

Univerzita Karlova  
Přírodovědecká fakulta  
Katedra fyzické geografie a geoekologie

Studijní program: Geografie  
Studijní obor: Geografie a kartografie



Jan KLÍMA

# Morfologické indicie činnosti vody na Marsu

Bakalářská práce

Praha 2018

Vedoucí práce: prof. RNDr. Jan Kalvoda, DrSc.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vytvořil samostatně a že jsem všechny použité prameny řádně citoval. Tato práce ani její podstatná část nebyla použita k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze dne 30. července 2018

Jan Klíma

Děkuji panu prof. RNDr. Janu Kalvodovi, DrSc. za vedení mé bakalářské práce, cenné rady, připomínky a jeho pečlivý přístup, se kterým se mi věnoval.

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

## **Téma práce:**

Morfologické indicie činnosti vody na Marsu

## **Náplň a cíle práce:**

Cílem práce je na základě studia odborné literatury předložit přehled o současném výzkumu morfologických indicií činnosti vody na povrchu Marsu, tyto projevy vyhodnotit a charakterizovat.

## **Použité pracovní metody:**

systematické studium odborné literatury se zaměřením na výběr dostupných a kvalitních údajů a na jejich morfologickou interpretaci

## **Zájmové území:**

planeta Mars

## **Datové zdroje:**

odborné publikace a internetové zdroje

## **Datum zadání:**

3. listopadu 2017

Jan Klíma

prof. RNDr. Jan Kalvoda, DrSc.

Podpis studenta

Podpis vedoucího práce

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce se zabývá morfologickými indiciemi činnosti vody na povrchu Marsu. V práci jsou shrnuty a charakterizovány útvary na povrchu planety, které v minulosti vytvořila voda v plynném, kapalném nebo pevném skupenství. Na základě odborných článků a odborných publikací byla vytvořena rešeršní práce, která podává přehled indicií na povrchu Marsu, které svědčí o přítomnosti vody na této planetě. Zabývá se také informacemi o výskytu vody na Marsu v minulosti. V současné době jsou projevy výskytu vodou vytvořených útvarů na povrchu planety velmi průkazné. V práci jsou tak charakterizovány údolní sítě, rozsáhlá pánev na severní polokouli, jenž je pozůstatkem dávného oceánu, krátery, v nichž byla v minulosti jezera, voda vázaná jako pevná složka polárních čepiček a řada dalších projevů. U těchto povrchových tvarů je popsán jejich vývoj a jsou lokalizovány pomocí přehledné mapy povrchu. V předložené studii je tedy zpracován komplexní pohled na morfologické projevy výskytu a činnosti vody na Marsu.

## **ABSTRACT**

Morphological indications of water activity on Mars

Bachelor thesis deals with morphological indications of water activity on the Mars surface. In the papers are summarized and characterized the structures and forms on the surface of planet Mars, which originated in the past by water in gaseous, liquid or solid form. Based on research articles and expert studies, a bachelor thesis has been composed. It provides the summary of shapes on the Mars surface, which were created by water activity. There are many water formed parts of the Martian surface nowadays: valley networks, an extensive basin in the northern hemisphere, which is the remnant of antient ocean, craters lakes in the past, water bound as a solid component of polar caps and many others. The development of water-formed shapes of the Martian surface is described, and these shapes are also located on a brief map. In presented study is elaborated a comprehensive and complex view to morphological indications of the water activity on Mars.

# OBSAH BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

## SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A PŘÍLOH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>9</b>
	1.1 TÉMA PRÁCE .....	9
	1.2 CÍLE PRÁCE .....	11
<b>2</b>	<b>PŘÍRODNÍ PROSTŘEDÍ PLANETY MARS</b>	<b>12</b>
	2.1 STRATIGRAFICKÁ OBDOBÍ MARSU .....	13
	2.2 ATMOSFÉRA MARSU .....	16
<b>3</b>	<b>MATERIÁLOVÉ INDICIE ČINNOSTI VODY NA POVRCHU MARSU</b>	<b>21</b>
	3.1 MINERÁLY UTVÁŘENÉ PŮSOBENÍM ČINNOSTI VODY NA MARSU .....	21
	3.2 PROJEVY EXISTENCE VODY V ATMOSFÉŘE .....	24
<b>4</b>	<b>INDICIE ČINNOSTI VODY NA POVRCHOVÝCH TVARECH</b>	<b>26</b>
	4.1 MORFOLOGICKÉ PROJEVY VÝSKYTU OCEÁNŮ .....	26
	4.2 MORFOLOGICKÉ PROJEVY VÝSKYTU JEZER .....	31
	4.3 MORFOLOGICKÉ PROJEVY ČINNOSTI LEDU .....	38
	4.4 MORFOLOGICKÉ PROJEVY ČINNOSTI TEKOUČÍ VODY .....	45
<b>5</b>	<b>DISKUZE</b>	<b>55</b>
<b>6</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>60</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b>	<b>62</b>
	<b>PŘÍLOHY</b>	<b>69</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A PŘÍLOH

