

TDK DOLGOZAT

**Az Enceladus porozitása
és hatása a belső szerkezetre**

KISVÁRDAI IMRE

Földtudomány BSc.

II. évfolyam



Témavezetők:

KURFIS-PÁL BERNADETT

Tudományos segédmunkatárs, CSFK CSI

KERESZTURI ÁKOS

Tudományos főmunkatárs, CSFK CSI

**Eötvös Loránd Tudományegyetem
2022**

Kivonat

Köszönetnyilvánítás

Köszönöm a Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet (CSFK, ELKH) támogatását amit a demonstrátori program keretében nyújtott számomra.

Budapest, 2022. december 07.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	1
2. A modell elmélete és számítási módszerei	2
2.1. Porozitás	2
2.2. Összpórustérfogat	4
2.3. Összpórusfelület	4
2.4. Egységnyi felület alatti pórustérfogat és pórusfelület	4
2.5. Felhasznált kezdeti paraméterek	5
3. Eredmények	5
4. Diskusszió	11
5. Összegzés	14
Hivatkozások	16

1. Bevezetés

A jeges holdak különös érdeklődésnek örvendtek a tudományos küldetések terén az utóbbi három évtized folyamán. A NASA 1995-ben útnak indult Galileo küldetése például a Jupitert vette célba és az Europa nevű jeges holdjáról is készített méréseket, felvételeket. Az ESA és a NASA együttműködésével létrejött Cassini misszió a Szaturnuszt és annak holdjait, köztük az Enceladus jeges holdat is tanulmányozta és adatokat szolgáltatott nekünk a hold felszínéről, légköréről, valamint mágneses és gravitációs teréről. A várhatóan a 2023-ban elinduló JUICE (JUUpiter ICy moons Explorer) űrszonda a Ganimedes, Europa és Callisto holdakon (melyek mindegyikén feltételezünk a felszín alatti víztömeget) fogja vizsgálni az ismert lehetőség szempontjából fontos feltételek meglétét, a felszín kémiai összetételét, illetve a felszíni jégképzőanyagok vastagságát. Az eddigi tudományos erőfeszítések eredményeképpen a naprendszerbeli jeges holdak felszínét és egyéb távérzékeléssel könnyen mérhető tulajdonságait aránylag jól ismerjük. Ezzel szemben a felszín alatti régiókról meglehetősen kevés információ áll rendelkezésünkre. Ennek oka, hogy a belső szerkezet részletes megismeréséhez felszíni leszállóegységekre lenne szükség, a holdak belső anyagából történő közvetlen mintavételhez pedig ezen felül mélységi fúrásokat is végre kellene hajtani. A szakirodalomban gyakran tárgyalt témák közé tartozik az Enceladus és az Europa vízrétege, felszíni jelenségeinek belső eredete és az árapály jelenségek (Sekine et al., 2015; Travis and Schubert, 2015). A helyszíni mérések hiányában tehát szükséges a belső szerkezetet leíró numerikus modelleket készíteni, ha célunk a belső szerkezet mélyebb tanulmányozása és így a felszíni jelenségek könnyebb megértése.

A dolgozatomban célpontját, az Enceladus belső szerkezetét is intenzív tudományos vita övezi. Az utóbbi években számos tudományos publikáció témája volt az Enceladus felszín alatti összetétele, porozitása, szerkezete (Daval et al., 2022; Hsu et al., 2015; Thomas et al., 2016). A belső folyamatokat és szerkezetet egyik erősen befolyásoló paraméter a porozitás („lyukacsosság”), amely az égitestet alkotó kőzet üregei térfogatának és össztérfogatának aránya. Ezen paraméter értéke befolyásolja többek között a kőzet folyadék vagy gáz áteresztőképességét (permeabilitását), a belső folyadékáramlást, az oldott ásványtranszportot és a különböző kémiai reakciók/folyamatok mértékét. A porozitás számítása tehát szükséges, hogy teljes, átfogó és pontos képet kaphassunk az égitestek struktúrájáról. Az eddigi szakirodalomban található numerikus modellek csak feltételezett elméleti értékekből és fizikai összefüggésekből épülnek fel, illetve becslik meg a porozitással kapcsolatos értékeket (Choblet et al., 2017; Neumann and Kruse, 2019). Ebben a dolgozatban a

szakirodalomban található modellektől eltérő módon alkalmazok földi, tapasztalati értékekből származtatott empirikus formulát az Enceladus - valamint összehasonlításképpen a Föld és a Mars - porozitás-értékeinek kiszámítására. A három égitest összehasonlítása egy általános képet ad számunkra a bolygók méretének porozitáson gyakorolt hatásáról. A modell tulajdonságait, a számítás elméletét és módját a 2. fejezetben mutatom be részletesen. A 3. fejezetben ismertetem a kutatásom eredményeit, a 4. fejezetben a bemutatott eredményeket összevetem a különböző szakirodalmi források eredményeivel, továbbá tárgyalom az esetleges hasonlóságok és különbségek okait. Az 5. fejezetben az eredményeket összefoglalom és jelentőségüket értékelem, valamint a jövőbeli lehetséges alkalmazásokra, fejlesztésekre is kitérek.

2. A modell elmélete és számítási módszerei

Ebben a fejezetben a porozitásra vonatkozó paraméterek értékeinek számítási módszerét foglalom össze. Ilyen paraméterek például a porozitás változása a mélység függvényében, az összpórustérfogat és az összpórusfelület. Számításaimban a következő egyszerűsítéseket alkalmaztam:

1. Minden égitestet tökéletes gömbnek tekintünk.
2. Feltételezzük, hogy minden egyes pórus gömb alakú. Ezen pórusok mindegyike térben elkülönül egymástól az egyszerűsítés érdekében.
3. Az égitestek összetétele teljes egészében homogén, differenciálatlan kondritos összetételű kőzet és víz keverékből áll.
4. Az égitestek felszínén minden pont ugyanakkora porozitással rendelkezik, ez a felszíni porozitás.

Az eredmények bizonyos mértékű további bizonytalanságot tartalmaznának további szabad paraméterek bevezetésével (például változó sűrűség vagy ϕ). Ezért kompromisszumot kell kötni az egyszerű és hatékony, leegyszerűsített geometriájú modellek (Schubert et al., 2007; Prialnik and Merk, 2008) praktikussága és a részletgazdag numerikus modellek realizmusa (Choblet et al., 2017; Neumann and Kruse, 2019) között.

