Open Access 2026-11-06 © Typotex Kiadó

KERESZTURI ÁKOS

BOLYGÓTUDOMÁNY

www.interkonyv.hu © Kereszturi Ákos

Open Access 2026-11-06 © Typotex Kiadó

ÚJ TUDOMÁNYOS ZSEBKÖNYVTÁR

MATEMATIKAI ÉS TERMÉSZETTUDOMÁNYOK

www.interkonyv.hu © Kereszturi Ákos

Open Access 2026-11-06 © Typotex Kiadó

KERESZTURI ÁKOS

BOLYGÓTUDOMÁNY

VULKÁNOK, GLECCSEREK, FOLYÓK ÉS TAVAK A FÖLDÖN KÍVÜL

TYPOTEX

www.interkonyv.hu © Kereszturi Ákos

Open Access 2026-11-06 © Typotex Kiadó

A könyv megjelenését
az Eötvös Loránd Kutatási Hálózat Titkársága támogatta.

ELKH | Eötvös Loránd Kutatási Hálózat

© Kereszturi Ákos, Typotex, Budapest, 2023
Engedély nélkül semmilyen formában nem másolható!

Szakmailag lektorálta: Hargitai Henrik és Szabados László
Szakirodalmi források összeállítása: Kurfis-Pál Bernadett

ISBN 978 963 493 196 6
ISSN 2939-8797

Kedves Olvasó!
Köszönjük, hogy kínálatunkból választott olvasnivalót!
Újabb kiadványainkról, akcióinkról a *www.typotex.hu*
és a *facebook.com/typotexkiado* oldalakon értesülhet.

Typotex Kiadó
Alapította Votisky Zsuzsa, 1989
A kiadó az 1795-ben alapított Magyar Könyvkiadók
és Könyvterjesztők Egyesülésének tagja.
Felelős kiadó: Németh Kinga
Felelős szerkesztő: Kovács Zoltán
Tördelés: Janković Milán
Borítóterv és tipográfia: Somogyi Péter
Nyomta és kötötte: OOK-PRESS Nyomda, Veszprém
Felelős vezető: Szathmáry Attila

www.interkonyv.hu © Kereszturi Ákos

Open Access 2026-11-06 © Typotex Kiadó

TARTALOM

BEVEZETÉS 7

1. TEKTONIKUS FELSZÍNFORMÁK 11
1.1. Eredetük és csoportosításuk 11
1.2. A tektonikus felszínformák típusai 13
1.3. Egész kőzetburok elfordulása 18
1.4. A kőzetburok képződése 21
1.5. Hegységképződés jellegű folyamatok 29
1.6. Tesszerák 32
1.7. A kőzetburok felemésztődése 32
1.8. Szubdukció 33
1.9. További tektonikus eredetű felszínformák 38
1.10. A tektonikus felszínformák területi eloszlása 45

2. VULKANIZMUS 49
2.1. A vulkáni működés jellege 54
2.2. Robbanásos kitörések 55
2.3. Lávaömléses kitörések 58
2.4. További vulkáni képződmények 62
2.5. Meredek vulkánok 66
2.6. Kalderák, lávafolyások és lávatavak 68
2.7. Koronák a Vénuszon 74
2.8. Kriovulkanizmus 80
2.9. Kriomagmás tevékenység 84
2.10. A vulkanizmus területi eloszlása 85

www.interkonyv.hu © Kereszturi Ákos

3. BECSAPÓDÁSOS KRÁTEREK 89

4. A GÁZÁRAMLÁS HATÁSA A FELSZÍNRE 93

5. FOLYADÉKOK A FELSZÍNEKEN 101
5.1. Áramló folyadékok felszínformái 107
5.2. Álló folyadékok nyomai 115

6. JEGES FELSZÍNFORMÁK 123
6.1. Sarki jégsapkák 124
6.2. Gleccserek és társaik a Marson 137
6.3. További jeges felszínformák 145
6.4. Jég-vulkán kölcsönhatások 152