- Obrázek 1: Stratigrafická období planety Mars a jejich přibližná datace
- Obrázek 2: Vytváření povrchu Marsu během hlavních stratigrafických období
- Obrázek 3: Vrstvy atmosféry na Marsu
- Obrázek 4: Porovnání atmosféry Marsu a Země
- Obrázek 5: Ukázka snímků vybraných minerálů vytvořených za přítomnosti vody
- Obrázek 6: Severní polokoule Marsu
- Obrázek 7: Hraniční linie deprese na severní polokouli Marsu
- Obrázek 8: Sedimenty v oblasti Arabia
- Obrázek 9: Příklad dna jezer vzniklých na Marsu
- Obrázek 10: Konglomeráty v kráteru Gale
- Obrázek 11: Kráter Gale
- Obrázek 12: Jezero Eridania
- Obrázek 13: Tvorba a minerální složení jezera Eridania
- Obrázek 14: Usazeniny na dně kráteru Eridian
- Obrázek 15: Polární ledová čepička na severní polokouli Marsu v průběhu léta
- Obrázek 16: Terén vytvořený ledem
- Obrázek 17: Morfologické indicie činnosti ledovců na povrchu Marsu v oblasti Ismenius Lacus, včetně morénových akumulací
- Obrázek 18: Skalní ledovce na Marsu
- Obrázek 19: Topografie ledovcových morén v oblasti Ismenius Lacus
- Obrázek 20: Polygonální útvary na povrchu Marsu
- Obrázek 21: Údolní síť v oblasti Thaumasia
- Obrázek 22: Říční síť v oblasti Arabia Terra
- Obrázek 23: Údolní síť v oblasti Candor Chasma
- Obrázek 24: Odtokové kanály v oblasti Echus Chasma
- Obrázek 25: Erozní stružky v oblasti Argyre Planitia

Obrázek 26: Stružky na okraji kráteru Newton

Obrázek 27: Deltové útvary na okraji kráteru Eberswalde

Obrázek 28: Deltové útvary v oblasti Margaritifer Sinus quadrangle

Obrázek 29: Valles Marineris

Obrázek 30: Sedimentární horniny v pánvi Hellas

Obrázek 31: Časové schéma morfologických projevů výskytu a činnosti vody na Marsu

Tabulka 1: Přehledná tabulka fyzikálních charakteristik Marsu a Země

Tabulka 2: Morfologické indicie činnosti vody na povrchu Marsu

Příloha 1: Mapa povrchu Marsu

Příloha 2: Základní orografické členění povrchu Marsu



# 1 ÚVOD

## 1.1 TÉMA PRÁCE

Průzkum výskytu vody v na Marsu je v současné době velmi aktuální téma. Již při počátcích studia těles Sluneční soustavy lidé pozorovali určitou podobnost mezi Zemí a Marsem, a postupně byla planeta terestrického typu Mars označena jako nejvhodnější blízké těleso pro výskyt mimozemského života. Podobnost mezi oběma planetami spočívá např. v době a podmínkách jejich vzniku, v podobném sklonu osy rotace a její rychlosti, obě mají podobnou vnitřní stavbu členěnou na jádro, plášť a kůru, a také mají plynou atmosféru (tabulka 1). Jednou z podmínek pravděpodobnosti výskytu primitivních forem života je výskyt vody. V raných etapách výzkumu možného výskytu vody na Marsu byly ovšem předpoklady, dohady nebo hypotézy založené výhradně na pozorování povrchu této planety.