2.1. Porozitás

Az égitestek kőzete és az ott jelenlévő víz közötti kölcsönhatásokat alapvetően határozza meg a kőzet porozitása. A porozitás mértéke megadja, hogy a kőzet ösztérfogatának

hányadrésze üres (vagy folyadékkal teli) tér, és hányadrésze a kőzet tényleges, tömör anyaga. Ezt az összefüggést az alábbi egyenlet írja le (Trolard et al., 2022):

$$\phi = \frac{V_{void}}{V_{rock}} \quad (2.1)$$

A ϕ a porozitást, a V_{void} a kőzetben jelenlévő üres térfogatot, azaz pórustérfogatot, a V_{rock} pedig a kőzet össztérfogatát jelöli. Az 2.1 egyenlet alapján felírható a következő összefüggés is, ahol a V_{solid} a kőzet tényleges, pórusmentes térfogatát jelöli:

$$1 - \phi = \frac{V_{solid}}{V_{rock}} \quad (2.2)$$

Adott összetételű kőzet porozitása függ a nyomástól: a nyomás növelésének hatására a porozitás csökken. Egy égitest porozitását vizsgálva ez azt jelenti, hogy a porozitás a mélységgel, azaz a felszíntől való távolsággal csökken a növekvő litosztatikus nyomás (az adott mélység felett elhelyezkedő kőzet súlya által kifejtett nyomás) miatt. Ez a folyamat az úgynevezett kompakció. A 0% porozitással rendelkező kőzetet kompaktálódottnak hívjuk. Geofizikai kutatások eredményeképpen tudjuk, hogy a mélység függvényében történő porozitás csökkenés exponenciális jellegű folyamat, amelyet a következő egyenlet ír le (Clifford, 1993):

$$\phi(z) = \phi_0 \exp\left(\frac{-z}{k}\right) \quad (2.3)$$

Ebben az egyenletben a ϕ_0 a felszíni porozitást, z a mélységet, k pedig a porozitás-csökkenési konstans jelöli, melynek értéke a 2.4 egyenlet alapján határozható meg. A 2.3 egyenletben leírt számítással kapott értékek általában alulbecsülik a porozitás értékét adott mélységben, tehát az eredmények a valós értékek alsó korlátjainak tekinthetők. A következő egyenlet adja meg k konstans értékét (Le Ravalee and Guéguen, 1994):

$$k = g\beta(\rho_k - \rho_f) \quad (2.4)$$

A k konstans értéke tehát függ az égitest felszíni gravitációs gyorsulásának értékétől (g), az alkotó kőzet sűrűségétől (ρ_k), a réseket kitöltő folyadék vagy gáz sűrűségétől (ρ_f) és összenyomhatóságától (β). Az utóbbi három paraméter a kőzet és a porozitásában lévő folyadék anyagi minőségétől függ, így ezeket a modellünkben konstansnak tekintjük, csak a gravitációtól való függést vesszük figyelembe. A k együttható értéke így egyenesen arányos g értékével.

2.2. Összpórustérfogat

A porozitás alapján lehet kiszámítani az összpórustérfogatot, amely megadja az égitestben található összes pórus térfogatának értékét. Ez a paraméter meghatározza, hogy a kőzet pórustereiben mennyi folyadék vagy gáz fér el. Ezen paraméter kiszámításához a következő egyenletet származtattuk egy r sugarú gömb felület függvényének és a 2.3 egyenletnek a szorzatát a középponttól a felszínig integrálva:

$$V_{\Sigma} = \int_0^r \phi(z) 4\pi(r-z)^2 dz = 4k\pi\phi_0(2k^2 - 2kz + z^2) \exp\left(\frac{z-r}{k}\right) \quad (2.5)$$

ahol r az égitest sugara, V_{Σ} az összpórustérfogat, z a mélység, k pedig a porozitás csökkenési konstans.

2.3. Összpórusfelület

A teljes pórusfelület a testen belül található összes pórus együttes felülete. Ennek kiszámításához abból a feltételezésből indultam ki, hogy minden pórus gömb alakú, és ezen gömbök lehetséges sugarainak hosszát a Friedrich et al. (2008) által megmért meteoritmintákban található pórus sugar értékek minimumát és maximumát választottam határértékeknek. A vonatkozó pórusméreteket a 2.1 táblázat tartalmazza. Az égitestek belsejében jellemző összpórusfelület kiszámítására szolgáló egyenletet a 2.5 egyenletből származtattam:

$$A_{\Sigma} = \frac{V_{\Sigma}}{V_p} A_p \quad (2.6)$$

ahol A_p egy darab pórus felületét, V_p egy darab pórus térfogatát, A_{Σ} pedig az égitestben megtalálható összpórusfelületet jelöli. A kezdeti felszíni porozitás felső korlátját és a pórus sugarak alsó korlátját felhasználva megkapjuk az összpórusfelület maximum értékét.

2.4. Egységnyi felület alatti pórustérfogat és pórusfelület

Az Enceladuson, a Földön és a Marson belüli pórusok térbeli koncentrációjának összehasonlítása érdekében kiszámítjuk a pórusfelület és a pórustérfogat értékét az egyes égitestekben 1 km^2 terület alatt. A számításainkban térben elkülönült pórusokat veszünk figyelembe, azonban a valóságban egymással összefüggő, kommunikáló pórusüregek lehetnek jelen – ez a helyzet azonban nem befolyásolja az általunk alkalmazott megközelítést.

$$A_r = A_\Sigma \frac{1km^2}{4\pi r^2} \quad (2.7)$$

$$V_r = V_\Sigma \frac{1km^2}{4\pi r^2} \quad (2.8)$$

A fenti egyenletekben az A_r és V_r azt a pórusfelületet, valamint pórustérfogat mennyiséget jelenti, amely egy r sugarú égitest felszínének $1km^2$ -es része alatt van.

2.5. Felhasznált kezdeti paraméterek

A következő táblázatban az Enceladus, a Föld és a Mars különböző, a modellhez felhasznált fizikai paramétereinek értékei láthatók:

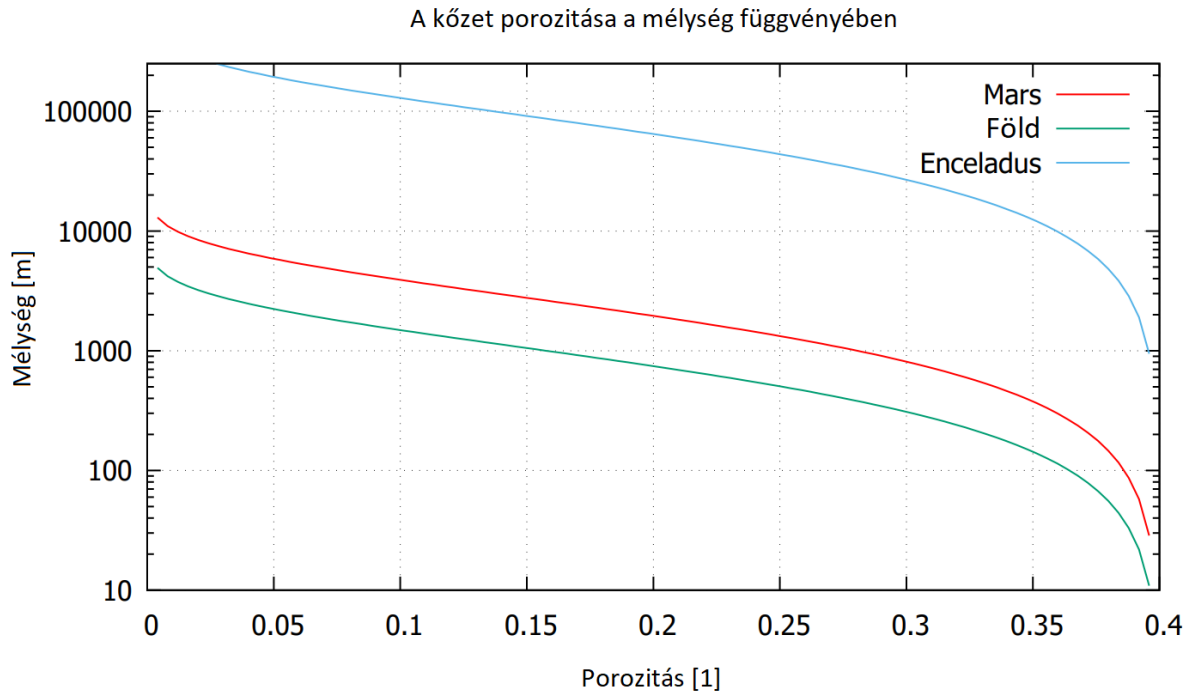
Paraméter	Szimbólum	Érték	Mértékegység
Enceladus sugara	r_e	252.1	km
Felszíni gravitációs gyorsulás az Enceladuson	g_e	0.113	ms^{-2}
Porozitás csökkenési konstans az Enceladuson	k_e	93.186	km
Föld sugara	r_f	6371	km
Felszíni gravitációs gyorsulás a Földön	g_f	9.81	ms^{-2}
Porozitás csökkenési konstans az Földön	k_f	93.186	km
Mars sugara	r_m	3389.5	km
Felszíni gravitációs gyorsulás az Marson	g_m	3.71	ms^{-2}
Porozitás csökkenési konstans az Marson	k_m	2.82	km
Felszíni porozitás	ϕ_0	0.04-0.40	-
Kőzet összenyomhatósági állandója	β	$6.332 * 10^8$	Pa^{-1}
Tömör kőzet sűrűsége	ρ_k	2495	kgm^{-3}
Víz sűrűsége	ρ_f	997	kgm^{-3}
Pórusok sugarának maximuma	r_{max}	1	mm
Pórusok sugarának minimuma	r_{min}	25	nm

2.1. táblázat. Ez a táblázat összefoglalja az Enceladus, a Föld és a Mars fő anyagi tulajdonságait, valamint a kőzet fizikai tulajdonságaira vonatkozó korlátokat, mely értékeket a Papike et al. (1976); Thomas et al. (2016); Travis and Schubert (2015); Rovira-Navarro et al. (2022); Čadež et al. (2016) kutatásokból vettem.

3. Eredmények

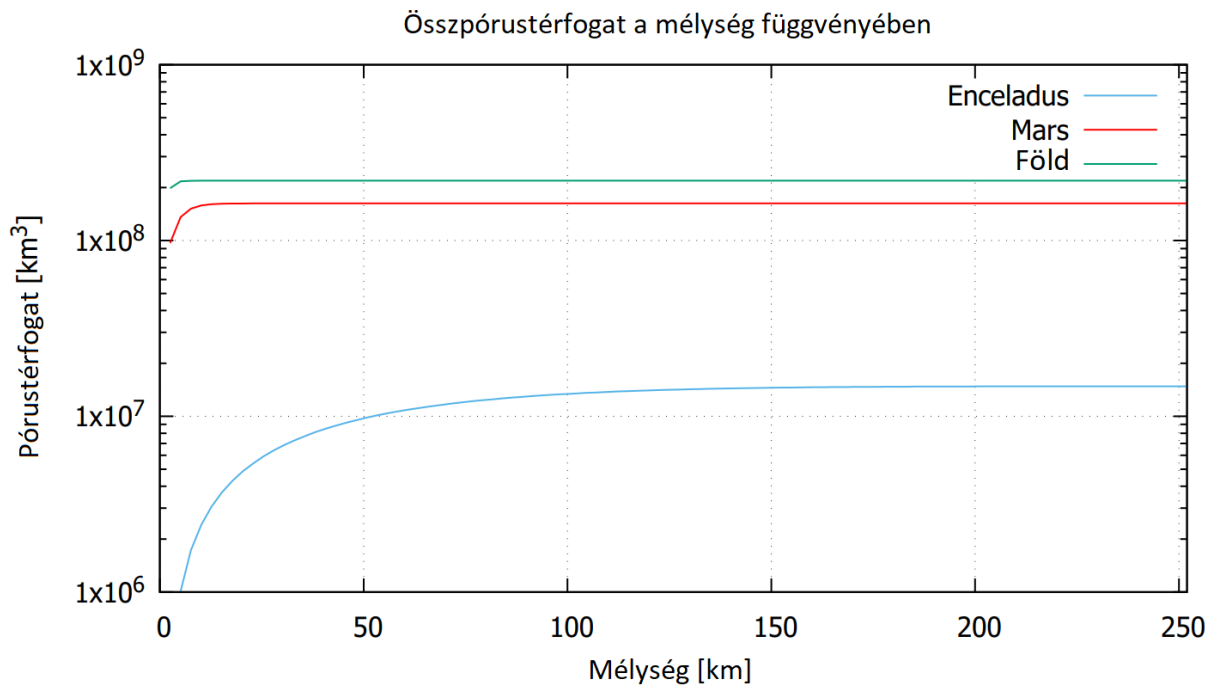
Az Enceladus, a marsi kéreg és a földkéreg potenciális porozitás profiljai a 3.1 ábrán láthatók. Mindhárom vizsgált égitestnél 40%-os felszíni porozitást vettem alapul, amely érték összhangban van a Macke et al. (2011) által mért széntartalmú kondrit meteoritminták maximális porozitásával. Mivel a 40%-os érték az említett meteoritmintában a

porozitásértékek maximuma, én is ezt választottam a kezdeti értékeim maximumának, így ez az érték egy felső határt ad eredményül minden számításunkra. Az alsó határértékek kiszámítása ugyanezzel a módszerrel történik, de 4% kezdeti porozitás értékekkel. A felszíni porozitás értékének alsó határát alapul vevő számítások eredményeit ebben a munkában nem mutatjuk be, mivel egy ponton sem szignifikáns az eltérésük a bemutatottakhoz képest, egy konstans 0,1-szeres szorzótól eltekintve.