7. LEJTŐS TÖMEGMOZGÁSOK NYOMAI 155
7.1. Lejtős tömegmozgások kisbolygókon 165

8. A REGOLIT 173
8.1. A regolit jellemzői 182

9. NEHEZEN BESOROLHATÓ FELSZÍNFORMÁK 189

UTÓSZÓ 195

Köszönetnyilvánítás 197
Irodalomjegyzék 199
Tárgymutató 237

Open Access 2026-11-06 © Typotex Kiadó

BEVEZETÉS

Évszázadokon keresztül a folyóvölgyek, szigetek, vulkánok vagy jégsapkák a tudományos leírásokban csak földi helyszíneken jelentek meg, csak ilyeneket lehetett bemutatni – eltekintve persze a képzelet szülte tájaktól. Az űrtevékenység megindulásával azonban gyorsuló ütemben bővültek ezek a helyszínek (Illés, 2009). A bolygókutató szondáknak köszönhetően hamar kiderült, hogy nemcsak a Földön hullik csapadék, omlanak a meredek lejtők, vagy folytak folyók, hanem más égitesteken is, és azok jellemzői, területi eloszlása sok információval szolgál (Hargitai, 2006; Hargitai és tsai., 2019). Egyértelmű lett, hogy a saját bolygónkon kialakult képződmények és az itt zajló földtudományi folyamatok ezek széles skálájának csak egy kis részét képviselik. A földtudomány a csillagászattal, fizikával és néhány további tudományterülettel karöltve értelmezi a korábbinál szélesebb skálán megjelenő, a Földről már ismert folyamatokat és felszínformákat ezekben a nekünk extrémnek számító környezetekben.

A bolygótudomány vagy planetológia (Bérczi, 1978, 1985), noha furán hangzik, a földtudomány Földön kívüli változa-

www.interkonyv.hu © Kereszturi Ákos

Open Access 2026-11-06 © Typotex Kiadó

tának vagy kiterjesztésének is tekinthető. Egy olyan témakör, amely egységes rendszerben értelmezi azt, amit a különböző égitesteken látunk: a planetológiában egy kavics lehet akár nitrogénjégből, a folyóban áramló folyadék lehet metánból, a tűzhányó pedig mínusz száz fokon is működhet. Mindezek segítenek az égitestek felszínén zajló és azokat alakító folyamatokat a Földön tapasztalhatónál szélesebb körben megismerni és fejlődésüket megérteni (Bérczi, 1989, 1991). Bolygónk egy olyan laboratóriumnak tekinthető, ahol csak szűk viszonyok között, korlátozottan zajlanak a felszínt és a belsőt alakító folyamatok – ismerjük meg tehát ezen folyamatok és az általuk létrehozott képződmények szélesebb skáláját, amiben más égitestek mint más paramétereket mutató „laborok" segítenek.

Ennek a kiadványnak a célja az elmúlt közel húsz évben született azon bolygótudományi ismeretek bemutatása magyar nyelven, amelyek a Naprendszer szilárd felszínű égitesteinek felszíni jellemzőivel kapcsolatosak, különös tekintettel a rendszerszintű összefüggésekre. Ennek megfelelően az egyes égitesteket és felszínformákat az azokat létrehozó folyamatok szerint csoportosítottam, nem pedig objektumonként tárgyalom. A Naprendszer szilárd felszínű tagjainak külön-külön történő áttekintése a hamarosan megjelenő *Csillagászat* (Szabados László főszerk., előkészületben) könyvben olvasható majd. Olyan témaköröket sem érintek, amelyek a magyar szakirodalom nemrég megjelent művei segítségével részletesen megismerhetők. Ezért nem tárgyalom behatóan a becsapódásokat és következményeiket, amelyekről Hargitai és tsai. (2005) könyvében olvashatunk, valamint a Mars jellemzőit sem, amelyeket Kereszturi (2012) tekinti át. Emellett

www.interkonyv.hu © Kereszturi Ákos

Open Access 2026-11-06 © Typotex Kiadó

részben terjedelmi okokból nem ismertetem az égitestek belső szerkezetét, a légköröket és sok fontos fejlődéstörténeti összefüggést sem (Bérczi, 2007; Illés, 2012).

