egyes fitolit morfortípusok illusztrációja. a) Pázsitfüvek bőrszövetében keletkező epidermális rövid sejt (GSSC – Grass Silica Short Cell), ún. Rondelmorfortípus fénymikroszkópi képe Perkáta–Forrás-dűlő régészeti lelőhely PK5-ös számú fúrásának 110–120 cm-es rétegmintájából; b) Alakor búza (*Triticum monococcum* L. subsp. *monococcum*) pelyvaleveléből preparált epidermális hosszúsejtek, ún. Elongate dendritic morfortípus (GSLC – Grass Silica Long Cell); c) Nagy méretű bulliform sejt (Bulliform flabellate morfortípus) mikroszkópi képe egy sztyeppesedő réti szolonyec talaj (PA21) felső 0–5 cm-es rétegéből; d) Epidermális hosszúsejt (GSLC – Grass Silica Long Cell), ún. Tabular elongate clavate mikroszkópi képe egy sztyeppesedő réti szolonyec talaj (PA21) felső 2–5 cm-es rétegéből; e) Elkovásodott szőrsejt, ún. Lanceolate entire mikroszkópi képe egy ranker (PA8) felső 2–4 cm-es rétegéből; f) szivacsüstiske mikroszkópi képe Csípő-halom (Hortobágy) CS1-es magmintájából. (A szerzők saját felvételei)

**Fig. 2.:** Illustration of some phytolith morphotypes mentioned in the text. a) Epidermal short cell (GSSC – Grass Silica Short Cell), light microscopic image of Rondelmorphotype from PK5 core sample (relative depth: 110–120 cm) taken at Perkáta–Forrás-dűlő archaeological site; b) Epidermal long cells of einkorn (*Triticum monococcum* L. subsp. *monococcum*) palea (in fluorescence), Elongate dendritic morphotype (GSLC – Grass Silica Long Cell). c) Microscopic image of a large bulliform cell (Bulliform flabellate morphotype) from the upper 0–5 cm layer of a solonetz soil (PA21); d) Epidermal long cell (GSLC - Grass Silica Long Cell), microscopic image of Tabular elongate clavate morphotype from the upper 2–5 cm layer of a solonetz soil (PA21); e) Silicified trichome, microscopic image of Lanceolate entire from the upper 2–4 cm layer of a ranker soil (PA8); f) microscopic image of a sponge spicule fragment from the CS1 core sample of Csípő-halom kurgan (Hortobágy). (Own images of the authors)



**3. ábra:** Talaj, üledékes kőzetek és egyéb üledékek fitolit készletét érintő tafonómiai folyamatok (Osterrieth et al. 2009 alapján)

**Fig. 3.:** Taphonomic processes affecting the phytolith stock of soil, sedimentary rocks and other sediments (based on Osterrieth et al. 2009)

Bizonyos körülmények között a nagyobb távolságú transzportfolyamatok által érintett fitolitok megjelenhetnek, vagy akár dominálhatnak a kinyert fitolit készletben (pl. tengeri, tavi üledékek fitolit készlete). A fluviális transzport jellemzően az árterek, tavi üledékek fitolit készletét érinti, melyek segítségével a vízgyűjtőre vonatkozó információkat nyerhetünk (Yost et al. 2018), míg szárazföldi, tengeri környezetben, valamint bizonyos körülmények között tavi üledékek (Aleman et al. 2014) esetében az eolikus szállítás hatása jelentkezik erőteljesebben, amelyben jellemzően a 20 µm alatti fitolitok vesznek részt akár magányosan, akár aggregátumokba zárva (Osterrieth et al. 2009; Strömberg et al. 2018). Tudománytörténeti érdekesség, hogy Charles Robert Darwin 1831 januárjában a Zöld-foki szigetek közelében gyűjtött szél által szállított pormintákat a Beagle fedélzetén. A begyűjtött pormintákat később a „fitolitok atyjának” tartott német Christian Gottfried Ehrenberg professzornak adta át, aki számos növényi opálszemcsét mutatott ki bennük (Pető 2009b).

Előfordulhat, hogy a nekrolízis és a biosztratinómia körébe tartozó folyamatok egymáshoz időben nagyon közel játszódnak le. Például tűz esetén az égő vegetáció maradványainak egy része nem a

földfelszínre kerül, hanem közvetlenül a légkörbe jut, ahol nagyobb távolságok megtételére is mód nyílik (Aleman et al. 2014; Selkin et al. 2015). A tűz hatásának kitett, különböző mértékben megégett fitolitok jellegzetes változásokat szenvedhetnek el, így detektálásuk lehetséges, melyet a fitolit készlet környezetrekonstrukciós vizsgálatok során végzett kiértékelésekor lehet hasznosítani (Gu et al. 2008; Aleman et al. 2014; Selkin et al. 2015; Evett & Cuthrell 2017; Yost et al. 2018; Dong et al. 2022; Meng et al. 2022).

Fitolitok laterális transzportjára (laterális transzport alatt azt kell érteni, hogy nem a szelvényen belüli vertikális átrendeződés történik, hanem az adott fitolit, vagy az adott növényi opálszemcsét tartalmazó növényi szövet földrajzi koordinátái változnak meg) sor kerülhet állatok segítségével is, mely jellemzően a növényi szövetek elfogyasztását, elraktározását jelenti. Az ilyen módon elszállított fitolitokat koprofitokba zárva (Horrocks et al. 2003; Prasad et al. 2005; Persaits 2010; Blong & Shillito 2021), esetleg az adott növényt elfogyasztó állat, vagy akár ember maradványai között, pl. fogakhoz tapadva, fogköbe, fogzománcba beágyazódva (Persaits 2010; Wu et al. 2018; Kelentey et al. 2021; Lisztes-Szabó et al. 2021) figyelhetjük meg. A koprofitokba, és egyéb ősmaradványokba zárt

fitolit készlet pontszerű megjelenést jelent, mely jelentősen eltérhet az azt befogadó talaj, üledék, üledékes kőzet fitolit készletétől. Az eltérés mértéke az egykori környezet diverzitásától és az adott növényi szövetet elfogyasztó állat migrációs képességétől függ. A nagyobb méretű, mobilisabb élőlények esetében tehetnek meg jelentősebb távolságot az állati szállítást igénybe véve a növényi maradványok, beleértve a fitolitokat is (Janzen 1984; Panter & Dolman 2012). A koprolitokba zárt, vagy a fogak közül kinyert fitolitok a környezetrekonstrukcióban betöltött szerepükön túl értékes információkkal szolgálhatnak az egykori trofikus kapcsolatokról is (Prasad et al. 2005; Blong & Shillito 2021). Lisztes-Szabó et al. (2021) fogkőbe tapadt fitolitok segítségével vont le következtetéseket az Alföld keleti részén élt, a Jamnaja-kultúrához tartozó közösség életmódjával, gazdálkodásával kapcsolatban.

A növényi opáltetek mind a nekrolízis, mind a biosztratinómia, mind a pedogenezis/diagenezis fázisaiban lejátszódó folyamatok során elszenvedhetnek fizikai (mechanikai) és kémiai (oldódásos) sérüléseket. Mechanikai sérüléseket szenvedhetnek el a nekrolízis során, például abban az esetben, ha az adott növényi szövetet egy növényevő állat fogyasztja el (Hunt et al. 2008; Persaits 2010; Strömberg et al. 2016), azonban a mechanikai sérülések többségéért valószínűleg a transzportfolyamatok a felelősek. Mechanikai sérülések esetében különböző kopások, törések figyelhetők meg a fitolitok felületén, melyek a nagyobb méretű, hosszabb, több függelékkel tartalmazó fitolitokat érintik erőteljesebben (pl. *elongate*, *bilobate*, *polylobate* morfortípus, lásd **2. ábra**), míg a kisebb méretű, kompaktabb növényi opálszemcsék (pl. *spheroid*, *bulliform* morfortípus, lásd **2. ábra**) ellenállóbbak a mechanikai behatásokkal szemben (Osterrieth et al. 2009). A kisebb méretű fitolitok (pl. *spheroid* morfortípus) megőrződését segítheti, ha nagyobb méretű aggregátumokba zárva kerül sor a szállításukra, mely esetben akár teljesen elkerülhetik a transzportfolyamatok során bekövetkező mechanikai sérülések elszenvedését (Osterrieth et al. 2009). A fitolitok kinyerésére használt standard eljárások során az aggregátumok szétesése következik be, amelynek során az esetlegesen az aggregátumokba zárt fitolitok kiszabadulnak. Ezekről a szállítás során védett helyzetben lévő, így sérülésmentes fitolitokról – amennyiben a mikroszkópos megfigyelés előtt kiszabadulnak az addig őket védelmező aggregátumokból - sérülések hiányában nem lehet utólag – csupán a fitolitok megőrződése – alapján megállapítani, hogy helyben képződött autochton, esetleg aggregátumokba zárt allochton fitolitok (Osterrieth et al. 2009). Az allochton fitolitok kiszűrése érdekében az egyes fitolitok tulajdonságai mellett érdemes megvizsgálni a teljes fitolit készletet, az egyéb proxy adatokat, valamint

az adott üledékes rendszer „összképét” (pl. egy löszkőtegből származó minta esetében nem számítunk trópusi növényekhez köthető autochton fitolitokra).

#### *Pedogenezis/Diagenezis*

A betemetődés után, a pedogenezis/diagenezis folyamata során a fitolit készlet további jelentős módosulásokat szenvedhet el, mely módosulások a fitolitok belső tulajdonságai, valamint a környezet állapotának függvényében, ezek egymásra gyakorolt hatásoként jönnek létre.

Pedogenezis/diagenezis során keletkeznek a fitolitok anyagának oldódásával létrejövő kémiai sérülések (Borrelli et al. 2010; Song et al. 2016). A pedogén folyamatok fitolitokra, fitolit készletre gyakorolt hatásával kapcsolatban intenzív kutatások zajlanak (Frayssse et al. 2009; Borrelli et al. 2010; Cabanes et al. 2011; Cabanes & Shahack-Gross 2015; Song et al. 2016). A fitolitok oldódását, vagy az ezzel ellentétes megközelítés szerint ellenálló képességét számos tényező befolyásolja.

A fitolitok belső tulajdonságai közül a legfontosabbak az alak, a méret, a fejlettségi stádium, valamint a fitolitok elemösszetétele. Cabanes & Shahack-Gross (2015) kutatásai alapján a legfontosabb tényező, amely az oldódást befolyásolja a fitolitok felület/térfogat aránya. Minél alacsonyabb ez az érték a fitolitok annál ellenállóbbak a kémiai behatásokkal szemben. További fontos faktort jelent a fitolitok fejlettségi stádiuma, amit még az élő növényen belül elértek. A fejlettségi stádium elsősorban a növény szilícium-akkumulációs affinitásától, a környezetben a növény számára felvehető formában jelen lévő monokovasav koncentrációjától, valamint a rendelkezésre álló időtől függ. A kevésbé fejlett fitolitok (pl. nem állt elég idő rendelkezésre a megfelelő mennyiségű szilícium-akkumulációjához) kevésbé ellenállóak az oldódásos folyamatok hatásaival szemben (Osterrieth et al. 2009). Ezen kívül a fitolitok elemösszetétele is fontos tényező. Osterrieth et al. (2009) kutatásai szerint minél magasabb a SiO<sub>2</sub> aránya, minél kisebb az egyéb, ebből a szempontból szennyező elemek aránya, annál kevesebb nyomát mutatják a fitolitok az oldódásos sérüléseknek. Erre a jelenségre magyarázatot jelenthet, hogy az idegen elemek beépülése szabálytalanságokat eredményezhet a rácsszerkezetben, mely kevésbé ellenállóvá teszi a fitolitokat (Osterrieth et al. 2009). Ezzel ellentétes magyarázatot kínálnak Lisztes-Szabó et al. (2020) eredményei, mely szerint az idegen elemek beépülése az oldódás során következik be, ennél fogva az egyéb elemek magasabb aránya következménye, nem pedig okozója a fitolitok oldódásának. Az oldódás során beépülő elemek a fitolitok színében is változást okozhatnak, amik sötétebbé, barna, vagy akár fekete színűvé

válhatnak. A sötét színt az égés egyik indikátorának tartják, így fennáll a lehetősége égett fitolitok téves azonosításának (Lisztes-Szabó et al. 2020). Más kutatások az AI szerepére hívják fel a figyelmet, mely elősegítheti a fitolitok stabilitását (Cabanes & Shahack-Gross 2015; Song et al. 2016). Azonban Fraysse et al. (2009) kutatása során nem talált ilyen jellegű kapcsolatot, így az AI-tartalom és fitolitok oldódási folyamatokkal szembeni ellenállása közötti összefüggés továbbra sem tisztázott. Cabanes et al. (2011) kutatásai alapján a növényi opáltestek oldódására az is hatást gyakorol, hogy megégetek-e, vagy sem. Az égési események nyomait viselő fitolitok az oldódási folyamatokra intenzívebben reagálnak, mint az ebből a szempontból ép növényi opálszemcsék.