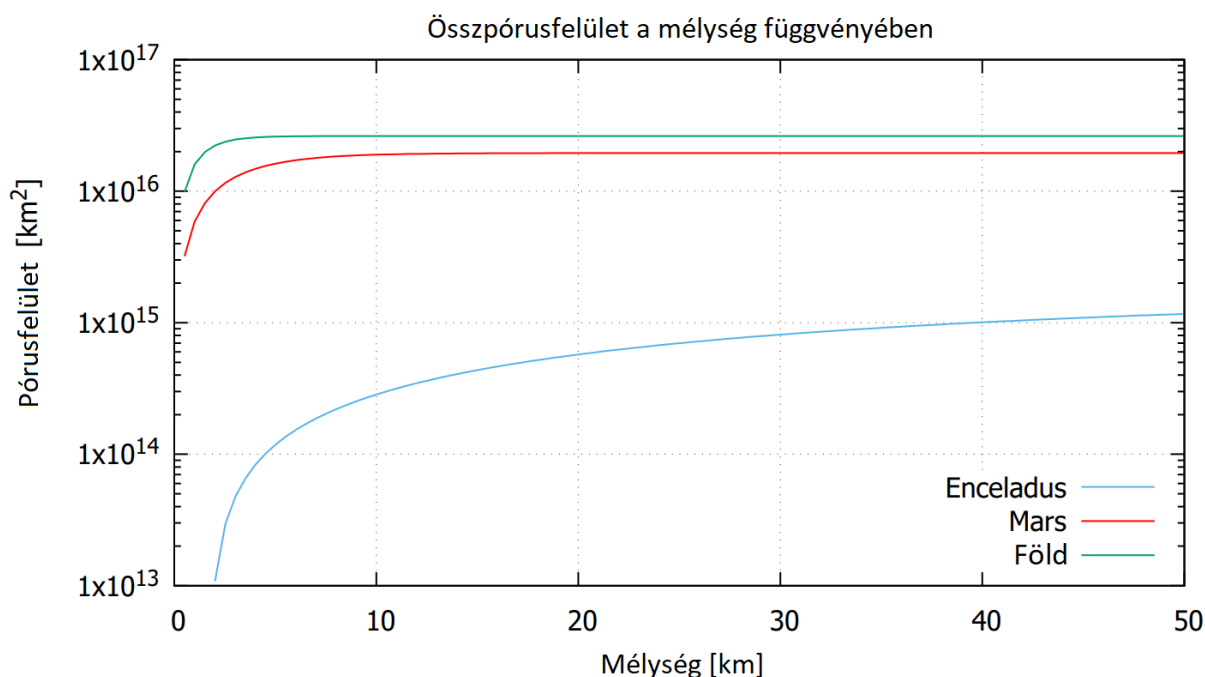


3.1. ábra. A Föld, a Mars és az Enceladus porozitás profiljai. A számítások 40%-os felszíni porozitást vesznek alapul, és a grafikon felső határa 252,1 km, ami megegyezik az Enceladus sugarával.

Modellünk szerint a Föld és a Mars kompakciós mélysége körülbelül 4,5 km-es, illetve 10,5 km-es mélységben található a felszín alatt, míg az Enceladus belseje sehol nem kompaktálódik teljesen (még a centrumában sem) a test alacsony tömege és az ebből eredő gyengébb gravitációs hatás miatt. Az Enceladus központjának porozitása 3%, ami egyenlő a Földével 3,78 km-en és a Marséval 7,30 km-en. A 2.5 és a 2.6 egyenletek eredményeivel együtt látható a Föld, a Mars és az Enceladus összpórustérfogata és összpórusfelülete a 3.2 és 3.3 ábrákon.

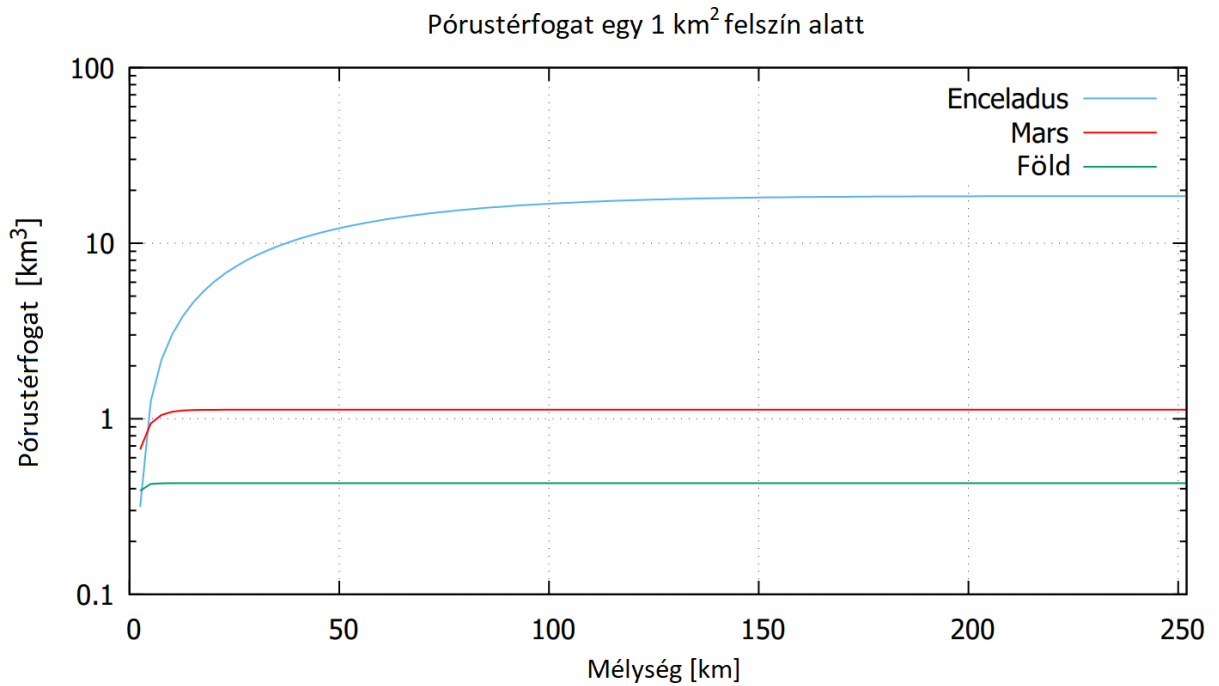


3.2. ábra. Számításaink szerint az Enceladus összpórustérfogata $1,346 \cdot 10^7 km^3$, a Marsé $1,727 \cdot 10^8 km^3$, a Földé pedig $2,108 \cdot 10^8 km^3$. Látható, hogy a nagy méretű kőzetbolygók az Enceladushoz képest kisebb mélységben kompaktálódnak, így ezen égitesteken a felszínhez közelebb éri el a pórustérfogat értéke a maximumát.