První důkaz, že kapalná voda byla v minulosti na Marsu přítomna, přinesl v roce 1971 projekt NASA Mariner 9 (Sheehan 1996). Průzkum se soustředil na oblast Valles Marineris (příloha 1), kde byla objevena síť koryt a kaňonů. V této oblasti byly identifikovány i projevy vodní eroze a sedimenty uložené podobně, jako v oblastech vytvářených činností vody na Zemi. Uvedené poznatky podpořily dřívější předpoklady, podle kterých se voda na Marsu vyskytovala. Tyto hypotézy v roce 1975 potvrdily mise Viking 1 a 2 (Sheehan 1996), při kterých byly během geologického průzkumu objeveny druhy minerálů, které vznikají za přítomnosti vody. Síť kaňonů a koryt pak byly zjištěny i v dalších oblastech planety. Velmi přesvědčivý důkaz o existenci vody na Marsu přinesl emisní spektrometr Mars Global Surveyor v roce 1996 (Sheehan 1996). Měřením tímto spektrometrem bylo možné detekovat minerální složení Marsu, včetně potvrzení přítomnosti vodou formovaných minerálů. Byla také provedena fotodokumentace povrchu této planety a na svazích některých kráterů

byly identifikovány stružky formované činností vody (Sheehan 1996). V roce 2003 byla pomocí spektrometru Gama Ray Spectrometr na palubě sondy Mars Odyssey provedena analýza svrchní části kůry Marsu (Silverman 2017). Bylo zjištěno, že pod povrchem se vyskytuje voda v pevném skupenství. V roce 2008 byla v rámci projektu Phoenix využita nová technika průzkumu povrchu, kterou bylo možné provést také analýzu odebraných vzorků hornin (Silverman 2007). Ve vzorku odebraného materiálu byla zjištěna přítomnost ledu, který postupně sublimoval. Během povrchového průzkumu Marsu byly také objeveny slané roztoky, což potvrdilo možnost výskytu látek v kapalném stavu. Další podrobnější údaje o chemickém složení hornin na povrchu Marsu pak přinesla vozítka Spirit a Curiosity v roce 2009. Pomocí odebraných vzorků a pořízené fotodokumentaci byly zpřesněny dosavadní informace o projevech vody na povrchu planety. V roce 2010 polychromatická kamera HIRISE na palubě Mars Reconnaissance Orbiter prokázala, že i atmosféra Marsu obsahuje stopové množství vody, a že povrch planety byl v minulosti formován i atmosférickými srážkami. Série snímků také ukázaly další tvary povrchu, které odkazují na přítomnost vody (Silverman 2017).

Od sedmdesátých let 20. století je problematika vody na Marsu téma, kterému se věnuje několik špičkových vědeckých pracovišť, včetně NASA. Do současné doby bylo provedeno velké množství výzkumů (např. Mars Science Laboratory v roce 2011, Mars Atmosphere and Volatile Evolution v roce 2013 atd.), které dokazují přítomnost vody v různých podobách: přítomné morfologické útvary formované vodou pozorované na povrchu, analyzované vzorky minerálů vzniklé za přítomnosti vody nebo objevený podpovrchový led a atmosférické vodní páry (Silverman 2017).

## **1.2 CÍLE PRÁCE**

Cílem bakalářské práce je na základě studia odborné literatury předložit přehled o současném stavu výzkumů morfologických indicií činnosti vody na povrchu Marsu, tyto projevy vyhodnotit a charakterizovat. Pracovní metodou je uspořádání dalších poznatků o tomto tématu a jejich morfologická interpretace. Projevy činnosti vody na Marsu jsou jednotlivě lokalizovány, charakterizovány a jsou zařazeny do historického kontextu vývoje přírodních podmínek planety. Uvedené morfologické interpretace budou také doplněny vhodným a názorným obrazovým materiálem.

## 2 PŘÍRODNÍ PROSTŘEDÍ PLANETY MARS

Mars je planetou terestrického typu, jejíž vznik proběhl přibližně v období kolem 4,5 miliard let (Tanaka 1986). Podobně jako ostatní terestrické planety Sluneční soustavy vznikl Mars akrecí prachově-plynného disku. Srážkami prachových částic se začala formovat větší tělesa, která dále akrecí rostla, a vznikla tak protoplaneta. Po zformování protoplanety Marsu byl povrch utvářen především dopadajícím materiálem (Carr et. al. 2011). Doba, během níž docházelo k formování částí planety a její rozdělení na 3 základní složky, a to na jádro, plášť a kůru, je odhadována na několik desítek milionů let. Mars má tedy v tomto smyslu podobnou základní stavbu jako Země (Tanaka 1986).