A környezeti faktorok közül egyaránt szerepet játszanak a pH, a redox viszonyok, a hidrológiai viszonyok, a biológiai aktivitás, a szerves anyagok jelenléte, valamint a betemetődés sebessége, az üledékképződés intenzitása. A fitolitok oldódása a pH növekedésével egyre intenzívebbé válik. Minimális értékét 3 pH körül éri el, míg az oldódás 8–8,5 pH fölött válik különösen intenzívvé (Fraysse et al. 2006; Fraysse et al. 2009; Cabanes et al. 2011; Cabanes & Shahack-Gross 2015; Strömberg et al. 2018; Lisztes-Szabó et al. 2020). A fitolitok, ellentétben a talajokban, üledékekben, üledékes kőzetekben található szerves biomorfi részecskékkel (pl. pollenek) az oxidatív viszonyokat jól viselik. A redox viszonyok közvetlenül nem befolyásolják a fitolitok megőrződését, azonban a váltakozó redukzív és oxidatív viszonyok hatására a kvarc szemcsékhez és agyagásványokhoz hasonlóan a fitolitok felületén is képződhetnek vas(III)-oxid bevonatok (Van Groeningen et al. 2020), melyek jelentősen csökkentik a fitolitok oldhatóságát (Koebernick et al. 2022). Ez a hatás már egy ciklus után kimutatható, azonban minél többször ismétlődik meg a redukzív és oxidatív viszonyok váltakozása, annál erőteljesebben jelentkezik a fitolitok oldhatóságának csökkenése (Koebernick et al. 2022). A fitolitok környezetében oldott formában jelenlévő szilícium koncentráció szintén hatással van a fitolitok oldhatóságára (Cabanes et al. 2011). Amennyiben a vízben oldott szilícium koncentrációja eléri az egyensúlyi szintet a fitolitok oldódása jelentősen lecsökkenhet, akár meg is állhat, azonban, ha a rendszerből valamiért (pl. a növények felveszik a talajoldatból a szilíciumot a számukra elérhető monokovaszav formájában) folyamatosan eltávozik az oldott szilícium egy része, akkor a fitolitok oldódása folytatódik (Cabanes et al. 2011). Azok a fitolitok, melyek a transzportfolyamatoknak köszönhetően, olyan helyen akumulálódnak, ahol korlátozott, vagy teljesen hiányzik a növényi aktivitás (pl. sziklaüregek, barlangok), jellemzően jó megőrződésűek, amennyiben ellentétes irányú, egyéb hatások (pl. magas pH-jú környezet) nem érik őket

(Cabanes & Shahack-Gross 2015). A magas szedimentációs ráta, a gyors betemetődés elősegítheti a fitolitok megőrződését (Cabanes et al. 2011, Cabanes & Shahack-Gross 2015), melyre magyarázatot kínálhat a felszíntől távolodva korlátozottabban jelentkező, vagy hiányzó növényi aktivitás.

Fraysse et al. (2006) megfigyelése szerint a recens növénytípusokból kinyert növényi opáltestek intenzívebben vesznek részt az oldódási folyamatokban, míg az idősebb, talajokból, származó fitolitok ellenállóbbak. Erre a megfigyelésre magyarázatot kínálhat, hogy a pedogenezis/diagenézis során ható oldódási folyamatok a kevésbé ellenálló fitolitokat, fitolit részecskéket (pl. vékonyabb, sérülékenyebb függelékek, mintázatok) már megsemmisítették, esetleg az oldhatóságot csökkentő bevonat képződésére (Koebernick et al. 2022) nyílt mód a fitolitok felületén.

A sérülékeny függelékek, fitolitok felszínén megfigyelhető mintázatok jelenléte, állapota jó indikátora a feltárt fitolit készlet megőrződésének. Amennyiben ezek az érzékeny formák jó megőrződésűek valószínűsíthető, hogy az oldódási folyamatok nem módosították jelentősen az akumulálódt fitolit készletet (Cabanes et al. 2011; Lisztes-Szabó et al. 2020).

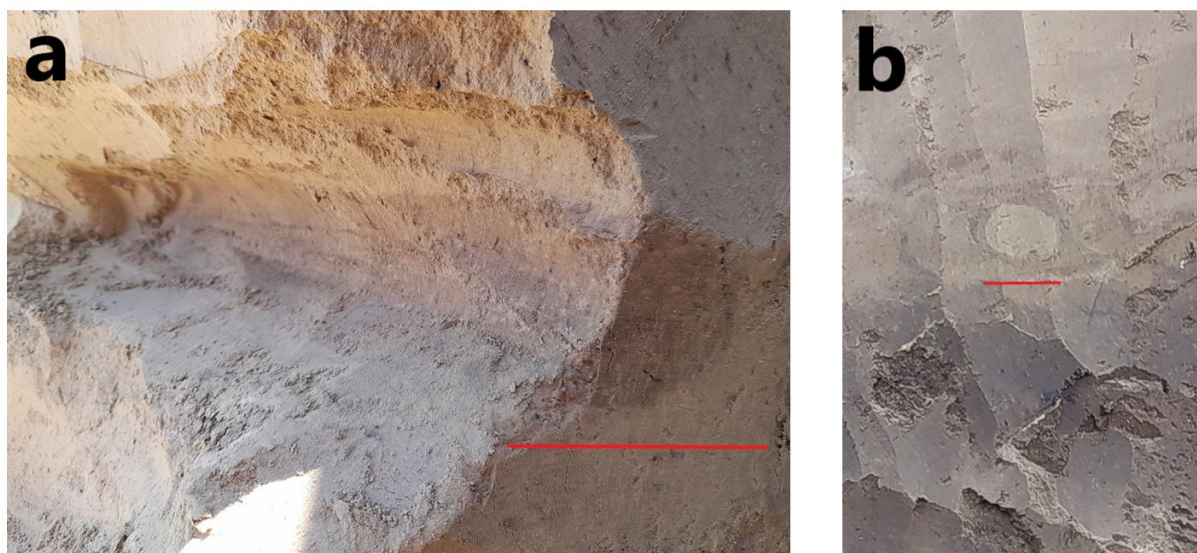
A pedogenezis/diagenézis során is hatnak transzportfolyamatok, melyek elsősorban a fitolitok vertikális, tehát a szelvényen belüli eloszlását módosíthatják (Fishkis et al. 2010a; Fishkis et al. 2010b). A fitolitok tulajdonságai, valamint a releváns környezeti tényezők határozzák meg, hogy a növényi opálszemcsék részt vesznek-e, és ha igen milyen mértékben a vertikális transzportfolyamatokban. A fitolitok belső tulajdonságai közül elsősorban a méret játszik szerepet. A kisebb méretű fitolitok (pl. *saddle* morfortípus) könnyebben vesznek részt a vertikális transzportfolyamatokban, mint a nagyobb méretűek (pl. *bulliform*, *elongate* morfortípusok, lásd **2. ábra**). A környezeti tényezők közül a talaj szerkezete (pl. aggregátumok képződése, pórustér), a perkolációs vizek áramlása, valamint a biológiai aktivitás (bioturbáció), továbbá az esetleges szedimentációs, vagy eróziós ráta, a felszín stabilitásának szerepe jelentős (Fishkis et al. 2010a; Fishkis et al. 2010b; Strömberg et al. 2018).

Élőlények tevékenységéhez köthető folyamat a bioturbáció, melynek során nagyobb mennyiségű anyag, köztük akár fitolitok is áttelepítésre kerülhetnek a szelvényen belül (Fishkis et al. 2010a; Madella & Lancelotti 2012; Calegari et al. 2013). Amennyiben viszonylag nagyobb mennyiségű anyag áttelepülésére kerül sor, például gerincesek, rovarok (pl. hangyák, termeszek) járatainak kitöltődésével (krotovinák), a nagyobb méretű fitolitok transzportja is könnyebben bekövetkezhet az áttelepülő anyaggal együtt

**(4. ábra).** A krotovinákat kitöltő anyag fitolit készlete jelentős mértékben eltérhet a vele egy szintben található környezete fitolit készletétől. A krotovinákat létrehozó bioturbáció során nem feltétlenül jelentkezik a Fishkis et al. (2010a) által megfigyelt jelenség, melynek során a kisebb méretű fitolitok könnyebben vesznek részt az elsősorban a talaj pórusteréhez (a fitolitok méretéből adódóan elsősorban a makropórusok tulajdonságai játszanak szerepet ebben a folyamatban) köthető vertikális transzportfolyamatokban.

A fentebb ismertetett folyamatok hatására recens talajszelvények esetében megfigyelhető, hogy a felszínhez legközelebb elhelyezkedő A-szint fitolit koncentrációja a legmagasabb, mely a felszíntől távolodva gyorsan csökken (Petó 2009a; Song et al. 2016; Strömberg et al. 2018). Mindez annak köszönhető, hogy egy aktívan fejlődő, eróziós folyamatok által lényegesen nem érintett talaj esetében az A-szint fitolit bevétele (lokális vegetáció által termelt növényi opálszemcsék, valamint a különböző laterális transzportfolyamatok által szállított allochton fitolitok akkumulációjára a felszínen kerül sor) jelentősen meghaladja a fitolit veszteséget (pl. a felszín közelében jelentkező intenzív oldódási folyamatoknak, többek között a biológiai aktivitásnak köszönhetően, vagy a vertikális transzportfolyamatok által a mélyebb rétegekbe juttatott fitolitok). Amennyiben az A-szint nem vált az erózió áldozatává hasonló eloszlás várható az eltemetett fosszilis talajszelvények esetében is (Song et al. 2016).

Annak a megállapítása, hogy az adott közegből kinyert fitolit készleten belül az autochton és allochton fitolitok aránya mekkora, az adott fitolit készlet milyen mértékben reprezentálja a lokális vegetációt, hogy mekkora a kinyert fitolit készlet térbeli (laterális transzportfolyamatok hatása), és időbeli (vertikális transzportfolyamatok hatása) felbontása körültekintő vizsgálatot igényel. Összességében az várható, hogy szárazföldi környezetben, különösen jól záródó lombkoronájú vegetáció alatt fejlődő talajok esetében az autochton fitolitok dominálnak a fitolit készleten belül, amely ebben az esetben lokális indikátornak tekinthető. Az olyan talajok, üledékek, üledékes kőzetek esetében, ahol megnő a laterális transzportfolyamatok, elsősorban az eolikus és a folyóvízi szállítás szerepe, a különböző távolságból származó allochton fitolitok aránya megnőhet, akár dominánssá, vagy kizárólagossá (pl. szárazföldről távoli tengeri üledékek) is válhat a fitolit készleten belül. Ebben az esetben a transzportfolyamatok vizsgálatával lehetőség nyílik a fitolitok forrásterületének/forrásterületeinek azonosítására, így a kibocsátó terület(ek)en bekövetkező változások detektálására nyílik mód (Yost et al. 2018). A vertikális transzportfolyamatok által kevésbé érintett, finoman rétegzett üledékek, üledékes kőzetek (pl. mélyebb vízi tavi, tengeri üledékek) időbeli felbontása várhatóan sokkal jobb, mint egy hosszú ideig fejlődő, vertikális transzportfolyamatok (pl. intenzív bioturbáció) által jelentősen érintett talajé.