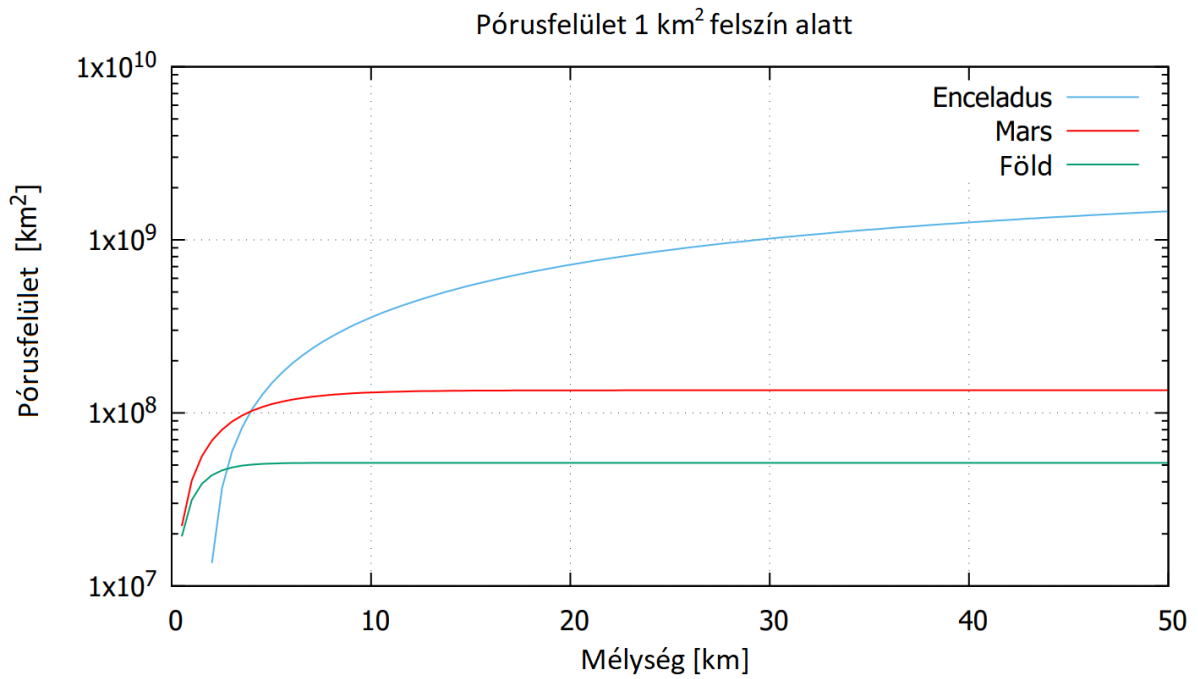
3.3. ábra. A három vizsgált égitest összpórusfelületét ezen logaritmikus grafikonon összegzi. Számításaink szerint az Enceladus összpórusfelületének értéke $1.777 \cdot 10^{15} km^2$. A Mars és a Föld ugyanazon paraméterének értéke $1.950 \cdot 10^{16} km^2$ és $2.726 \cdot 10^{16} km^2$.

Az Enceladus és a tárgyalt bolygók közötti egy nagyságrendbeli különbség abból adódhat, hogy mindkét bolygó nagyobb felszínnel rendelkezik, mint az Enceladus. Az égitestekben megtalálható pórusök összesített térfogatának és felületének kiszámítása után a pórustérfogat $1 km^2$ alatti mennyiségét számítottuk ki a 2.8 egyenlet alapján, és ábrázoltuk a pórustérfogat kumulatív mennyiségének egységnyi felület alatti változását a mélység függvényében. Az eredményeket a 3.4 ábra mutatja be.



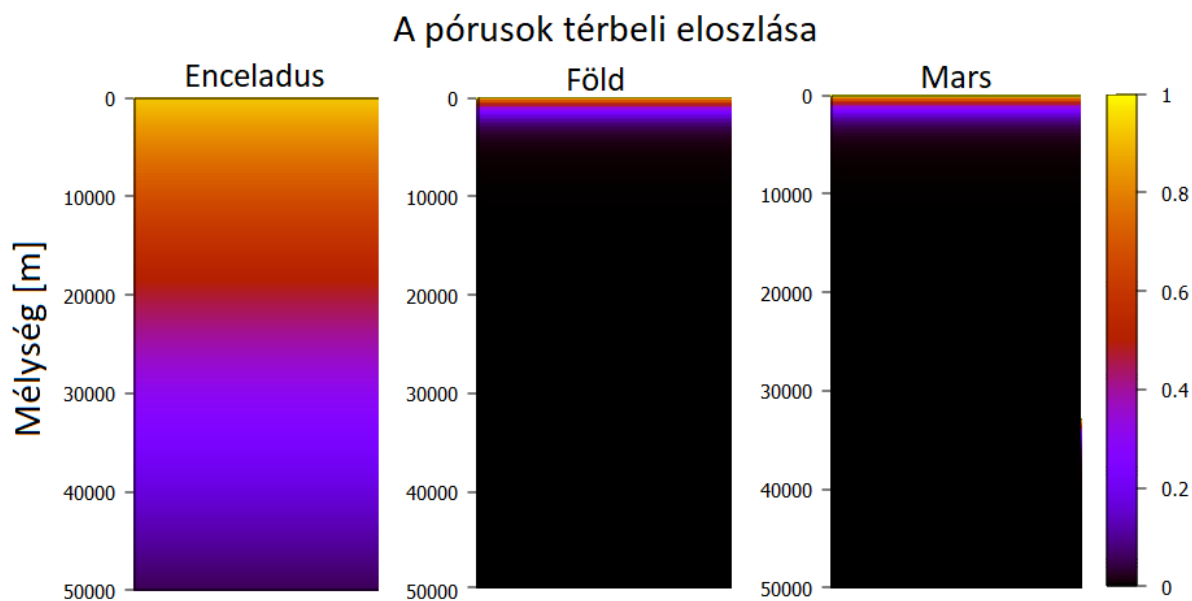
3.4. ábra. A grafikonon látható, hogy az Enceladuson körülbelül 19.58 km^3 pórustérfogat található 1 km^2 -es felszínrész alatt, $1,08 \text{ km}^3$ a Marson és csak $0,40 \text{ km}^3$ a Földön.