A könyv jelenlegi tudásunkat tükrözi, természetesen a témakör gyors fejlődése miatt idővel több tétele is túlhaladottá válhat. Számos olyan kifejezéssel illetett képződményről olvashatunk a könyvben, amelyek értelmezése nem evidens minden esetben. A Földön kívüli alakzatokat és folyamatokat a már ismert földi jelenségekhez szükséges hasonlítanunk, ennek megfelelően a már ismert fogalmakat és definíciókat ki kell terjesztenünk más égitestekre. Ilyenkor persze nem mindig felel meg a távoli objektum képződménye a földi nómenklatúrával jelzett képződmény típusának – mégis egyszerűbb az ilyen szóhasználat, mint a fogalmak bonyolult körülírása. Például vulkánnak, dűnének vagy folyóvölgynek olyan felszínformákat nevezünk, amelyek a földi értelmezéshez hasonlóak, noha azzal nem egyeznek meg teljesen. Ennek megfelelően ezek leírását legjobb a ma elérhető legmegfelelőbb közelítésnek tekintenünk, az eltéréseket az adott helyeken majd próbálom jelezni.

A fogalomhasználat terén is akadnak „szokatlan" helyzetek. A Földön például nem szokás a jeget kőzetnek tekinteni, viszont a külső Naprendszerben ez a domináns kőzetalkotó anyag. A csapadék, a lejtős tömegmozgások vagy az álló folyadékok stb. eseteiben is a Földön kívüli jelenségeket az itthon megszokott fogalmakkal tárgyaljuk. Ugyanakkor sok felszínforma besorolása a feltételezett keletkezési mód alapján történik, és utóbbiról nincs minden esetben biztos tudásunk.

Fontos az égitestek szilárd külső burkának jellemzése és besorolása az ismert kategóriákba. Itt az okozhat gondot,

www.interkonyv.hu © Kereszturi Ákos

Open Access 2026-11-06 © Typotex Kiadó

hogy egyes égitesteknek több szilárd külső burka is van: az óriásbolygók jégholdjain például a kívülről látható jégpáncél számtalan becsapódásos krátert, tektonikus és egyéb formát mutat – ugyanakkor a jégréteg alatti vízréteg alján egy újabb nagy nyomású szilárd jég vagy szilikátos felszínű kőzetburok következik.

Mindezek értelmezése várhatóan sokat fog módosulni és fejlődni a következő években. A szakkifejezések nagyobb része zárójelben angolul, dőlt betűvel is olvasható, megkönnyítve az interneten ma már elérhető hatalmas mennyiségű szakirodalom értelmezését. Előfordul, hogy sok felszínformának vagy terület nevének nem egyértelmű a magyar fordítása, néhány alkalommal a szakirodalomban használt latin vagy angol változatot is jelzem dőlt betűvel. A könyv fontos eleme a tárgymutató, amivel egy-egy érdekes felszínforma megtalálható akkor is, ha nem tudjuk, mely égitesten vagy felszínformatípusban van jelen.