**4. ábra:** Löss-paleotalaj sorozatokban megfigyelhető állatjáratok, krotovinák: a) löszrétegsoron belüli krotovina paleotalaj rétegből származó kitöltéssel, Mende; b) egy paleotalaj feletti átmeneti rétegből található krotovina Süttőn, amelyet löszből származó világosabb színű anyag tölt ki. Méretarány 5 cm. (A szerzők saját felvételei)

**Fig. 4.:** Animal passages, crotovinas can be observed in loess-paleosol sequences: a) crotovina within a loess layer, crotovina filling derived from a paleosol layer, from Mende; b) crotovina found in a transitional layer above a paleosol in Süttő, which is filled with lighter-colored material from loess. Scale bar is 5 cm. (Own images of the authors)



### Fitolit készlet kiértékelése

A fitolitokat sikerrel alkalmazzák, paleontológiai, öskörnyezeti rekonstrukciós, valamint régészeti kutatások során is (Hart 2016, Zurro et al. 2016). Vegetációrekonstrukció kivitelezéséhez érdemes referencia adatbázisokat kiépíteni, vagy már kiépített adatbázisokra támaszkodni elősegítve ezzel a kinyert fitolit készlet megfelelő interpretációját. A referencia adatbázisok a recens növények, közösségek által termelt fitolitokat, fitolit készletet tartalmaznak, melyek segítségével növényi, valamint talaj referenciabázisok összeállítására nyílik mód.

A növényi referenciabázisok recens növények fitolit készletét tartalmazzák, amely során igyekeznek a lehető legalacsonyabb taxonómiai szinten diagnosztikus fitolit morfortípusokat meghatározni (Delhon et al. 2003; Lisztes-Szabó et al. 2013; McCune & Pellatt 2013; Watling & Iriarte 2013; Pearsall 2016; Lisztes-Szabó et al. 2019).

Recens növénytársulások alatt fejlődő talajok fitolitikészletének szisztematikus vizsgálatával mód nyílik talaj referenciabázisok összeállítására. A talaj referenciabázisok tartalmazzák az adott növénytársulások alatt fejlődő talajok fitolitikészletének összetételét, az egyes morfortípusok fitolit készleten belüli arányát, továbbá törekednek az egyes növénytársulások elkülönítésére alkalmas diagnosztikus morfortípusok, vagy indikátorcsoportok meghatározására (Blinnikov et al. 2002; Delhon et al. 2003; Bremond et al. 2008a; McCune & Pellatt 2013; Pető 2013).

A mintákból kinyert fitolit készletet a referencia adatbázisokkal összevetve, az adott környezetre jellemző tafonómiai folyamatokat figyelembe véve – megfelelően megőrződött fitolit készlet esetén – lehetőség nyílik a részletesebb vegetációrekonstrukcióra is. A vegetáció és a környezet kölcsönhatásának ismeretében a fitolit készlet kiértékelése lehetővé teszi különböző indexek (bizonyos morfortípusok egymáshoz, vagy a teljes fitolit készlethez viszonyított aránya), vagy egyéb összefüggések segítségével a vegetáció összetételére, vagy bizonyos környezeti faktorokra vonatkozó következtetések levonását (Bremond et al. 2005a; Madella et al. 2009). Az indexek közül a D/P (kétszikűekre jellemző morfortípusok / pázsitfűvek jellemző morfortípusai), a Pi/P (fenyőfélékre jellemző morfortípusok / pázsitfűvek jellemző morfortípusai), vagy a T/P (D/P + Pi/P) indexek értékeiből a fás szárú vegetáció arányára lehet következtetni (Delhon et al. 2003; Bremond et al. 2005b; Bremond et al. 2008b; Aleman et al. 2014; Yost et al. 2018). Az Iph (saddle/saddle + cross + bilobate) morfortípusok), vagy az Fs (bulliform/összes azonosítható morfortípus) indexek használatával a pázsitfűvekre jellemző fitolitok segítségével vonnak le a vízellátottságra vonatkozó

következtetéseket (Bremond et al. 2005a; Bremond et al. 2008b; Aleman et al. 2014; Yost et al. 2018). Madella et al. (2009) és Jenkins et al. (2016) a vízellátottság és a fitolit produkció intenzitása között tárt fel összefüggéseket. Lu et al. (2006) recens talajok fitolit készlete és a klíma kapcsolatát vizsgálta, és tárt fel összefüggéseket, mely eredményeket később lösz-paleotalaj sorozatokból kinyert fitolit készleten alkalmazták, és vontak le paleoklimatológiai következtetéseket (Lu et al. 2007).

### Lösz-paleotalaj sorozatok fitolit készlete

#### Lösz-paleotalaj sorozatok

A löszök a negyedidőszak jellemző üledékes kőzetei, melyek a szárazfölközeli megközelítőleg 10%-án borítják a felszínt, jelentik a recens talajok számára a talajképző kőzetet (Pécsi 1990; Pécsi 1993; Fitzsimmons et al. 2012; Muhs 2013; Sümegi et al. 2018). Az Antarktisz kivételével valamennyi kontinensen található löszök, vagy löszszerű üledékes kőzetek, üledékek (Pécsi 1990). A löszökre jellemző a viszonylag jó osztályozottság, amelyet a durva kőzetliszt frakció dominanciája jellemez, valamint jellemzően magas karbonát tartalommal bírnak. A durva kőzetliszt frakció dominanciája, valamint a jó osztályozottság az eolikus úton történő szállítással áll összefüggésben. A durva kőzetliszt frakció változatos módon, eltérő környezeti feltételek mellett képződhet. Képződésében részt vehetnek glaciális (pl. gleccserek), periglaciális (pl. fagyaprózódás), vagy akár sivatagi környezetre (különböző arid területekre jellemző aprózódási folyamatok, pl. só aprózódás) jellemző folyamatok is, valamint a különböző transzportfolyamatok (pl. fluvialis, eolikus, lejtős tömegmozgások) során is mód nyílik durva kőzetliszt méretű szemcsék képződésére (Pécsi 1993; Muhs 2013; Varga 2016; Fenn et al. 2022). Amíg a szálban álló kőzettől eljut egy adott szemcse addig, hogy egy löszkötegben akkumulálódjon akár több szállítási-üledési cikluson is áteshet (Bugge et al. 2008; Smalley et al. 2009; Újvári et al. 2012; Muhs 2013; Thamó-Bozsó et al. 2014; Profe et al. 2018; Gaita 2020; Fenn et al. 2022). Az utolsó szállítási esemény eolikus úton történik, amely biztosítja a löszkötegekben megfigyelhető jó osztályozottságot. A forrásterületől távolodva a szemcseeloszlás jellegzetes képet mutat. A forrásterülethez legközelebb a nagyobb méretű, homokfrakcióba tartozó szemcsék ülednek le, míg az ennél finomabb, kőzetliszt (szilt) mérettartományba eső szemcsék valamivel távolabb akkumulálódnak (Muhs 2013; Varga 2016; Lehmkuhl et al. 2021). A kisebb, agyag mérettartományba eső szemcsék hosszabb, akár több ezer km-es útra is kelhetnek (Pye 1995; Muhs 2013; Varga 2016). Lösz-paleotalaj sorozatok képződésére abban a tartományban van mód, ahol a

durva kőzetliszt frakció dominál. A szél által szállított durva kőzetliszt mérettartományba eső szemcsék akkumulációjára szárazföldi (szub-aerikus) környezetben kerül sor (Pye 1995; Varga 2016). Az üledés helyén számolni kell bizonyos összetételű, sűrűségű vegetációval, amely képes megakadályozni a leülepedett anyag újbóli áttelepítését (Smalley et al. 2011; Varga 2016). A fentebb említett tulajdonságok, folyamatok, vagyis (1) a durva kőzetliszt frakció dominanciája, (2) a legalább az akkumuláció előtti utolsó lépésben elengedhetetlen eolikus transzport, valamint (3) a szárazföldi (szub-aerikus) környezetben történő akkumuláció jelentik a lösz legfőbb kritériumait (Pye 1995).

Korábbi periódusokban létrejött idősebb lösz-paleotalaj sorozatok is elszenvedhetnek eróziót (pl. megváltozott domborzati, hidrológiai, klimatikus viszonyok, vagy a vegetációban bekövetkező változások hatására) majd az anyaguk a fentiekben bemutatott transzportfolyamatok során akár fiatalabb lösz-paleotalaj sorozatok anyagában is akkumulálódhat. Ezt a folyamatot eolikus kannibalizmusnak (*eolian cannibalism*) nevezzük. A Kínai-löszfennsík esetében különösen szép példákat találhatunk erre a folyamatra (Licht et al. 2016).

A löszköteget jellemzően különböző típusú, fejlettségű paleotalajok, paleotalaj komplexumok tagolják. Ezek a markánsan eltérő rétegek jelzik, hogy a talajosodási folyamatok erőssége és az üledékképződés intenzitása időben változott (Varga 2015). A jelenleg mérsékelt éghajlati övezetben található fiatalabb lösz-paleotalaj sorozatok esetében a löszkötegek jellemzően hidegebb, szárazabb periglaciális környezetben képződtek (a kora pleisztocénben ezzel szemben meleg-arid, meleg-szubhumid szakaszok is elkülöníthetők a rétegsorban), ahol a talajosodási folyamatok intenzitását jelentősen meghaladta az eolikus úton szállított anyag mennyisége (Varga 2011; Varga 2016). A porkibocsátás növekedését közvetlenül (pl. szélerősség növekedése), és közvetve (a romló körülmények, pl. szárazodás és/vagy lehülés hatására gyérebbé váló, vagy eltűnő növényzet a forrásterületeken; vagy a durva kőzetliszt frakció előállításában résztvevő folyamatok intenzitásának növekedése) a klimatikus viszonyok megváltozása segítette elő (Varga 2016). Ezek a feltételek jellemzően a glaciálisok, stadiálisok során jelentkeztek. Míg a különböző fejlettségű talajok esetében melegebb, csapadékosabb környezetet feltételezhetünk, ahol a talajosodási folyamatok intenzívebbé váltak, valamint az eolikus úton szállított anyag mennyisége is lecsökkenhetett ezekben az időszakokban. Ezek a körülmények jellemzően az interstadiálisok, interglaciálisok során álltak fenn (Pécsi 1993; Varga 2011; Muhs 2013). A löszökre jellemző a bimodális

szemcseeloszlás, ahol a közeli forrásból származó durvaszemcsés (finom kőzetlisztnél nagyobb méretű szemcsék) komponens dominanciája mellett megjelenik a távoli forrásból származó háttérpor hatása is, mely a finomszemcsés (agyag és finom kőzetliszt méretű szemcsék) komponens által alkotott másodlagos maximumként jelenik meg (Varga 2011; Varga 2016). A lösz-paleotalaj sorozatok paleotalajai számára az alapközetet jellemzően a löszkötegek jelentik, így a szemcseeloszlási görbéik is nagyfokú hasonlóságot mutatnak a részben átöröklődő tulajdonságok következtében. Ebben az esetben a paleotalaj fejlődésének idején nem számolhatunk jelentős porhullással. Míg az akkréciós talajok esetében az intenzív talajosodási periódus idején is jelentékeny porhullással számolhatunk (Kovács et al. 2011; Varga 2011; Varga 2016; Constantin et al. 2021).

### **Fitolit kutatás relevanciája lösz-paleotalaj sorozatok esetében**

Lösz-paleotalaj sorozatok jelentős kiterjedésben és vastagságban borítják a szárazföldek felszínét (Pécsi 1990; Pécsi 1993; Fitzsimmons et al. 2012; Muhs 2013; Sümegi et al. 2018), ennél fogva a lösz-paleotalaj sorozatokból kinyert proxy adatokat nagy kiterjedésű területen, jelentős időtávot (elsősorban a negyedidőszakot) átfogva lehet felhasználni a környezetrekonstrukciós vizsgálatok során. Környezetrekonstrukció során felhasznált számos proxy között biológiai eredetű proxy-kat is találunk. Lösz-paleotalaj sorozatok esetében nagyon elterjedtek a malakológiai vizsgálatok, melyek segítségével többek között paleoklimatológiai és az egykori lokális vegetáció jellegére vonatkozó információkhoz lehet jutni (Fitzsimmons et al. 2012; Markovic et al. 2018). Az n-alkánok vizsgálatával a lokális vegetáció típusáról (fás/bokros, vagy lágyszárúak dominálta növényzet) tudhatunk meg többet (Zech et al. 2009; Fitzsimmons et al. 2012; Markovic et al. 2018). Palinológiai vizsgálatok segítségével részletes (akár faj szintű meghatározás) adatokat nyerhetünk az egykori vegetációra vonatkozóan. A pollenek lösz-paleotalaj sorozatokban vegetációrekonstrukcióhoz történő felhasználásakor azonban több tényezőt is figyelembe kell venni:

1. A pollenek akár nagy távolságok megtételére is alkalmasak, ennél fogva elfedhetik a lokális különbségeket, mely jelenség különösen mozaikos környezet esetén jelent hátrányt a vegetációrekonstrukció során (Blinnikov et al. 2002; Magyarai et al. 2014a).