A 3.4 ábrán látható eredmények azzal magyarázhatók, hogy az Enceladusnak kisebb a felszíni gravitációs gyorsulása, mint a Földnek, ezért a felszín kivételével minden mélységben porózusabb. A 2.7 egyenlet segítségével ábrázoltuk a pórusok összfelületének mélység szerinti változását egy 1 km^2 -os felszín alatt a Föld, a Mars és az Enceladus esetében. Az eredményeket az alábbi logaritmikus skálán mutatjuk be.



3.5. ábra. Az Enceladus pórusfelülete 1 km^2 felszínrész alatt $1,37 \cdot 10^9 \text{ km}^2$. Ehhez az értékhez képest a Földnek és a Marsnak lokálisan sokkal kisebb a pórusfelülete, a számított értékek $5,11 \cdot 10^7 \text{ km}^2$. A pórusok felületének maximális értéke a Marson a számítások szerint $1,29 \cdot 10^8 \text{ km}^2$.

Az egyes testeken belüli pórusfelület mélység szerinti eloszlásának jobb megértése érdekében készítettük az alábbi ábrákat, amelyek a teljes pórusfelület térbeli koncentrációját mutatják be mélység szerint.



3.6. ábra. Az első diagram az Enceladus belsejében lévő pórusok térbeli, mélység szerinti koncentrációját ábrázolja. A második és a harmadik ábra a Földhöz, illetve a Marshoz tartozik. Az Enceladus esetében az ábrát a középponttól a felszínig ábráztuk, mivel itt közel sem olyan gyors a póruskompakció, mint a Földön vagy a Marson, ezért a pórusok egyenletesebben oszlanak el az egész égitestben. Lefelé haladva a pórusfelület csak 40 km mélységben éri el az összpórusfelület értékének 50%-át. Láthatjuk, hogy a Földön és a Marson belül a pórusok erősebben koncentrálnak a felszín közelében. Ez elsősorban a sekély kompakciós mélységnek köszönhető, amelyet a testek nagy tömegéből eredő nagy felszíni gravitáció okoz. Az összpórusfelület mintegy 50%-a 1000 m mélység felett található a két égitesten.

4. Diszkusszió

A 3. fejezetben bemutatott értékek jelentős különbségeket mutatnak az Enceladus és a vizsgált kőzetbolygók, a Föld és a Mars között, függőleges porozitáseloszlásukat tekintve. A kompakciós mélységet vizsgálva eredményeink azt mutatják, hogy az Enceladus még központi régióban is porózus marad, a minimum porozitás felső határa 3% körüli. Összehasonlításképpen: a Föld és a Mars kérgének porozitása 3% 3,78 km mélységben, illetve 7,30 km mélységben. Az Enceladus nem konszolidálódott belseje olyan szerkezetet eredményez, amely lehetővé teszi a folyékony víz hidrotermális áramlását. A laza és áteresztő belső szerkezet azt is támogatja, hogy a belső súrlódás révén erőteljesebb árapály-fűtés keletkezzen, ezért jelentősen hozzájárulhat a test belső fűtéséhez (Kang et al., 2022; Neumann and Kruse, 2019). A 3.6 ábrán látható eredmények alapján a Földön és a Marson a pórusok erősen koncentrálnak a felszín közelében, így a sekély kompakciós mélység alatt nincsenek pórusok, míg az Enceladuson nagy mélységben is még találhatók pórusok.

Ezért az Enceladuson a víz és a kőzet közötti kémiai reakciók lokális mértéke és az ásványi anyagok transzportja is intenzívebb lehet. Saját eredményeinket összehasonlítva az Enceladus belső szerkezetéről szóló legújabb kutatásokkal, azok a modellek, amelyek az Enceladus belsejét főleg konszolidálatlan, lazának és erősen töredezettként írják le (Choblet et al., 2017; Roberts, 2015), alapjaiban véve közelebb állnak az eredményeinkhez, mint azon modellek, amelyek többnyire vagy teljesen kompaktálódottnak írják le (Neumann and Kruse, 2019; Prialnik and Merk, 2008). Modellem egy tapasztalati értékekből származtatott empirikus egyenlet alkalmazásán alapul, azonban az általam eredményül kapott porozitási profil számos hasonlóságot mutat a Choblet et al. (2017) tanulmányában ismertetett porozitás profilhoz képest, amely model az Enceladus feltételezhető összetételét és mért sűrűségét használta kiindulási értékeként a porozitás számításához. A porozitás profilok közötti fő hasonlóság a nem kompaktálódott belső tér és a porozitás exponenciális csökkenési trendje a mélység függvényében. Az Enceladus összpórus térfogatának és összpórusfelületének maximális értéke megegyezik a gravitációs mérésekkel, feltételezve, hogy a pórusüregek vízzel vannak feltöltve és a kőzet összetétele valóban szilikát (Thomas et al., 2016; Čadež et al., 2016). Az összpórus térfogatot tekintve eredményeink összhangban vannak a meglévő irodalommal a Föld (Chen et al., 2020; Athy, 1930) és a Mars esetében is (Clifford et al., 2010; Michalski et al., 2018, 2013). Az égitesteken belüli pórusok térbeli eloszlására vonatkozó számításaink segítségével a helyi folyamatok, például az olyan kémiai reakciók, mint a serpentinizáció (olivin ásvány átalakulása hidratációval és hőleadással), könnyebben elemezhetők, mivel ezek intenzitását az összpórusfelület mennyisége és térbeli koncentrációja is befolyásolja (Moody, 1976).

A porozitás fontos szerepet játszik a bolygók geológiai evolúciójában és szerkezetében. A következőkben ismertetem számításaink néhány lehetséges következményét. A kis-, közepes- és nagyméretű bolygók porozitásfüggő geológiai és geofizikai folyamataival kapcsolatos további vizsgálatok során való használatát is tárgyalom. A folyadékáramlás a porozitás által befolyásolt számos folyamat egyike. Nagyobb porozitás értékekkel megnő a folyadékáramlás léptéke is, ami nagyobb mennyiségű oldott ásványianyag-transzportot eredményez, és támogatja a lokálisan felszabaduló belső hő (például lokalizált radioaktív elemek vagy differenciálódás által termelt maghő) homogén eloszlását. A testen belüli ásványtranszport (oldott vagy kristályosodott formában) számos kémiai reakcióhoz járul hozzá, amelyek a belső tér összetételét és szerkezetét alakítják. A pórusfelület mennyisége is befolyásolja a belső szerkezetet, nagyobb pórusfelülettel megnövekszik az ásványokon a reaktív felület. A folyadékáramlással, pórusfelülettel és ásványtranszporttal kapcsolatos

lehetőségek befolyásolhatják a köpeny- és kéregmetaszomatizmusához rendelkezésre álló anyagokat (Carter et al., 2021), valamint a reológiai tulajdonságokat módosító ásványokat (Azuma et al., 2014), részben befolyásolva a sekély felszín alatti régiók redox állapotát is (Lichtenberg, 2021) számos további következmény mellett. A vízzel kapcsolatos reakciók akadályozva lehetnek a nagyobb testekben a bennük végbemenő kisebb mértékű folyadékáramlás miatt – ellentétben a kisebb testekkel, ahol nem történt differenciálódás és kompaktáció.