www.interkonyv.hu © Kereszturi Ákos

Open Access 2026-11-06 © Typotex Kiadó

1. TEKTONIKUS FELSZÍNFORMÁK

1.1. EREDETÜK ÉS CSOPORTOSÍTÁSUK

A szilárd külső burok tektonikus és vulkanikus jellegű átalakulásához belső és külső eredetű energiaforrások egyaránt hozzájárulhatnak. Itt szó lehet *hőenergiaként* felszabaduló különböző belső hatásokról (például radioaktív fűtés, akkréciós eredetű maradványhő, hőfelszabadulással járó geokémiai és fázisátalakulások), de ide tartoznak olyan *mechanikai* átalakulások is, amelyek nem vagy csak alig járnak fűtőhatással (például fázisváltozáshoz köthető térfogatváltozás vagy főleg a keletkezés utáni korai időszakban jellemző melegedés kiváltotta tágulás). Mindezek mellett a *becsapódások* is jelentős energiaforrást képeznek (amelyek gyakorisága és mértéke a korai időszakot követően gyorsan csökkent a Naprendszer fejlődése során), ezek részben hőhatással, részben mechanikai deformációval járhatnak. Rendkívül nagy becsapódások esetében akár az égitest külső rétegeit is leszakíthatják (például a Merkúr anomálisan nagy vastartalmának kialakulását a szilikátos külső rétegek leszakadása segítette, illetve ilyen esemény robbantotta ki a Hold anyagát a Földből, akárcsak a Plútó holdjainak anyagát a Plútóból), vagy azt szét is

www.interkonyv.hu © Kereszturi Ákos

Open Access 2026-11-06 © Typotex Kiadó

darabolhatják – mindezek a későbbi tektonikus és vulkanikus folyamatok jellegét is befolyásolhatják.

Külső eredetű hatás a napsugárzás (amely a központi csillaghoz kötött tengelyforgás esetén tartósan magasabb hőmérsékletet eredményezhet a felszín adott részén és idővel a kőzetburok mélyebb tartományaiban is – ilyen a Naprendszerben feltehetőleg nincsen, de a Merkúr alacsonyabb szélességű területein a kéreg magasabb hőmérsékletű lehet a polárisnál), ide sorolandó az *árapályhatás* is (ez mechanikai deformációt és hőfelszabadulást okoz). Fontosak továbbá az árapállyal kapcsolatos nemszinkron tengelyforgás és ezzel összefüggésben a valódi pólusvándorlás (az ilyen elfordulásnak kedvez a sok jeges hold esetében előforduló mélységi vízréteg – Collins és tsai., 2009). Itt említendő a tengelyforgási sebesség változása és ezzel összefüggésben a stabil forgási ellipszoid alak módosulása, valamint egyéb pályaelem-változások hatása is. Szintén jelentős a fentiekkel összefüggésben fellépő *térfogatváltozás* hatása, amely tágulást a belső víz megfagyása okozza. Ez az óriásbolygók jégholdjain fordulhat elő, továbbá a Plútón és annak Charon holdján is ehhez kapcsolódhat a jellegzetes tágulásos tektonika (Hammond és tsai., 2016).

Különleges példák a legkisebb égitestek. A kisbolygók esetében például a napfény elnyelésének és visszasugárzásának különbsége nyomán, az ún. YORP-effektus révén változhat a tengelyforgási sebesség. A YORP-effektus (a név a hatást elsőként kidolgozó, illetve pontosító kutatók nevének – Yarkovsky, O'Keefe, Radzievskii, Paddack – kezdőbetűiből összeállított betűszó) keretében az égitestet érő és róla szóródó napsugárzás, valamint az elnyelődő és visszasugárzott komponensek irányeloszlásának különbségétől keletkező nyoma-

www.interkonyv.hu © Kereszturi Ákos

Open Access 2026-11-06 © Typotex Kiadó

ték változtatja az égitest forgási sebességét és forgástengelyének irányát – ezzel pedig a nehézségi erőterét és alakját. Ha módosul az egyensúlyi alak, az égitest poláris átmérője nőhet vagy csökkenhet, ezzel összefüggésben pedig tektonikus jelenségek léphetnek fel rajta, szélsőséges esetben szét is szakadhat az égitest.