2. Bizonyos növénycsoportok pollenprodukcója alacsonyabb, pollenük ellenálló képessége gyengébb, valamint azonosításuk is csak magasabb taxonómiai szinten lehetséges (pl. pászitfüvek), míg bizonyos növénycsoportokra (pl. *Pinus* nemzetség) ennek az ellenkezője jellemző, így az egyes

csoportok az egykori vegetáción belüli arányuktól eltérő mértékben képviselhetik magukat a kinyert pollenkészletben (Blinnikov et al. 2002; Magyarai et al. 2014a; Magyarai et al. 2014b).

3. A lösz-paleotalaj sorozatok nem nyújtanak kedvező feltételeket a pollenek megőrzéséhez (Blinnikov et al. 2002; Fitzsimmons et al. 2012; Zhang et al. 2017; Hui et al. 2021). Lösz-paleotalaj sorozatok esetében a pollenek megőrzését elsősorban a környezet pH értéke, a redox viszonyok, valamint a mikrobiális aktivitás befolyásolja (Zhang et al. 2017). Felszín közelében mindhárom tényező kifejti hatását, míg felszíntől távolabb elsősorban a pH értékek alakulása a döntő (Zhang et al. 2017), így a porhullás intenzitása, a betemetődés sebessége is lényeges tényező. Lösz-paleotalaj sorozatokból is lehetséges az elemzésekhez elegendő számú pollen kinyerése (Zhang et al. 2017; Hui et al. 2021), azonban a felsorolt három tényezőt mindenképp érdemes figyelembe venni a környezet-rekonstrukciós vizsgálatok elvégzése során. A felsorolt tényezők közül az első kettő általános érvényű, míg az utolsó lösz-specifikus.

A palinológiai vizsgálatok különösen pázsitfűvek dominálta növénytársulások esetén (Blinnikov et al. 2002), valamint mozaikos környezetben nem nyújtanak kellő részletességű információt (Magyarai et al. 2014a), míg a pázsitfűvek által nagy mennyiségben termelt növényi opálszemcsék lehetővé teszik a részletesebb környezeti rekonstrukciót is, valamint a fitolitok a pollenekkel összehasonlítva jellemzően korlátozottabban vesznek részt a laterális transzportfolyamatokban így mozaikos környezetben kellően sűrűn létesített szelvények segítségével sokkal jobb térbeli felbontású vegetációrekonstrukció elvégzésére nyílik mód. A lösz-paleotalaj sorozatok nagy területeket köpenyként és jelentős vastagságban beburkolva kellő részletességű mintavételezéssel elméletben lehetővé teszik nagy térbeli és időbeli felbontású környezet-rekonstrukciós vizsgálatok elvégzését. Tehát a lösz-paleotalaj sorozatok fitolitikészletének elemzésével a környezet-rekonstrukciót segítő, releváns információkhoz juthatunk hozzá. Mindennek az előfeltétele azonban a megfelelően nagy mennyiségű és kellően jó megőrződésű fitolitokat tartalmazó fitolit készlet feltárása. Az egykori vegetáció által termelt fitolit készletet érő tafonómiai folyamatok minél alaposabb ismerete sokat segíthet a lösz-paleotalaj sorozatokból kinyert fitolit készlet megfelelő interpretációjában a környezet-rekonstrukciós vizsgálatok során.

### **Fitolit produkció**

Bizonyos fejlettségű, összetételű vegetáció jelenlétével mind a löszkötegek, mind a paleotalajok képződésének idején számolhatunk

(Blinnikov et al. 2002; Fitzsimmons et al. 2012; Varga 2016). Tehát eltérő mennyiségű és összetételű lokális fitolit produkciót a lösz-paleotalaj komplexumok képződésének minden fázisában feltételezhetünk. Az interglaciálisok, interstadiálisok idején jellemző magasabb hőmérsékleti és csapadékviszonyok kedvezőbb feltételeket biztosíthatnak a növényzet számára, ennél fogva ezekben a periódusokban általánosságban magasabb primer produkciót feltételezhetünk (He et al. 2005; Fitzsimmons et al. 2012; Magyarai et al. 2014a; Markovic et al. 2018). Egyéb proxy-adatok (pl. malakológiai vizsgálatok) alapján az interglaciálisokban és interstadiálisokban a fás szárú növényzet megjelenése, terjedése várható azokon a területeken, ahol a megváltozott klimatikus viszonyok (pl. megnövekedett csapadék, hőmérséklet) ezt lehetővé teszik (Fitzsimmons et al. 2012; Magyarai et al. 2014b). Refúgiumokban a glaciálisok, stadiálisok idején is lehetséges a fás szárú vegetáció fennmaradása (Magyarai et al. 2014a; Magyarai et al. 2014b), ahogy az interglaciálisok, interstadiálisok sem feltétlenül jelentenek váltást a lágyszárúak dominálta növénytársulások tekintetében, melyek továbbra is uralkodóak maradhatnak, esetleg megváltozott fajösszetétel mellett is (Zech et al. 2009; Fitzsimmons et al. 2012; Markovic et al. 2018). A vegetációban bekövetkező változások a megőrződött fitolit készletben is megjelenhetnek, azonban a pázsitfűfélékre és egyéb lágyszárúakra jellemző magasabb fitolit produkció miatt ekkor is az ezekre a csoportokra jellemző morfortípusok (pl. GSSCP-k) dominanciája várható (Engel-di Mauro 1995; McCune & Pellatt 2013).

Az interglaciálisokban, interstadiálisokban jellemző magasabb primerprodukció ellenére a növénytársulások fitolit produkciója nem feltétlenül mutat hasonló növekedést. Amennyiben egy uralkodóan pázsitfűvekből álló növénytársulást fás szárúak dominálta vegetáció váltja, a fitolit produkció akár csökkenhet is (Engel-di Mauro 1995), ha azonban a klímaváltozás hatása ellenére sem következik be ilyen jellegű változás, és mind a glaciálisok, stadiálisok, mind az interglaciálisok, interstadiálisok idején a pázsitfűvek dominálnak (Blinnikov et al. 2002; Zech et al. 2009; Markovic et al. 2018), az interglaciálisok, interstadiálisok idején a magasabb primerprodukció következtében az adott területen élő növénytársulás által termelt növényi opálszemcsék mennyiségének növekedése várható.

Egy adott növénytársulás fitolit produkcióját a vegetáció összetétele, a primerprodukcióban esetlegesen bekövetkező változások, valamint egyéb környezeti tényezők (pl. vízellátottság növekedése magasabb fitolit produkciót indukálhat változatlan növényzeti összetétel mellett is, lásd: Madella et al. 2009; Jenkins et al. 2016) határozzák meg.

A környezeti tényezők közül – bár az adott növénytárulás fitolit produkciójára nincs közvetlenül hatással, de a szubsztrátumban megőrződő fitolit készlet lokális vegetáció által termelt autochton növényi opálszemcséinek mennyiségére, fitolit készleten belüli arányára igen – a lösz-paleotalaj sorozatok esetében érdemes kiemelni a porhullás intenzitásának, ezzel összefüggésben a felszín stabilitásának jelentőségét. A poranyag gyors akkumulációjának idején egy adott réteg rövidebb ideig volt a felszínen, gyorsabban végbement a betemetődése (Novothny et al. 2011). A fitolit utánpótlás jellemzően a felszín irányából érkezik, így egy hosszabb ideig felszín közelében lévő rétegnek több ideje van „feltölteni” a fitolit készletét a lokális vegetáció által termelt fitolitokkal, mint egy gyorsabban betemetődő, ezáltal a felszíntől elzárt, korlátozott, vagy meggátolt fitolit utánpótlásban részesülő rétegnek (ezzel ellentétes hatásként a fitolit készleten belüli allochton fitolitik aránya a porhullás intenzitásának növekedésével, várhatóan emelkedik). Intenzív porhullással, ezáltal gyorsabb betemetődéssel jellemzően a löszkötegek esetében számolhatunk, míg a paleotalajok képződésének idején hosszabb ideig stabil felszín feltételezhetünk (Novothny et al. 2011; Sümegi et al. 2018), mely alól a jelentős eolikus úton szállított anyagutánpótlásban részesülő akkrációs talajok kivételt képezhetnek (Kovács et al. 2011; Varga 2011; Constantin et al. 2021).

A szubsztrátumban megőrződött fitolit készletet továbbá a tafonómiai folyamatok is jelentősen befolyásolhatják. Tehát egy lösz-paleotalaj sorozat esetében az egyes rétegekben megőrződött fitolit készletek fitolit mennyiségében bekövetkező változások önmagukban nem feltétlenül a vegetáció jelentős átalakulásának (pl. pázsitfűvek dominálta terület beerdősülése, vagy fordítva) indikátorai.

### **Lösz-paleotalaj sorozatok esetében fellépő főbb tafonómiai folyamatok**

A lösz-paleotalaj sorozatokból kinyert fitolit készlet megfelelő interpretációjához, környezetrekonstrukcióban való felhasználásához elengedhetetlen a fitolit készletet érintő tafonómiai folyamatok ismerete, hatásuk megbecslése. A tafonómiai folyamatok a lösz-paleotalaj sorozatok esetében is jelentősen módosíthatják a megőrződött fitolit készletet.

Lösz-paleotalaj sorozatok fitolit készletére a különböző transzportfolyamatok, valamint oldódási jelenségek gyakorolhatják a legnagyobb hatást (Osterrieth et al. 2009). A nekrolízis, valamint a biosztratinómia során laterális transzportfolyamatok jelentkeznek, melyek a fitolitik mechanikai sérüléseit okozhatják, valamint allochton fitolitikokkal bővíthetik a fitolit készletet. Osterrieth et al. (2009) eolikus szállítás során megsérült fitolitikokat mutatott ki lösz-paleotalaj sorozatokból.

Pedogenezis/diagenezis során vertikális transzportfolyamatok játszódhatnak le, melyek a fitolit készlet szelvényen belüli átrendeződését okozhatják. Oldódásos jelenségek a pedogenezis/diagenezis alkalmával játszódnak le, melyek kémiai sérüléseket, vagy akár a fitolitik megmentésüket eredményezhetik.

A lösz, mint eolikus eredetű üledékes kőzet esetében kitüntetett szerepe van a szél általi szállításnak, amely, amennyiben a lösz-paleotalaj sorozatok fitolit készletét érő tafonómiai folyamatokat vizsgáljuk, a biosztratinómia során fejti ki elsődlegesen a hatását. Az eolikus szállítás hatására kisebb-nagyobb távolságból érkezett allochton eredetű fitolitikok fitolit készleten belüli megjelenésével számolhatunk. Ez a hatás a lösz-paleotalaj sorozatok löszkötegeit érintheti jelentősebb mértékben, hiszen a glaciálisok, stadiálisok idején mind a közelebbi forrásokból származó por mennyisége, mind a nagyobb távolságból érkező háttérpor mennyisége a többszöröse volt az interglaciálisok idején tapasztalhatónak (Varga 2016). Valószínűleg a különböző távolságból eolikus úton szállított kisebb méretű fitolitikok mennyisége és fitolit készleten belüli aránya a glaciálisok és stadiálisok idején jelentősebb lehetett. A löszök esetében megfigyelhető finomszemcsés komponenssel nagyobb távolságból (akár több ezer kilométerről) érkező fitolitikokat mutattak ki pleisztocén korú lösz-paleotalaj sorozatokban (Osterrieth et al. 2009), azonban közeli forrásból származó, durvaszemcsés komponenssel érkező fitolitikok fitolit készleten belüli elkülönítésére egyelőre nem került sor. Bizonyos mennyiségű háttérpor akkumulációjával – a glaciálisokhoz, stadiálisokhoz képest jelentősen lecsökkent mennyiségben – a paleotalajok képződése idején is számolhatunk, mely során a paleotalajok esetében is mód nyílhat távoli forrásból származó kis méretű (<20 µm) fitolitikok akkumulációjára.

A löszkötegek anyagának jelentős részét alkotó durvaszemcsés komponens gyakran viszonylag kis távolságban lévő ártéri üledékek, hordalékkúpok anyagából került kifújásra (Buggle et al. 2008; Smalley et al. 2009; Muhs 2013; Profe et al. 2018; Lehmkuhl et al. 2021; Fenn et al. 2022), így várható, hogy a fitolit készletben a lokális vegetáció által termelt autochton fitolitikok mellett jelentősen eltérő környezetet jelző allochton fitolitikok is megjelenhetnek (pl. vízhatást jelző bulliform morfortípus, vagy szivacstüskék fragmentumai, lásd **2. ábra**).