Az abiogenezissel - az egyszerű szervesetlen molekulák és az élet közötti átmenet folyamataival - kapcsolatos tanulmányok szerint jelentős a valószínűsége annak, hogy a kemiozmózis - az ionok mozgása egy féligáteresztő membránon keresztül, az elektrokémiai gradiensek mentén (Bada et al., 2007) - alapvető szerepet játszott a korai Föld óceánjaiban található egyszerű szerves struktúrák kialakulásában és evolúciójában (Bada et al., 2007). A korai sejteknek áteresztő membránja lehetett, és a természetben előforduló redox gradiens táplálhatta őket magas hidrotermális aktivitású helyek közelében (Holm and Andersson, 2005). Az ilyen tevékenységek az Enceladuson is jelen vannak, amint azt a holdon végzett legújabb tanulmányok mutatják, (Waite et al., 2017). Ezt a folyamatot az óceánfenék kőzetének porozitása is befolyásolja, így számításaink megalapozhatják a további kutatásokat, amelyek lehetséges célja a bolygók lakhatósági potenciálját befolyásoló geológiai tényezők vizsgálata.

5. Összegzés

Ebben a munkában bemutatjuk a kísérletileg levezetett porozitás-egyenletek alkalmazását egy közepes méretű jeges holdon, az Enceladuson. Ezeket az eredményeket összehasonlítottuk a Föld és a Mars számított porozitás értékeivel, hogy általános képet kapjunk a felszíni gravitáció és a bolygósugár hatásáról a bolygótestek porozítására. Ezzel a módszerrel a póruskompakciós mélység maximumát (azaz a pórusok teljes záródását) a Föld esetében 4,5 km-nek, a Marson pedig 10,5 km-re becsültük, míg az Enceladus még a középpontjában sem kompaktálódik teljesen, ott is megőriz egy 3%-os porozitást. Ekkora porozitással a Mars 7,3 km-es, a Föld pedig 2,7 km-es mélységben rendelkezik. A számításaink szerint az Enceladus, a Föld és a Mars összpórustérfogata $1,58 \cdot 10^7 km^3$, $2,16 \cdot 10^8 km^3$, illetve $1,62 \cdot 10^8 km^3$, amely értékek nagyságrendileg azonos mértéket jelentenek a folyadék megtartási kapacitására az Enceladus, a Föld és a Mars belsejében.

Kiszámítottuk a pórustérfogat és a pórusfelület értékeit egy adott $1 km^2$ felület alatt is mindhárom égitestre. Az eredmény az Enceladus esetében $18,62 km^3$, $0,99 km^3$ a Marson és $0,25 km^3$ a Földön – ez azt jelzi, hogy az Enceladuson tetszőleges felszínrész alatt nagyobb mennyiségű pórus található, mint a Földön vagy a Marson. Az Enceladus pórusfelülete $1,53 \cdot 10^7 km^2$ adott $1 km^2$ felület alatt, míg a Földön $4,43 \cdot 10^5 km^2$, a Marson pedig $1,26 \cdot 10^6 km^2$ az érték modellünk szerint. Számításaink eredményei összhangban vannak azokkal a szerkezetfejlődési modellekkel, amelyek különböző kezdeti paramétereket feltételeznek a porozitás kiszámításához és laza, homokkupac-szerű belső szerkezetet eredményeznek (Choblet et al., 2017; Roberts, 2015). Számításaink szerint Neumann and Kruse (2019) és Malamud and Prialnik (2016) eredményei alulbecsülték az Enceladus porozitással kapcsolatos értékeit. Ennek az eltérésnek az lehet az oka, hogy a szerzők által választott közettípus kevésbé viszkózus és gyorsabban kompaktálódik, mint az Enceladus ebben a modellben feltételezett kőzete.

Az eredményül kapott porózus belső tér megbecslése hozzájárul az Enceladus szerkezetének megértéséhez, mivel a porozitás mind a belső, mind a felszíni folyamatok szempontjából releváns. Például a porózus magban lévő hidrotermális áramlás hozzájárulhat a megfigyelt aszimmetrikus jégvastagsághoz a hold felszínén, illetve gyorsíthatja is a belső hő elvesztését (Travis and Schubert, 2015; Roberts, 2015). A porozitás az Enceladuson belüli geokémiai folyamatokat is befolyásolja, mely hatás jövőbeli kutatásaihoz is hozzájárulnak az eredményeink. A szakirodalomban található elméleti evolúciós modellek (Choblet et al.,

2017; Roberts, 2015) eredményei és a tapasztalati úton leírt egyenletek közötti koherencia elősegíti e módszerek alkalmazását a jövőben a bolygók és holdak porozitás szerkezetének feltárásában.

Hivatkozások

- Lawrence Ferdinand Athy. Density, porosity, and compaction of sedimentary rocks. *Aapg Bulletin*, 14(1):1–24, 1930.
- Shintaro Azuma, Ikuo Katayama, and Tomoeiki Nakakuki. Rheological decoupling at the moho and implication to venusian tectonics. *Scientific reports*, 4(1):1–5, 2014.
- Jeffrey L Bada, Bruce Fegley Jr, Stanley L Miller, Antonio Lazcano, H James Cleaves, Robert M Hazen, and John Chalmers. Debating evidence for the origin of life on earth. *Science*, 315(5814):937–939, 2007.
- Ondřej Čadek, Gabriel Tobie, Tim Van Hoolst, Marion Massé, Gaël Choblet, Axel Lefèvre, Giuseppe Mitri, Rose-Marie Baland, Marie Běhouňková, Olivier Bourgeois, et al. Enceladus’s internal ocean and ice shell constrained from cassini gravity, shape, and libration data. *Geophysical Research Letters*, 43(11):5653–5660, 2016.
- Elliot J Carter, Brian O’Driscoll, Ray Burgess, and Patricia L Clay. Multi-stage fluid infiltration and metasomatism in supra-subduction zone mantle: evidence from halogens and noble gases in the leka ophiolite complex, norway. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 307:258–280, 2021.
- Jianxin Chen, Xingxing Kuang, and Chunmiao Zheng. An empirical porosity–depth model for earth’s crust. *Hydrogeology Journal*, 28(7):2331–2339, 2020.
- Gaël Choblet, Gabriel Tobie, Christophe Sotin, Marie Běhouňková, Ondřej Čadek, Frank Postberg, and Ondřej Souček. Powering prolonged hydrothermal activity inside enceladus. *Nature Astronomy*, 1(12):841–847, 2017.
- Stephen M Clifford. A model for the hydrologic and climatic behavior of water on mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 98(E6):10973–11016, 1993.
- Stephen M Clifford, Jeremie Lasue, Essam Heggy, Joséphine Boisson, Patrick McGovern, and Michael D Max. Depth of the martian cryosphere: Revised estimates and implications for the existence and detection of subpermafrost groundwater. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 115(E7), 2010.
- Damien Daval, Gaël Choblet, Christophe Sotin, and François Guyot. Theoretical considerations on the characteristic timescales of hydrogen generation by serpentinization reactions on enceladus. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 127(2):e2021JE006995, 2022.