1.2. A TEKTONIKUS FELSZÍNFORMÁK TÍPUSAI

Definíció szerint tektonikus eredetű felszínformáknak azokat tekintjük, amelyek egy égitest szilárd vagy részben szilárd halmazállapotú külső rétegének (amit többnyire kőzetburoknak avagy litoszférának neveznek) töréses vagy képlékeny deformációs változása révén jönnek létre. Akadnak olyan égitestek is, amelyeken „több kőzetburok" is előfordul, például az Europa jupiterhold jeges anyagú külső kőzetburkán sok tektonikus és néhány vulkanikus felszínforma van, miközben mélyebben, a vízréteg alján is van egy kőzetburok (ami szilikátos), várhatóan szintén hasonló eredetű felszínformákkal. A tektonikus folyamatokhoz sorolhatók a kisbolygók hasonló jelenségei is, noha ott az érintett kőzetréteg az egész kisbolygót jelentheti. A tektonikus mozgásokat sokszor szerkezeti mozgásoknak is nevezik. A tektonikus eredetű felszínformák azonosítása, pontosabban ebbe a kategóriába sorolása az adott képződmények kinézete és a feltételezett keletkezési mód alapján történik – noha az utóbbi esetben a jelenlegi ismereteink (részben a felszínekről nyert adatok sokféle értelmezhetősége miatt) nem biztos, hogy megfelelnek a valóságnak, és idővel módosításra szorulhatnak.

www.interkonyv.hu © Kereszturi Ákos

Open Access 2026-11-06 © Typotex Kiadó

Általánosan érvényes megállapítás, hogy az *óriásbolygók jeges holdjainak* felszínén (a szilikátos kőzetekhez hasonlóan) rideg töréses folyamatok jellemzőek, míg a felszíntől lefelé növekszik a képlékeny deformációk lehetősége és aránya. Speciális csoportot képez az ún. viszkózus relaxáció (viszkózus kúszás, *viscous creep*), avagy képlékeny elernyedés, ami a jégholdak felszínformáinál lehet jellemző (Bland és McKinnon, 2018). Ennek hatására a Ganymedesnél esetenként egy eredetileg besüllyedő domborzati elem aljzata akár domború is lehet idővel (Parmentier és Head, 1981), ilyen például a jeges Ceresnél is azonosítható az idősebb kráterek alakjában (Schenk, 2015). A Ganymedes 2 km-nél nagyobb kráterei jellegzetesen sekélyebbek, mint a Hold hasonló kráterei (Schenk, 1991), ami a jégnek a szilikátos kőzethez viszonyított nagyobb képlékenységének tulajdonítható. Ilyen elernyedt kráterek főleg a Ganymedes idős, sötétebb poligonális területein lehetnek (Bland és tsai., 2017), talán mert a keletkezésük utáni korai időszakban nagyobb lehetett a belső eredetű hőáram. A teljes ellapuláskor a kráterek után csak egy albedófolt marad vissza, ezek neve *palimpszeszt*.

Ezen jeges holdaknál néha jelentős tektonikus aktivitás is előfordulhat például az árapály-eredetű kéregmozgások hőhatása miatt. Emellett sokszor várható főleg korai erősebb aktivitás az elmúlt 1-2 milliárd évhez képest, az anyaguk egy része ugyanis kezdetekben cseppfolyós halmazállapotúvá alakulhatott, majd még korán megfagyott, és az ezzel egyidejűleg fellépő térfogat-növekedés járhatott tektonikus folyamatokkal (1.1. ábra). A legtöbb jéghold esetében inkább tágulásos, semmint összenyomódásos tektonikus alakzatok mutatkoznak.