Érdekes kérdés, hogy a porforrások területéről fosszilis fitolitikok transzportja, majd akkumulációja lehetséges-e, ha igen mekkora mennyiségben, hatásuk megjelenthet-e a fitolit készletben? Elméletileg mind a viszonylag közeli forrásból származó durvaszemcsés komponenssel (pl. eolikus

kannibalizmus során), mind a távoli forrásból származó finomszemcsés komponens kialakításában résztvevő háttérporral érkező fosszilis fitolitok is. Távoli porforrást jelenthetnek az olyan jelentős porkibocsátó üledékes rendszerek, mint például a Bodelé-depresszió Afrikában, melyben az egykori Mega-Csád-tó északi medencéjének tavi üledékei halmozódtak fel (Washington et al. 2006; Stuut et al. 2009). A Bodelé-depresszióból kifűjt poranyag eljuthat akár az amerikai kontinensre (Koren et al. 2006; Ben-Ami et al. 2010), vagy Európába (Stuut et al. 2009; Varga 2016) is. Azt a kérdést, hogy a kifűjt poranyaggal együtt fosszilis fitolitok, vagy egyéb kovás biomorf részecskék, vagy azok fragmentumai (pl. diatómák vázai, vagy szivacsüstiskék) is részt vesznek-e nagy távolságú transzportfolyamatokban, ha igen mekkora mennyiségben, akkumulációjukra mód nyílik-e, megjelenhetnek-e a felhalmozódási terület lösz-paleotalaj sorozatainak fitolit készletében, amennyiben igen, milyen mértékben módosíthatják azt, még nem vizsgálták.

Löszkötegeken belül égés nyomait viselő *in situ* famaradványok már azonosításra kerültek (Sümegei & Rudner 2001; Páll et al. 2012), azonban lösz-paleotalaj sorozatok esetében égett fitolitok elkülönítésére, és szisztematikus vizsgálatára még nem került sor.

A lösz-paleotalaj sorozatok képződése idején elterjedt pleisztocén megafauna nagy termetű, mobilis fajai képesek lehetek a növényi maradványok, köztük magvak, fitolitok nagy távolságú transzportjára is (Pires et al. 2014; Malhi et al. 2016). Lösz-paleotalaj sorozatokból mutattak ki gerinces ősmaradványokat (Pazonyi et al. 2014), így fogakhoz tapadt, vagy koprolitba zárt fitolitok vizsgálatának megvan az elméleti lehetősége.

Lösz-paleotalaj sorozatok paleotalajainak esetében jelentkező probléma, hogy a talajképző kőzetet korábban képződött löszkötegek, vagy paleotalajok alkotják, melyek bizonyos tulajdonságai átöröklődhetnek. Az átöröklődött tulajdonságok közt megjelenhet a talajképző kőzet korábbi periódusban akkumulálódott fosszilis fitolit készlete, mely módosíthatja a talajképző kőzeten fejlődő talaj fitolit készletét. Lu et al. (2007) a weinani löszfeltárás utolsó interglaciális kőzetű S1 paleotalaj alsó részének fitolit készlete és az alatta települt MIS 6 korú L2 löszköteg felső részének fitolit készlete között mutatott ki nagyfokú hasonlóságot, amitől az S1 paleotalaj felső részének fitolit készlete markánsan eltér. Egyéb proxy adatok (pl. szemcseméret elemzés, mágneses szuszceptibilitás mérések) hasonló mintázatot mutatnak ki az S1 paleotalajon belül (Feng et al. 2004).

A paleotalaj alapkőzetét jelentő löszköteg fitolitikészletének a paleotalaj fitolit készletében is kimutatható módon történő átöröklődése elméle-

tileg több módon is bekövetkezhet. Előfordulhat, hogy egy jól megőrződött, hosszabb ideig stabil felszínen, jelentős porhullás nélkül fejlődő talaj mélyebb szintjeiben (a jelenlegi paleotalaj alsó része) a talajosodás bizonyos jelei felfedezhetők, azonban a vertikális transzportfolyamatok ebbe a mélységbe az egykori felszín, az A-szint (a jelenlegi paleotalaj felső része) irányából nem juttattak le akkora mennyiségű növényi opálszemcsét, melyek az alapkőzet fitolit készletét jelentősen át tudták volna alakítani. Magyarazatot jelenthet továbbá, ha egy egykori akkréciós talajjal, vagy paleotalaj komplexummal van dolgunk, melynek fejlődése során a porhullás intenzitása változott. Intenzívebb porhullási periódusok, és stabilabb felszínnel jellemezhető időszakok váltakoztak. Például, ha egy intenzív porhullási periódust (mely alatt a löszkötegek anyaga halmozódott fel, benne a rá jellemző fitolit készlettel), a porhullás megszűnése, vagy jelentős csökkenése, és a klíma megváltozása (pl. hőmérséklet és csapadék növekedése) követte, mely erőteljesebb talajosodást indukált. Azonban ez a talajosodás szempontjából kedvező időszak nem tartott kellően hosszú ideig ahhoz, hogy a talajképző kőzetet jelentő löszköteg fitolit készlete jelentősen átalakuljon, mely készlet átöröklődött a képződő talajra is. Ha ezt követően a porhullás intenzitása újra nőtt, a korábbi felszín alkotó talaj egy akkréciós talaj alsóbb szintjét alkothatja, vagy – amennyiben jelentősebb klímaváltozás, erőteljes lehűléssel és csapadékcsökkenéssel, következett be – eltemetett talajjá válhatott, mely felett újabb löszkötegek kialakulására is mód nyílhatott. Ebben az esetben a kapcsolata a felszínnel korlátozottá válik, így a felszín irányából a vertikális transzportfolyamatok nem, vagy csak korlátozottan tudnak fitolitokat a felszín felől ebbe a mélységbe lejuttatni, így az egykori talajképző kőzetet jelentő löszköteg fitolitikészletének megőrződésére, átöröklődésére és a fitolit készleten belül dominánssá válására mód nyílhat a szelvény ezen talajosodás jeleit mutató szintjében. Annak az eldöntése, hogy egy löszköteg és a közvetlenül felette található talaj fitolitikészletének hasonlóságát mi okozza egyéb proxy adatok bevonását (Feng et al. 2004; Lu et al. 2007), valamint megbízható numerikus koradatokat (Constantin et al. 2021) igényel.

Az intenzív porhullási periódusok során jelentkező gyors betemetődés kedvezhet a fitolitok megőrződésének, viszonylag ép fitolitokból álló fitolit készletet eredményezve (Cabanes et al. 2011; Cabanes & Shahack-Gross 2015), azonban a diagenezis/pedogenezis során fellépő egyéb folyamatok jelentősen módosíthatják a fitolit készletet.

A lösz-paleotalaj sorozatokból (paleotalajokból és löszkötegekből egyaránt) származó fitolitok

felszínén gyakran lehet megfigyelni oldódásra utaló jeleket, sérüléseket, melyek megnehezíthetik a megfelelő morfológiába történő besorolást (Engel-di Mauro 1995; Osterrieth et al. 2009). Az oldódási folyamatoknak kedvez a magas karbonát tartalomnak köszönhető magas pH-jú környezet (Engel-di Mauro 1995; Osterrieth et al. 2009; Jin et al. 2022). A magas karbonát tartalmú löszkötegekre a 7-9 pH-értékek jellemzők (Zhang et al. 2017), míg paleotalajok és a recens talajok értékei a kilúgzás intenzitásától, a növényzeti borítottságtól függően 7 pH alatti értékektől a 9 pH feletti értékeket is elérhetik (Zhang et al. 2017; Jin et al. 2022).

A mechanikai és kémiai sérülések hatására megnőhet az azonosításra alkalmatlan fitolitok aránya, mely folyamatok az egyes morfológiákat nem egyformán érintik. Osterrieth et al. (2009) kutatásai alapján a mechanikai sérülések a nagyobb, hosszabb, több függelékkel tartalmazó fitolitokat érintik jobban (pl. *elongate*, *bilobate*, *polylobate* morfológiák, lásd **2. ábra**), míg az oldódási folyamatok a tisztább (magasabb SiO<sub>2</sub> tartalmú), kevesebb szennyező elemet tartalmazó fitolitokat érintették kevésbé. Osterrieth et al. (2009) argentin lösz-paleotalaj sorozatokon és recens talajokon végzett vizsgálatait során a löszkötegekből, paleotalajokból, valamint recens talajokból származó fitolit készletek megőrződése között nem talált szignifikáns eltéréseket. Lösz-paleotalaj sorozatokból származó fitolitokon egyértelműen azonosításra kerültek transzportfolyamatokhoz köthető mechanikai sérülések, távoli forrásterületekről származó allochton fitolitok (valószínűleg Brazília irányából érkezett pálmákhoz köthető *spheroid* morfológiába tartozó fitolitok), valamint a diagenézis/pedogenezis során lejátszódó oldódási folyamatok során keletkezett kémiai sérülések nyomai. Ennek ellenére a löszkötegekből és paleotalajokból származó fitolit készletek esetében nem nőtt meg szignifikánsan a rossz megtartású, azonosításra alkalmatlan fitolitok aránya. Kivételt a paleotalajok karbonát akkumulációs zónái jelentettek, melyekben a nagyon rossz megtartású, kémiai sérüléseket elszenvedett fitolitok aránya jelentősen megnőtt a fitolit készleten belül, ami valószínűleg a magas pH-jú környezettel hozható összefüggésbe (Osterrieth et al. 2009).

A lösz-paleotalaj sorozatokban a talajvíz, valamint a perkolációs vizek mozgásaihoz kapcsolódva különböző elváltozásokat lehet megfigyelni. A lösz-paleotalaj sorozatok elsődleges karbonát tartalmának átrendeződése (pl. paleotalajokat érintő egykori, a betemetődés előtti talajfejlődésük idején jelentkező kilúgzás hatása, mely az érintett paleotalajok karbonát tartalmának csökkenését vonhatja maga után, míg a paleotalajok alsó részében, vagy az alattuk levő löszben karbonát akkumulációs szint jelentkezhet), bizonyos

másodlagos karbonátok (pl. löszbabák, mészkőpadok) megjelenése (Pécsi 1993; Barta 2014), valamint a gyakran megfigyelhető Fe-Mn-konkréciók, rozsdás foltok (Pécsi 1993; Ghafarpour et al. 2016; Jiang et al. 2021) köthetők ezekhez a folyamatokhoz. A karbonát tartalom a fitolitok környezetének pH-értékét, ezáltal a fitolitokat érintő oldódási folyamatokat befolyásolja (Engel-di Mauro 1995; Osterrieth et al. 2009), míg a Fe-Mn-konkréciók a redox folyamatokról árulnak el információkat (Ghafarpour et al. 2016; Jiang et al. 2021), mely a növényi opálszemcsék oldódási folyamatokkal szembeni ellenállását befolyásolhatja (Koebernick et al. 2022).

A lösz-paleotalaj sorozatok esetében jelentkezhetnek vertikális transzportfolyamatok a diagenézis/pedogenezis során, melyek a fitolitok szelvényen belüli elmozdulását eredményezhetik. A löszökre jellemző nagy porozitás (Pécsi 1993) kedvez a fitolitok vertikális transzportjának, míg lösz-paleotalaj sorozatokban előforduló pórusokban kevésbé gazdag szintek (pl. paleotalaj rétegek) esetében korlátozottabban jelentkezhet ez a folyamat (Fishkis et al. 2010b). Érdekes kérdés, hogy megfigyelhető-e valamely, a vertikális transzportfolyamatokkal összefüggésbe hozható szabályszerűség a lösz-paleotalaj sorozatok fitolit készletében az eltérő porozitású rétegekben, azok határánál.

Lösz-paleotalaj sorozatok esetében is számolhatunk bioturbációval, vagyis az élőlények anyagátkeverő hatásával. Gyakran lehet megfigyelni a feltárásokban úgynevezett biogalériákat (növényi, vagy állati eredetű járatokat), vagy krotovinákat. Az állati eredetű járatok kitöltése, színe eltérő az adott réteg színétől, amelyben található (4. ábra). A kisebb-nagyobb méretű járatokban a szelvény egyéb részeiből származó anyagok halmozódhatnak fel. Ebben az anyagáthalmazásban természetesen az érintett rétegek fitolit készlete is részt vehet (Madella & Lancelotti 2012).