- Jon M Friedrich, Robert J Macke, Douglas P Wignarajah, Mark L Rivers, Daniel T Britt, and Denton S Ebel. Pore size distribution in an uncompacted equilibrated ordinary chondrite. *Planetary and Space Science*, 56(7):895–900, 2008.
- Nils G Holm and Eva Andersson. Hydrothermal simulation experiments as a tool for studies of the origin of life on earth and other terrestrial planets: a review. *Astrobiology*, 5(4):444–460, 2005.
- Hsiang-Wen Hsu, Frank Postberg, Yasuhito Sekine, Takazo Shibuya, Sascha Kempf, Mihály Horányi, Antal Juhász, Nicolas Altobelli, Katsuhiko Suzuki, Yuka Masaki, et al. Ongoing hydrothermal activities within enceladus. *Nature*, 519(7542):207–210, 2015.
- Wanying Kang, John Marshall, Tushar Mittal, and Suyash Bire. Ocean dynamics and tracer transport over the south pole geysers of Enceladus. *MNRAS*, 517(3):3485–3494, December 2022. doi: 10.1093/mnras/stac2882.
- Mickaële Le Ravalee and Yves Guéguen. Permeability models for heated saturated igneous rocks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B12):24251–24261, 1994.
- Tim Lichtenberg. Redox hysteresis of super-earth exoplanets from magma ocean circulation. *The Astrophysical Journal Letters*, 914(1):L4, 2021.
- Robert J Macke, Guy J Consolmagno, and Daniel T Britt. Density, porosity, and magnetic susceptibility of carbonaceous chondrites. *Meteoritics & Planetary Science*, 46(12):1842–1862, 2011.
- Uri Malamud and Dina Prialnik. A 1-d evolutionary model for icy satellites, applied to enceladus. *Icarus*, 268:1–11, 2016.
- Joseph R Michalski, Tullis C Onstott, Stephen J Mojzsis, John Mustard, Queenie HS Chan, Paul B Niles, and Sarah Stewart Johnson. The martian subsurface as a potential window into the origin of life. *Nature Geoscience*, 11(1):21–26, 2018.
- JR Michalski, J Cuadros, PB Niles, J Parnell, A Deanne Rogers, and SP Wright. Groundwater activity on mars and implications for a deep biosphere, nat, 2013.
- Judith B Moody. Serpentinization: a review. *Lithos*, 9(2):125–138, 1976.
- Wladimir Neumann and Antonio Kruse. Differentiation of enceladus and retention of a porous core. *The Astrophysical Journal*, 882(1):47, aug 2019. doi: 10.3847/1538-4357/ab2fcf.

- J Papike, F N Hodges, AE Bence, Maryellen Cameron, and JM Rhodes. Mare basalts: Crystal chemistry, mineralogy, and petrology. *Reviews of Geophysics*, 14(4):475–540, 1976.
- Dina Prialnik and Rainer Merk. Growth and evolution of small porous icy bodies with an adaptive-grid thermal evolution code. I. Application to Kuiper belt objects and Enceladus. *Icarus*, 197(1):211–220, September 2008. doi: 10.1016/j.icarus.2008.03.024.
- Dina Prialnik and Rainer Merk. Growth and evolution of small porous icy bodies with an adaptive-grid thermal evolution code: I. application to kuiper belt objects and enceladus. *Icarus*, 197(1):211–220, 2008.
- James H Roberts. The fluffy core of enceladus. *Icarus*, 258:54–66, 2015.
- Marc Rovira-Navarro, Richard F Katz, Yang Liao, Wouter van der Wal, and Francis Nimmo. The tides of enceladus’ porous core. *Journal of Geophysical Research: Planets*, page e2021JE007117, 2022.
- Gerald Schubert, John D. Anderson, Bryan J. Travis, and Jennifer Palguta. Enceladus: Present internal structure and differentiation by early and long-term radiogenic heating. *Icarus*, 188(2):345–355, June 2007. doi: 10.1016/j.icarus.2006.12.012.
- Yasuhito Sekine, Takazo Shibuya, Frank Postberg, Hsiang-Wen Hsu, Katsuhiko Suzuki, Yuka Masaki, Tatsu Kuwatani, Megumi Mori, Peng K Hong, Motoko Yoshizaki, et al. High-temperature water–rock interactions and hydrothermal environments in the chondrite-like core of enceladus. *Nature Communications*, 6(1):1–8, 2015.
- PC Thomas, R Tajeddine, MS Tiscareno, JA Burns, J Joseph, TJ Lored, P Helfenstein, and C Porco. Enceladus’s measured physical libration requires a global subsurface ocean. *Icarus*, 264:37–47, 2016.
- BJ Travis and G Schubert. Keeping enceladus warm. *Icarus*, 250:32–42, 2015.
- Fabienne Trolard, Simon Duval, Wolfgang Nitschke, Bénédicte Ménez, Céline Pisapia, Jihaine Ben Nacib, Muriel Andréani, and Guilhem Bourrié. Mineralogy, geochemistry and occurrences of fougérite in a modern hydrothermal system and its implications for the origin of life. *Earth-Science Reviews*, 225:103910, 2022.
- J Hunter Waite, Christopher R Glein, Rebecca S Perryman, Ben D Teolis, Brian A Magee, Greg Miller, Jacob Grimes, Mark E Perry, Kelly E Miller, Alexis Bouquet, et al. Cassini

finds molecular hydrogen in the enceladus plume: evidence for hydrothermal processes.
Science, 356(6334):155–159, 2017.