www.interkonyv.hu © Kereszturi Ákos

Open Access 2026-11-06 © Typotex Kiadó

A kőzetburok tektonikai viselkedése szempontjából kritikusak annak mechanikai jellemzői, ezeket részben a *reológia* témakörében tárgyalják. Ilyen szempontból a Földhöz viszonyítva egzotikus eseteket képeznek a fent említett jégholdak. Ugyanis fontos eltérés, hogy a szilárd jég sűrűsége kisebb a folyékony vízénél, ennek megfelelően a jég „felúszik" a víz tetejére (ellentétben néhány szilikátolvadékkal), míg az emelkedő kriomagmás (vizes) olvadékok önmagukban csak sűrűségkülönbség alapján nem törnek ki a jeges felszínekre. Mégis van, ahol fellépett kriovulkanizmus például belső nyomás következtében. Ugyanakkor a jég sokkal képlékenyebb az olvadásponthoz közeledve, mint a szilikátos kőzetek – ennek megfelelően könnyebben és gyorsabban deformálódik, noha itt is millió éves időskálákról van szó. Továbbá a mélység növekedésével gyorsabban vált képlékeny deformációra a jég, és így a felszín alatti áramlásai könnyebben befolyásolják a felszíni, ridegebb réteg mozgását.

A tektonikus folyamatok értelmezését ugyancsak elősegíti az adott égitest domborzatának magasságeloszlása. Az 1.4. ábra alapján a Föld esetében a világosszürke a világtenger által borított területeket, míg a Marson a többféle árnyalat a feltételezhetően egykor vízzel borított területeket jelzi. Jól látszik a Földön a kétféle kéregtípust jellemző eltérő vastagság, kémiai összetétel és sűrűség, valamint az emiatt fellépő domináns magasságkülönbség (óceáni és kontinentális lemezek), hasonló a domborzatot tekintve csupán sejthető a Mars esetében (északi mélyföldek – déli felföldek, ezek kettőssége angolul *Hemispheric Dichotomy*), de ott nem mutatkozik geokémiai eltérés. A Vénuszon és a Holdon pedig még a domborzat alapján sincs ilyen megoszlás, noha a holdi kéreg

www.interkonyv.hu © Kereszturi Ákos

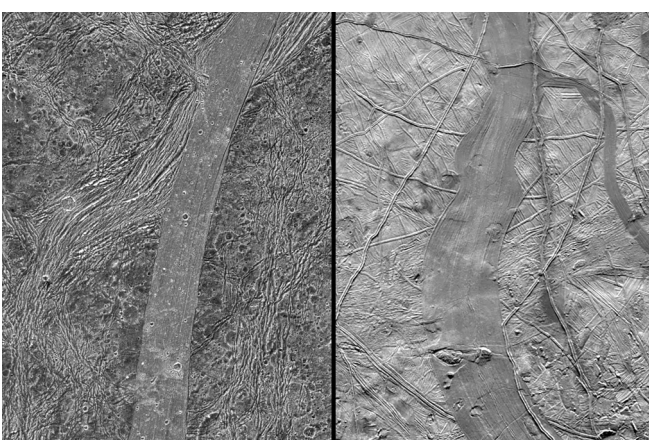
Open Access 2026-11-06 © Typotex Kiadó

1.1. Az Arbela Sulcus tágulásos felszínforma a Ganymedesen (balra) és egy névtelen tágulásos felszínforma az Europa jégpáncélján (jobbra) (NASA, JPL, Brown University).

1.2. Összenyomódással keletkezett, 10-15 km széles gerincek alkotta hegyvonulatok az Ovda Regio északi peremének 200 km széles részén, a Vénuszon. A mélyebb és sötétebb területek lávaömléseket jeleznek a Magellan űrszonda radarfelvételén (NASA, JPL).

1.3. Kompressziótól keletkezett, lapos, gyűrődéses alakzatok az Astypalaea Linea szürkés sávja térségében (felfelé, kissé jobbra futó sáv). Utóbbi tágulással és oldaleltolódással, valamint anyagfeláramlással együtt keletkezett (NASA, JPL, JHUAPL, Brown University).

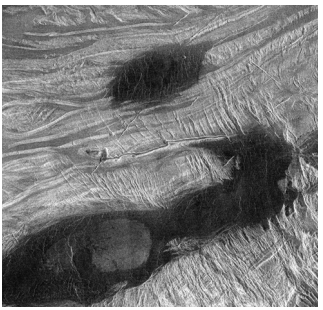
1.4. Hipszografikus görbék a Föld, a Vénusz, a Hold és a Mars esetében (balról jobbra).