Lösz-paleotalaj sorozatok esetében érdemes a lejtős tömegmozgások lehetőségével is számolni. A lejtős tömegmozgások hatására képződött lejtőlöszök esetében nem csak a szelvényen belüli esetleges anyagátrendeződéssel számolhatunk, hanem nagyobb léptékű áttelepüléssel is, mely a lösz-paleotalaj sorozatok fitolit készletét is érinti.

Argentínában (Osterrieth et al. 2009), Észak-Amerikában, a Palouse löszből (Blinnikov et al. 2002), valamint Kínai-löszfennsík területéről (Lu et al. 2007) sikerült lösz-paleotalaj sorozatokból jó megtartású fitolit készletet kinyerni, mind a löszkötegek, mind a paleotalajok esetében. Carter (2000) Új-Zéland Déli-szigetén feltehetőleg MIS 2 és MIS 3 korú löszkötegekből, valamint recens talajokból nyert ki jó megőrződésű fitolitokat. Magyarországi lösz-paleotalaj sorozatokban

azonban az eddig kinyert fitolit készletek jellemzően kevés, és rossz megtartású fitolitot tartalmaztak, a kémiai és mechanikai sérüléseket mutató növényi opálszemcsék aránya magas volt a kinyert fitolit készleten belül (Engel-di Mauro 1995; Persaits 2010; Páll et al. 2012). Azzal kapcsolatban, hogy a magyarországi lösz-paleotalaj sorozatok rossz megtartású fitolit készleteinek, valamint ezzel ellentétes módon a dél-amerikai, észak-amerikai, kínai és új-zélandi lösz-paleotalaj sorozatok jó megőrződésű fitolit készleteinek mi lehet a magyarázata, milyen tafonómiai, vagy egyéb folyamatok állhatnak a háttérben, egyelőre nem képezte részletes vizsgálatok tárgyát.

### **Az eddigi kutatások áttekintése**

A negyedidőszaki lösz-paleotalaj sorozatok kutatására találni új-zélandi (Carter 2000), egyesült államokbeli (Blinnikov et al. 2002), kínai (Lu et al. 2007), argentin (Osterrieth et al. 2009), valamint magyarországi (Engel-di Mauro 1995; Persaits 2010; Páll et al. 2012) példákat is.

Osterrieth et al. (2009) kutatásának célja a lösz-paleotalaj sorozatok fitolit készletét érő tafonómiai folyamatok jobb megértése volt. Osterrieth et al. (2009) eredményei rávilágítottak a biosztratinómia során bekövetkező transzportfolyamatok (allochton fitolitok, mechanikai sérüléseket elszenvedő fitolitok), valamint diagenézis/pedogenezis során jelentkező oldódási folyamatok (kémiai sérülések) lösz-paleotalaj sorozatok fitolit készletére gyakorolt hatására.

Carter (2000) Új-Zéland Déli-szigetén löszkötegekből, valamint recens talajokból nyert ki jó megőrződésű fitolitokat. A kinyert fitolit készlet, valamint növényi referenciabázisok segítségével végzett vegetáció rekonstrukciót, melynek során a pázsitfűvekre (pl. GSSCP-k, vagy bulliform morfortípus), a fás szárúakra (pl. spheroid morfortípus), valamint a páfrányokra (*jigsaw anticlinal* morfortípus) jellemző morfortípusok fitolit készleten belüli arányának megállapítására törekedett. Sajnos a kutatásaihoz nem álltak rendelkezésére megbízható numerikus koradatok.

Blinnikov et al. (2002) lösz-paleotalaj sorozatokból, recens növény referenciabázisokat, valamint egyéb proxy adatokat (pl. tavi üledékekből származó pollenadatok) felhasználva végzett vegetáció-rekonstrukciót a Columbia-medencében, valamint vont le a vegetáció változása alapján a klímára vonatkozóan következtetéseket a késő pleisztocén, kora holocén idejére.

Lu et al. (2007) a Kínai-löszfennsík lösz-paleotalaj sorozatainak fitolit készletét elemezte. Kutatásának célja klímarekonstrukció végzése volt recens talajokon elvégzett vizsgálatok (Lu et al. 2006) során feltárt összefüggések felhasználásával. A recens talajokra vonatkozó összefüggéseket Lu et

al. (2006) Kína területére vonatkozó átfogó elemzése szolgáltatta, melynek során a talajokból származó fitolit készlet és a klíma (elsősorban az éves csapadékmennyiség és az évi középhőmérséklet hatása volt kimutatható a fitolit készletek összetételére) között tárt fel kapcsolatot. Tehát Lu et al. (2006) a jelenlegi klíma és a recens talajok A-szintjéből származó fitolit készletei alapján jutott a következtetéseire. Recens talajok felső szintje folyamatos kapcsolatban van a recens vegetációval, így az innen származó fitolit készlet alapján feltárt összefüggések relevánsak lehetnek. A recens talajok mélyebb szintjeinek kutatásba történő bevonása nem történt meg, ami azért jelenthet problémát mivel a lösz-paleotalaj sorozatok, mint szárazföldi üledékes kőzet esetében előfordulhatnak eróziós események, melyek hiatusokat eredményezhetnek, így elképzelhető, hogy egy adott paleotalajnak csak a felszíntől távolabbi, mélyebb szintjei őrződtek meg. További problémát jelenthet, hogy a lösz-paleotalaj sorozatokból kinyert fitolit készlet elemzése során az esetleges tafonómiai folyamatokat nem vették figyelembe, úgy kezelték őket, mintha recens talajok A-szintjéből származnának, ebből következően a rekonstruált éves csapadékmennyiségek és középhőmérséklet értékek bizonytalansága nagy.

Az eddigi magyarországi kutatások (Engel-di Mauro 1995; Persaits 2010; Páll et al. 2012) eredményei alapján a magyarországi löszök fitolitokban viszonylag szegénynek bizonyultak összehasonlítva az ázsiai (Lu et al. 2007), észak-amerikai (Blinnikov et al. 2002), dél-amerikai (Osterrieth et al. 2009) és új-zélandi (Carter 2000) kutatások eredményeivel. A sérült fitolitok magas aránya, és a jellemzően kis számú diagnosztikus fitolit (pl. Páll et al. (2012) maximum 78 darab fitolitot tudott azonosítani egy mintában) ellenére a fitolitokat sikerült felhasználni a környezet-rekonstrukció során. Azonban a fitolit készlet állapota miatt nagyfokú bizonytalansággal érdemes számolni.

Az eddigi kutatások eredményei alapján megállapítható, hogy a lösz-paleotalaj sorozatok fitolit készletét érintő tafonómiai folyamatok jobb megismerése, hatásuk figyelembevétele szükséges a fitolitok környezet-rekonstrukciós kutatásokban proxy-ként történő megbízható felhasználása érdekében.

### **További kutatási irányok**

A lösz-paleotalaj sorozatok vizsgálata során a fő cél a minél pontosabb környezeti rekonstrukció elvégzése. A fitolit készlet kinyerése, elemzése, mint újabb proxy-adat ehhez a folyamathoz nyújthat segítséget. Az eredmények megfelelő interpretálásához nagyon fontos tisztázni, hogy a lösz-paleotalaj sorozatokból kinyert fitolit készlet mennyiben reprezentálja a lokális vegetációt, és

mekkora mértékben tartalmaz allochton fitolitokat, megfigyelhető-e az autochton és allochton fitolitok fitolit készleten belüli arányának változása a szelvényben. Ehhez érdemes lehet egyéb proxy-adatokat, pl. szemcseeloszlási-görbéket segítségül hívni, amelyek segítségével az egykori szél-erősségben, szélirányban, a talajosodási folyamatok erősségében bekövetkező változásokról vonhatunk le következtetéseket. Így hasznos lehet kombinálni a szemcseeloszlási adatokat a fitolit készletben megfigyelhető változásokkal (pl. sérült fitolitok aránya, sérülések típusai, mely morfortípusokat érinti, a 20 µm alatti fitolitok aránya stb.). Allochton fitolitok fitolit készletre gyakorolt hatásának becsléséhez érdemes lehet akár kisebb távolságon belül is szelvényeket létesíteni, majd azok fitolit készletét megvizsgálni. Amennyiben nagyon hasonló összetételű fitolitikészleteket találunk az azonos korú mintákban az elvileg magyarázható lehet hasonló összetételű vegetációval, laterális transzportfolyamatok hatásával, mely elfedheti a kisebb lokális különbségeket, valamint tafonómiai folyamatokkal is. A kérdés eldöntéséhez mindenképp érdemes további proxy adatokat bevonni, melyek segítségével többek között az egykori vegetáció szempontjából lényeges tényezők, például a paleo-geomorfológiai viszonyok tisztázhatóak.

### **Szerzők tudományos közreműködése**

**Milinkó István** Kutatásvezetés, módszertan, adatkezelés, eredeti kézirat, javított kézirat, ellenőrzés, vizualizáció. **Novothny Ágnes** Kutatásvezetés, javított kézirat, ellenőrzés. **Pető Ákos** Kutatásvezetés, módszertan, javított kézirat, ellenőrzés, vizualizáció.

### **Irodalomjegyzék**

ALEMAN, J.C., CANAL-SUBITINI, S., FAVIER, C., BREMOND, L. (2014): Influence of the local environment on lacustrine sedimentary phytolith record. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **414** 273–283.

BARTA, G. (2014): Paleoenvironmental reconstruction based on the morphology and distribution of secondary carbonates of the loess-paleosol sequence at Süttő, Hungary. *Quaternary International* **319** 64–75.

BEN-AMI, Y., KOREN, I., RUDICH, Y., ARTAXO, P., MARTIN, S.T., ANDREAE, M.O. (2010): Transport of North African dust from the Bodélé depression to the Amazon Basin: a case study. *Atmospheric Chemistry and Physics* **10** 7533–7544.

BLINNIKOV M., BUSACCA A., WHITLOCK C. (2002): Reconstruction of the late Pleistocene grassland of the Columbia basin, Washington, USA, based on phytolith records in loess.

*Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **177** 77–101.

BLONG, J.C. & SHILITO, L.M. (2021): Coprolite research: archaeological and paleoenvironmental potentials. *Archaeological and Anthropological Sciences* **13** 15.

<https://doi.org/10.1007/s12520-020-01242-8>

BORRELLI, N., ALVAREZ, M.F., OSTERRIETH, M.L. & MARCOVECCHIO, J.E. (2010): Silica content in soil solution and its relation with phytolith weathering and silica biogeochemical cycle in Typical Argiudolls of the Pampean Plain, Argentina—a preliminary study. *Journal of Soils and Sediments* **10** 983–994.

BREMOND, L., ALEXANDRE, A., PEYRON, O. & GUIOT, J. (2005a): Grass water stress estimated from phytoliths in West Africa. *Journal of Biogeography* **32** 311–327.

BREMOND, L., ALEXANDRE, A., HÉLY, C. & GUIOT, J. (2005b): A phytolith index as a proxy of tree cover density in tropical areas: Calibration with Leaf Area Index along a forest – savanna transect in southeastern Cameroon. *Global and Planetary Change* **45** 277–293.

BREMOND, L., ALEXANDRE, A., PEYRON, O. & GUIOT, J. (2008a): Definition of grassland biomes from phytoliths in West Africa. *Journal of Biogeography* **35** 2039–2048.

BREMOND, L., ALEXANDRE, A., WOOLLER, M.J., HÉLY, C., WILLIAMSON, D., SCHAFER, P.A., MAJULE, A. & GUIOT, J. (2008b): Phytolith indices as proxies of grass subfamilies on East African tropical mountains. *Global and Planetary Change* **61** 209–224.

BUGGLE, B., GLASER, B., ZÖLLER, L., HAMBACH, U., MARKOVIC, S., GLASER, I. & GERASIMENKO, N. (2008): Geochemical characterization and origin of Southeastern and Eastern European loesses (Serbia, Romania, Ukraine). *Quaternary Science Reviews* **27** 1058–1075.

CABANES, D., WEINER, S. & SHAHACK-GROSS, R. (2011): Stability of phytoliths in the archaeological record: a dissolution study of modern and fossil phytoliths. *Journal of Archaeological Science* **38** 2480–2490.