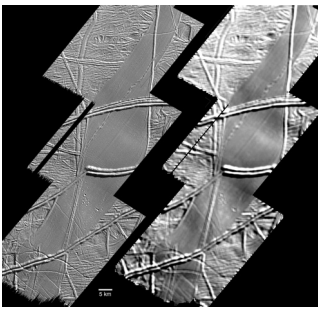
1.1.

www.interkonyv.hu © Kereszturi Ákos

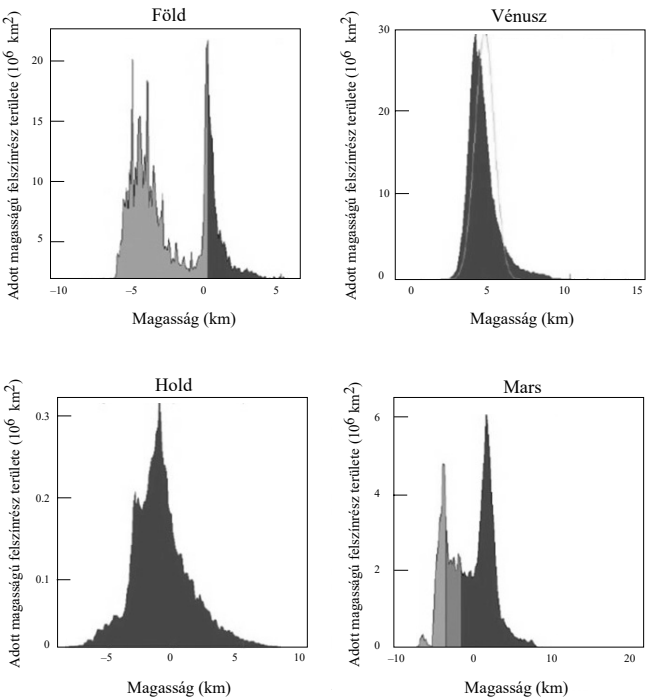
Open Access 2026-11-06 © Typotex Kiadó



1.2.



1.3.



1.4.

www.interkonyv.hu © Kereszturi Ákos

Open Access 2026-11-06 © Typotex Kiadó

vastagsága jelentős intervallumot fed le (Stoddard és Jurdy, 2012).

A tektonikus felszínformák tárgyalása során először a kőzetburok egészére jellemző mozgásformák és az ezekkel kapcsolatos felszínformák kerülnek sorra. Ezt követi a kőzetburok keletkezésének, mozgásának és felemésztődésének ismertetése, majd pedig az eddig nem vagy csak korlátozottan említett tektonikus eredetű felszínformák bemutatása. A tektonikus felszínformák értelmezésében sokat segít a felszíni domborzat, a formakincs és a gravitációs anomáliák vizsgálata – és természetesen az egyéb feszínformák, főleg vulkanikus képződmények jellegéből és a korbecslésből származó *kontextus*.

1.3. EGÉSZ KŐZETBUROK ELFORDULÁSA

Ezen jelenség keretében az egész külső kőzetburok egyben fordul el a belső részek felett, ezt a Föld esetében valódi pólusvándorlásnak is nevezik. A jelenség oka a kőzetburok megváltozott tömegeloszlása, amely a tengelyforgáshoz viszonyított további elfordulást okozó erőket ébreszt, és ezek a belső rétegekhez képest elfordítják a külső szilárd burkot. Ehhez persze az szükséges, hogy a külső és a belső rétegek között valamilyen képlékeny anyag legyen, ami a Földnél az asztenoszféra, jégholdaknál pedig a belső vízréteg.

A *Mars* pólusai „eredetileg" mintegy 20-25°-ra lehettek a mai pozíciótól, amit geodinamikai szempontból, tehát a kőzetburok tömegeloszlását tekintve az észak–dél ellentét befolyásolhatott és határozhatott meg korábban. A vulkani-

www.interkonyv.hu © Kereszturi Ákos