CABANES, D. & SHAHACK-GROSS, R. (2015): Understanding fossil phytolith preservation: the role of partial dissolution in paleoecology and archaeology. *PLoS ONE* **10/5**, e0125532.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0125532>

CALEGARI, M.R., MADELLA, M., VIDAL-TORRADO, P., PESSENDA, L.C.R. & MARQUES F. A. (2013): Combining phytoliths and  $\delta^{13}\text{C}$  matter in Holocene palaeo-environmental



studies of tropical soils: An example of an Oxisol in Brazil. *Quaternary International* **287** 47–55.

CARTER, J.A. (2000): Phytoliths from loess in Southland, New Zealand. *New Zealand Journal of Botany* **38/2** 325–332.

CONSTANTIN, D., MASON, J.A., VERES, D., HAMBACH, U., PANAIOTU, C., ZEEDEN, C., ZHOU, L., MARKOVIC, S.B., GERASIMENKO, N., AVRAM, A., TECSA, V., GROZA-SACACIU, S.M., VALLE VILLALONGA del, L., BEGY, R. & TIMAR-GABOR, R. (2021): OSL-dating of the Pleistocene-Holocene climatic transition in loess from China, Europe and North America, and evidence for accretionary pedogenesis. *Earth-Science Reviews* **221** 103769.

<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103769>

DELHON, C., ALEXANDRE, A., BERGER, J.F., THIÉBAULT, S., BROCHIER, J.L. & MEUNIER, J.D. (2003): Phytolith assemblages as a promising tool for reconstructing Mediterranean Holocene vegetation. *Quaternary Research* **59** 48–60.

DELPLACE, G., SCHRECK, E., POKROVSKY, O.S., ZOUTEN, C., BLONDET, I., DARROZES, J. & VIERS, J. (2020): Accumulation of heavy metals in phytoliths from reeds growing on mining environments in Southern Europe. *Science of the Total Environment* **712** 135595.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135595>

DONG, H., WEI, X., LI, R., VACHULA, R.S., TAN, S., ZHOU, L. & GAN, T. (2022): Burned phytoliths absorbing black carbon as a potential proxy for paleofire. *The Holocene* **32/5** 442–450.

ENGEL-DI MAURO, S. (1995): Constructing the palaeovegetational record for the buried soils in the Hungarian young loess sequence: a view from phytolith analysis. In: PÉCSI, M. & SCHWEITZER, F. (eds.): *Loess in Form 3*, Budapest, Geographical Research Institute, Hungarian Academy of Science: 79–94.

EVETT, R.R. & CUTHRELL, R.Q. (2017): Testing phytolith analysis approaches to estimate the prehistoric anthropogenic burning regime on the Central California Coast. *Quaternary International* **434** 78–90.

FENG, Z.-D., WANG, H.B., OLSON, C., POPE, G.A., CHEN, F.H., ZHANG, J.W. & AN, C.B. (2004): Chronological discord between the last interglacial paleosol (S1) and its parent material in the Chinese Loess Plateau. *Quaternary International* **117** 17–26.

FENN, K., MILLAR, I.L., DURCAN, J.A., THOMAS, D.S.G., BANAK, A., MARKOVIC, S.B., VERES, D. & STEVENS T. (2022): The provenance of Danubian loess. *Earth-Science Reviews* **226** 103920.

<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.103920>

FISHKIS, O., INGWERSEN, J., LAMERS, M., DENYSENKO, D. & STRECK, T. (2010a): Phytolith transport in soil: a laboratory study on intact soil cores. *European Journal of Soil Science* **61** 445–455.

FISHKIS, O., INGWERSEN, J., LAMERS, M., DENYSENKO, D. & STRECK, T. (2010b): Phytolith transport in soil: A field study using fluorescent labelling. *Geoderma* **157** 27–36.

FITZSIMMONS, K.E., MARKOVIC, S.B. & HAMBACH, U. (2012): Pleistocene environmental dynamics recorded in the loess of the middle and lower Danube basin. *Quaternary Science Reviews* **41** 104–118.

FRAYSSE, F., POKROVSKY, O.S., SCHOTT, J. & MEUNIER, J.D. (2006): Surface properties, solubility and dissolution kinetics of bamboo phytoliths. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **70** 1939–1951.

FRAYSSE, F., POKROVSKY, O.S., SCHOTT, J. & MEUNIER, J.D. (2009): Surface chemistry and reactivity of plant phytoliths in aqueous solutions. *Chemical Geology* **258** 197–206.

GAITA, H. (2020): *Central-Eastern European loess sources. Independent project at the Department of Earth Science*. 2020:8. Uppsala University. 35 pp.

GHAFFARPOUR, A., KHORMALI, F., BALSAM, W., KARIMI, A. & AYOUBI, S. (2016): Climatic interpretation of loess-paleosol sequences at Mobarakabad and Aghband, Northern Iran. *Quaternary Research* **86** 95–109.

GOLYEVA, A.A. (2001): A biomorphic analysis as a part of soil morphological investigations. *Catena* **43** 217–230.

GU, Y., PEARSALL, D.M., XIE, S. & YU, J. (2008): Vegetation and fire history of a Chinese site in southern tropical Xishuangbanna derived from phytolith and charcoal records from Holocene sediments. *Journal of Biogeography* **35** 325–341.

HART, T.C. (2016): Issues and directions in phytolith analysis. *Journal of Archaeological Science* **68** 24–31.

HE, Y., DAN, L., DONG, W., JI, J. & QIN, D. (2005): The terrestrial NPP simulations in China since Last Global Maximum. *Chinese Science Bulletin* **50/18** 2074–2079.

HORROCKS, M., IRWIN, G.J., MCGLONE, M.S., NICHOL, S.L. & WILLIAMS, L.J. (2003): Pollen, phytoliths and diatoms in Prehistoric coprolites from Kohika, Bay of Plenty, New Zealand. *Journal of Archaeological Science* **30/1** 13–20.

HUI, Z., RAN, M., LI, H., LIU, C., GUO, B., ZHANG, J., PENG, T., LIU, D. & PAN, Y. (2021):

Early Pleistocene pollen record from the western Chinese Loess Plateau and its implication for the evolution of the East Asian Monsoon. *Science of the Total Environment* **761** 143304.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143304>

HUNT, J.W., DEAN, A.P., WEBSTER, R.E., JOHNSON, G.N. & ENNOS, A.R. (2008): A novel mechanism by which silica defends grasses against herbivory. *Annals of Botany* **102** 653–656.

JANZEN, D.H. (1984): Dispersal of small seeds by big herbivores: foliage is the fruit. *The American Naturalist* **123/3** 338–353.

JENKINS, E., JAMJOUR, K., NUIMAT, S., STAFFORD, R., NORTFCLIFF, S. & MITHEN, S. (2016): Identifying ancient water availability through phytolith analysis: An experimental approach. *Journal of Archaeological Science* **73** 82–93.

JIANG, Z.D., WANG, Q.B., LIBOHOVA, Z., ADHIKARI, K., BRYE, K.R., SUN, Z.X., SUN, F.J., JIANG, Y.Y. & OWENS, P.R. (2021): Fe-Mn concentrations in upland loess soils in mid-continental North America: A step towards dynamic soil survey. *Catena* **202** 105273.

<https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105273>

JIN, Z., LUO, D., YU, Y., YANG, S., ZHANG, J. & CAO, G. (2022): Soil pH changes in a small catchment on the Chinese Loess Plateau after long-term vegetation rehabilitation. *Ecological Engineering* **175** 106503.

<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106503>

KELENTEY, B., DANI, J., HÁGA, T., MAJOR, I., LISZTES-SZABÓ, ZS., MARCSIK, A. & ANYAGL, J. (2021): Avar kori harcos koponyájának vizsgálata, különös tekintettel a fogazatra. In: ANON, A. (szerk.) *XXI. Debreceni Fogászati Napok*, Debrecen, Magyarország: Debreceni Egyetem Fogorvostudományi Kar, p. 24.

KOEBERNICK, N., MIKUTTA, R., KAISER, K., KLOTZBÜCHER, A. & KLOTZBÜCHER, T. (2022): Redox-dependent surface passivation reduces phytolith solubility. *Geoderma* **428** 116158.

<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116158>

KOREN, I., KAUFMAN, Y.J., WASHINGTON, R., TODD, M.C., RUDICH, Y., MARTINS, V.J. & ROSENFELD, D. (2006): The Bodélé depression: a single spot in the Sahara that provides most of the mineral dust to the Amazon forest. *Environmental Research Letters* **1** 014005.

<https://doi.org/10.1088/1748-9326/1/1/014005>

KOVÁCS, J., FÁBIÁN, SZ.Á., VARGA, G., ÚJVÁRI, G., VARGA, GY. & DEZSŐ, J. (2011): Plio-Pleistocene red clay deposits in the Pannonian basin: A review. *Quaternary International* **240** 35–43.

LEHMKUHL, F., NETT, J.J., PÖTTER, S., SCHULTE, P., SPRAFKE, T., JARY, Z., ANTOINE, P., WACHA, L., WOLF, D., ZERBONI, A., HOSEK, J., MARKOVIC, S.B., OBRECHT, 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>

LICHT, A., PULLEN, A., KAPP, P., ABELL, J. & GIESLER, N. (2016): Eolian cannibalism: reworked loess and fluvial sediment as the main sources of the Chinese Loess Plateau. *The Geological Society of America Bulletin* **128:5/6** 944–956.

LISZTES-SZABÓ, Zs. (2019): Complex environmental research: Do we need exact knowledge of plant anatomy? A critical discussion of Rashid et al. (2019). *Earth-Science Reviews* **198** 102920.

<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102920>

LISZTES-SZABÓ, Zs., KOVÁCS, Sz., BARNA, Cs. & PETŐ, Á. (2013): Pázsitfű mellékhatások fitolitikészletének egyedi varianciája a Poapratensis L. (Poaceae) példáján. *Botanikai Közlemények* **100/1-2** 155–175.

LISZTES-SZABÓ, Zs., BRAUN, M., CSÍK, A. & PETŐ, Á. (2019): Phytoliths of six woody species important in the Carpathians: characteristic phytoliths in Norway spruce needles. *Vegetation History and Archaeobotany* **28** 649–662.

LISZTES-SZABÓ, Zs., FILEP, A.F., CSÍK, A., PETŐ, Á., KERTÉSZ, T.G. & BRAUN, M. (2020): pH-dependent silicon release from phytoliths of Norway spruce (*Picea abies*). *Journal of Paleolimnology* **63** 65–81.

LISZTES-SZABÓ, Zs., FILEP, A.F., HEYD, V., KULCSÁR, G., WŁODARCZAK, P. & DANI J. (2021): Further evidence for seasonal transhumance of Yamnaya communities during the Late Copper – Early Bronze age of the Carpathian Basin. In: KLEINOVÁ, K. (ed.): *27<sup>th</sup> EAA Annual Meeting* (Kiel Virtual, 2021). Abstract Book. Prága, European Association of Archaeologists, Paper 19A.

LU, H.Y., WU, N.Q., YANG, X.D., JIANG, H., LIU, K.B. & LIU, T.S. (2006): Phytoliths as quantitative indicators for the reconstruction of past environmental conditions in China I: phytolith-based transfer functions. *Quaternary Science Reviews* **25** 945–959.

LU, H.Y., WU, N.Q., LIU, K.B., JIANG, H. & LIU, T.S. (2007): Phytoliths as quantitative indicators for the reconstruction of past

environmental conditions in China II: palaeoenvironmental reconstruction in the Loess Plateau. *Quaternary Science Reviews* **26** 759–772.

LYMAN, R.L. (2010): What taphonomy is, what isn't, and why taphonomists should care about the difference. *Journal of Taphonomy* **8/1** 1–16.

MADELLA, M., JONES, M.K., ECHLIN, P., POWERS-JONES, A. & MOORE, M. (2009): Plant water availability and analytical microscopy of phytoliths: Implications for ancient irrigation in arid zones. *Quaternary International* **193** 32–40.

MADELLA, M. & LANCELOTTI, C. (2012): Taphonomy and phytoliths: A user manual. *Quaternary International* **275** 76–83.

MAGYARI, E.K., KUNES, P., JAKAB, G., SÜMEGI, P., PELÁNKOVÁ, B., SCHABITZ, F., BRAUN, M. & CHYTRY, M. (2014a): Late Pleniglacial vegetation in eastern-central Europe: are there modern analogues in Siberia? *Quaternary Science Reviews* **95** 60–79.

MAGYARI, E.K., VERES, D., WENNRICH, V., WAGNER, B., BRAUN, M., JAKAB, G., KARÁTSÓN, D., PÁL, Z., FERENCZY, Gy., ST-ONGE, G., RETHEMEYE, J., FRANCOIS, J.-P., REUMONTVON, F. & SCHABITZ, F. (2014b): Vegetation and environmental response to climate forcing during the Last Glacial Maximum and deglaciation in the East Carpathians: attenuated response to maximum cooling and increased biomass burning. *Quaternary Science Reviews* **106** 278–298.

MALHI, Y., DOUGHTY, C.E., GALETTI, M., SMITH, F.A., SVENNING, J.-C. & TERBORGH J.W. (2016): Megafauna and ecosystem function from the Pleistocene to the Anthropocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA* **113/4** 838–846.

MARKOVIC, S.B., SÜMEGI, P., STEVENS, T., SCHAEZTL, R.J., OBREHT, I., CHU, W., BUGGLE, B., ZECH, M., ZECH, R., ZEEDEN, C., GAVRILOV, M.B., PERIC, Z., SVIRCEV, Z. & LEHMKUHL, F. (2018): The Crvenka loess-paleosol sequence: A record of continuous grassland domination in the southern Carpathian Basin during Late Pleistocene. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **509** 33–46.

MCCUNE, J.L. & PELLATT, M.G. (2013): Phytoliths of Southeastern Vancouver Island, Canada, and their potential use to reconstruct shifting boundaries between Douglas-fir forest and oak savanna. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **414** 273–283.

MENG, M., JIE, D., GAO, G., GAO, T., XU, S., LIA, Y., XU, H., LI, T., WANG, J., NIU, H., SONG, L. & LIU, L. (2022): Characteristics of burned phytolith from representative plants in

Northeast China and implications for paleo-fire reconstruction. *Review of Palaeobotany and Palynology* **300** 104628.

<https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2022.104628>

MUHS, D.R. (2013): The geological records of dust in the Quaternary. *Aeolian Research* **9** 3–48.

NEUMANN, K., STRÖMBERG, C.A.E., BALL, T., ALBERT, R.M., VYRDAGHS, L., SCOTT, CUMMINGS, L. (2019): International Code for Phytolith Nomenclature (ICPN) 2.0. *Annals of Botany* **124** 189–199.

NOVOTHNY, Á., FRECHEN, M., HORVÁTH, E., WACHA, L., ROLF, C. (2011): Investigating the penultimate and last glacial cycles of the Süttő loess section (Hungary) using luminescence dating, high resolution grain size, and magnetic susceptibility data. *Quaternary International* **234** 75–85.

OSTERRIETH, M., MADELLA, M., ZURRO, D. & ALVAREZ, M.F. (2009): Taphonomical aspects of silica phytoliths in the loess sediments of the Argentinean Pampas. *Quaternary International* **193** 70–79.

PANTER, C.J. & DOLMAN, P.M. (2012): Mammalian herbivores as potential seed dispersal vectors in ancient woodland fragments. *Wildlife Biology* **18** 292–303.

PAZONYI, P., KORDOS, L., MAGYARI, E., MARINOVA, E., FÜKŐH, L. & VENCZEL, M. (2014): Pleistocene vertebrate faunas of the Süttő Travertine Complex (Hungary). *Quaternary International* **319** 50–63.

PÁLL, D.G., PERSAITS, G., NÁFRÁDI K. & SÜMEGI, P. (2012): Középső-würm végi fosszilis talaj- és löszréteg átmeneti szintjének komplex paleoökológiai vizsgálata a tokaji Kopasz-hegyen. *Földtani Közlemények* **142/3** 251–268.

PEARSALL, D.M. (2016): The Phytoliths in the Flora of Ecuador project: perspectives on phytolith classification, identification, and establishing regional phytolith databases. *Journal of Archaeological Science* **68** 89–97.

PERSAITS, G. (2010): A fitolitok szerepe a geoarchaeológiai minták értékelésében. *Doktori (PhD) Értekezés*. Szegedi Tudományegyetem Földtudományok Doktori Iskola. 147 p.

PETŐ, Á. (2009a): A fitolitkutató szerepe az őskörnyezetben és a környezet régészeti, valamint hazai alkalmazásának lehetőségei. *Archeometriai Műhely* **2009/VI/2** 15–30.

PETŐ, Á. (2009b): A növényi opálszemcsék kutatásának rövid tudománytörténeti áttekintése a felfedezéstől napjainkig. *Tájékológiai Lapok* **7/1** 39–63.

- PETŐ, Á. (2011): Hazai talajszelvények fitolit morfortípus-diverzitása. *Agrokémia és Talajtan* **60/1** 45–64.
- PETŐ, Á. (2013): Studying modern soil profiles of different landscape zones in Hungary: An attempt to establish a soil-phytolith identification key. *Quaternary International* **287** 149–161.
- PÉCSI, M. (1990): Loess is not just the accumulation of dust. *Quaternary International* **7-8** 1–21.
- PÉCSI, M. (1993): *Negyedkor és löszkutatók*. Akadémiai Kiadó. Budapest. 375 pp.
- PIPERNO, D.R. (2006): *Phytoliths: A comprehensive guide for archaeologists and paleoecologists*. 1st Edition. AltaMira Press. New York. 238 pp.
- PIRES, M.M., GALETTI, M., DONATTI, C.I., PIZO, M.A., DIRZO, R., GUIMARAES, P.R. (2014): Reconstructing past ecological networks: the reconfiguration of seed-dispersal interactions after megafaunal extinction. *Oecologia* **175** 1247–1256.
- PRASAD, V., STRÖMBERG, C.A.E., ALIMOHAMMADIAN, H. & SAHNI, A. (2005): Dinosaur coprolites and the early evolution of grasses and grazers. *Science* **310** 1177–1180.
- PROFE, J., NEUMANN, L., NOVOTHNY, Á., BARTA, G., ROLF, C., FRECHEN, M., OHLENDORF, C. & ZOLITSCHKA, B. (2018): Paleoenvironmental conditions and sedimentation dynamics in Central Europe inferred from geochemical data of the loess-paleosol sequence at Süttő (Hungary). *Quaternary Science Reviews* **196** 1–17.
- PYE, K. (1995): The nature, origin and accumulation of loess. *Quaternary Science Reviews* **14/7-8** 653–667.
- SELKIN, P.A., STRÖMBERG, C.A.E., DUNN, R., KOHN, M.J., CARLINI, A.A., DAVIES-VOLLUM, K.S. & MADDEN, R.H. (2015): Climate, dust, and fire across the Eocene-Oligocene transition, Patagonia. *Geology* **43** 567–570.
- SMALLEY, I.J., O'HARA-DHAND, K., WINT, J., MACHALETT, B., JARY, Z. & JEFFERSON, I. (2009): Rivers and loess: The significance of long river transportation in the complex event-sequence approach to loess deposit formation. *Quaternary International* **198** 7–18.
- SMALLEY, I.J., MARKOVIC, S.B. & SVIRCEV, Z. (2011): Loess is [almost totally formed by] the accumulation of dust. *Quaternary International* **240** 4–11.
- SONG, Z., MCGROUTHER, K. & WANG, H. (2016): Occurrence, turnover and carbon sequestration potential of phytoliths in terrestrial ecosystems. *Earth-Science Reviews* **158** 19–30.
- STRÖMBERG, C.A.E., DI STILIO, V.S. & SONG, Z. (2016): Functions of phytoliths in vascular plants: an evolutionary perspective. *Functional Ecology* **30** 1286–1297.
- STRÖMBERG, C.A.E., DUNN, R.E., CRIFÓ, C. & HARRIS, E.B. (2018): Phytoliths in paleoecology: analytical considerations, current use, and future directions. In: CROFT, D.A., SIMPSON, S.W. & SU, D.F. (eds.): *Methods in Paleocology: Reconstructing Cenozoic Terrestrial Environments and Ecological Communities, Vertebrate Paleobiology and Paleoanthropology*. Springer, Cham, Switzerland, 235–287.
- STUUT, J.B., SMALLEY, I. & O'HARA-DHAND, K. (2009): Aeolian dust in Europe: African sources and European deposits. *Quaternary International* **198** 234–245.
- SÜMEGI, P. & RUDNER, Z.E. (2001): In situ charcoal fragments as remains of natural wildfires in the upper Würm of the Carpathian Basin. *Quaternary International* **76/77** 165–176.
- SÜMEGI, P., GULYÁS, S., MOLNÁR, D., SÜMEGI, B.P., ALMOND, P.C., VANDENBERGHE, J., ZHOU, L., PÁL-MOLNÁR, E., TÖRÖCSIK, T., HAO, Q., SMALLEY, I., MOLNÁR, M. & MARSII, I. (2018): New chronology of the best developed loess/paleosol sequence of Hungary capturing the past 1.1 ma: Implications for correlation and proposed pan-Eurasian stratigraphic schemes. *Quaternary Science Reviews* **191** 144–166.
- THAMÓ-BAZSÓ, E., KOVÁCS, L.Ó., MAGYARI, Á. & MARSII, I. (2014): Tracing the origin of loess in Hungary with the help of heavy mineral composition data. *Quaternary International* **279/280** 11–21.
- ÚJVÁRI, G., VARGA, A., RAMOS, F.C., KOVÁCS, J., NÉMETH, T. & STEVENS T. (2012): Evaluating the use of clay mineralogy, Sr–Nd isotopes and zircon U–Pb ages in tracking dust provenance: An example from loess of the Carpathian Basin. *Chemical Geology* **304/305** 83–96.
- VAN GROENINGEN, N., THOMASARRIGO, L. K., BYRNE, J.M., KAPPLER, A., CHRISTL, I. & KRETZSCHMAR, R. (2020): Interactions of ferrous iron with clay mineral surface during sorption and subsequent oxidation. *Environmental Science: Processes Impacts* **22/6** 1355–1367.
- VARGA, Gy. (2011): Similarities among the Plio-Pleistocene terrestrial aeolian dust deposits in the World and in Hungary. *Quaternary International* **234** 98–108.

VARGA, Gy. (2015): Changing nature of Pleistocene interglacials – is it recorded by paleosoils in Hungary (Central Europe)? *Hungarian Geographical Bulletin* **64/4** 317–326.

VARGA, Gy. (2016): *Porviharok és a hullóporos eredetű üledékek jelentősége környezet-rekonstrukciókban és recens környezeti folyamatokban*. MTA CSFK Földrajztudományi Intézet. Budapest. 252 pp.

WASHINGTON, R., TODD, M. C., LIZCANO, G., TEGEN, I., FLAMANT, C., KOREN, I., GINOUX, P., ENGELSTAEDTER, S., BRISTOW, C.S., ZENDER, C.S., GOUDIE, A.S., WARREN, A. & PROSPERO, J.M. (2006): Links between topography, wind, deflation, lakes and dust: The case of the Bodélé Depression, Chad. *Geophysical Research Letters* **33** L09401.  
<https://doi.org/10.1029/2006GL025827>

WATLING, J. & IRIARTE, J. (2013): Phytoliths from the coastal savannas of French Guiana. *Quaternary International* **287** 162–180.

WU, Y., YOU, H.L. & LI, X.Q. (2018): Dinosaur-associated Poaceae epidermis and phytoliths from the Early Cretaceous of China. *National Science Review* **5** 721–727.

YOST, C.L., JACKSON, L.J., STONE, J.R. & COHEN, A.S. (2018): Subdecadal phytolith and charcoal records from Lake Malawi, East Africa imply minimal effects on human evolution from the ~74 ka Toba super eruption. *Journal of Human Evolution* **116** 75–94.

ZECH, M., BUGGLE, B., LEIBER, K., MARKOVIC, S., GLASER, B., HAMBACH, U., HUWE, B., STEVENS, T., SÜMEGI, P., WIESENBERG, G. & ZÖLLER, L. (2009): Reconstructing Quaternary vegetation history in the Carpathian Basin, SE Europe, using n-alkane biomarkers as molecular fossils. *Quaternary Science Journal* **58/2** 148–155.

ZHANG, W., LU, H., LI, C., DODSON, J. & MENG, X. (2017): Pollen preservation and its potential influence on paleoenvironmental reconstruction in Chinese loess deposits. *Review of Palaeobotany and Palynology* **240** 1–10.

ZURRO, D., GARCÍA-GRANERO, J.J., LANCELOTTI, C. & MADELLA, M. (2016): Directions in current and future phytolith research. *Journal of Archaeological Science* **68** 112–117.