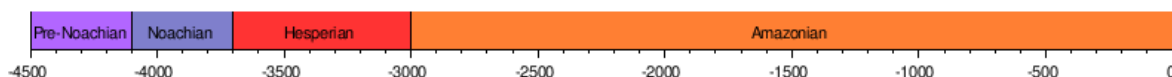
Tabulka 1: Přehledná tabulka fyzikálních charakteristik Marsu a Země  
podle Žížalová (2016)

<b>Fyzikální charakteristika</b>	<b>Mars</b>	<b>Země</b>
Rovňkový průměr (km)	6972,4	12756,27
Polární průměr (km)	6752,4	12713,5
Zploštění (bezrozměrné)	0,00589	0,003352861
Plocha povrchu (km <sup>2</sup> )	$1,4437 \cdot 10^{18}$	$5,1006 \cdot 10^{18}$
Objem (km <sup>3</sup> )	$16,318 \cdot 10^{10}$	$1,0832 \cdot 10^{12}$
Hmotnost (kg)	$6,4185 \cdot 10^{23}$	$5,9736 \cdot 10^{24}$
Průměrná hustota (g·cm <sup>-3</sup> )	3,933	5,515
Gravitace na rovníku (m·s <sup>-2</sup> )	3,69	9,807
Sklon rotační osy	25,2 °	23,5 °
Albedo	0,15	0,367
Délka rotace	24 h 37 min	23 h 56 min
Rychlost rotace (km·h <sup>-1</sup> )	868,22	1674,4
Úniková rychlost (km·s <sup>-1</sup> )	5,03	11,19
Průměrná povrchová teplota (°C)	-63	15
Maximální povrchová teplota (°C)	30	58
Minimální povrchová teplota (°C)	-140	-88

## 2.1 STRATIGRAFICKÁ OBDOBÍ MARSU

Vývoj povrchu Marsu lze rozčlenit na čtyři základní stratigrafická období. Je to Pre – Noachian, Noachian, Hesperian a Amazonian (Carr et. al. 2011).

Obrázek 1: Stratigrafická období planety Mars a jejich přibližná datace



Zdroj: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Mars\\_\(planeta\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Mars_(planeta)), revidováno s (Carr. et. al. 2011)

### Pre – Noachian

V prvním stádiu vývoje povrchu planety (od jejího vzniku do 4,1 miliardy let před současností) docházelo k formování raného povrchu (Carr et. al. 2011). Podle předpokladu na povrchu protoplanety panovaly velmi vysoké teploty, které neumožňovaly výskyt vody v kapalném stádiu, ale voda se mohla vyskytovat pouze jako plynná složka rané atmosféry.

### Noachian

Pro toto období (4,1 miliardy let až 3,7 miliardy let před současností) bylo typické silné bombardování povrchu planety cizími tělesy a vznik velkých kráterů (Tanaka 1986). Vznik kráterů se datuje především do období před 4,1 miliardami let. Pro období Noachian je také typická silná vulkanická činnost. Vulkanismus byl jeden z hlavních činitelů, které v rané historii planety pomáhaly utvářet prvotní atmosféru, která byla velmi hustá složená převážně z oxidu uhličitého (Carr et. al. 2011).

Období Noachian je označováno jako nejpříhodnější pro výskyt vody v kapalném stavu (Carr et. al. 2011). V období Noachianu se na povrchu planety vyskytovaly souvislé vodní plochy podobné zemským oceánům, ale i vodní toky, které formovaly povrch planety (Tanaka 1986). Tyto rozsáhlé vodní plochy přispěly především k utvoření rozsáhlých pánví, které lze na povrchu planety identifikovat i v současné době

(Carr et. al. 2011). Koncem Noachianu ale začalo docházet k postupnému útlumu vulkanismu a velká část projevů kapalné vody na povrchu planety byla do značné míry potlačena (Tanaka 1986). Velké záplavy se vyskytovaly jen epizodicky a právě do této doby lze z hlediska vzniku zařadit rozsáhlý systém kaňonů, který byl epizodickými rozlevy vody vytvořen (Carr et. al. 2011).

### **Hesperian**

Pro období Hesperianu (3,7 miliardy let až 3 miliardy let před současností) je typický doznívající vulkanismus. V období Hesperian se vyskytovala rozsáhlá lávová pole, která vznikla výlevy lávy při vulkanické činnosti, která se postupně snižovala (Tanaka 1986). Velmi hustá atmosféra, která se vyskytovala v období Noachianu, postupně řídla, což mělo podstatný vliv na výskyt vody na povrchu planety (Carr et. al. 2011). Jelikož atmosféra nadále řídla, docházelo k postupnému snižování teploty na povrchu planety a Hesperian tedy nelze označit jako vhodné období pro výskyt vody v kapalném stavu na povrchu planety. Voda v tomto období přecházela do pevného stavu. Byly pravděpodobně vytvořeny rozsáhlé plochy ledu. Další možností byl únik vody do atmosféry, která byla ale nedostatečně hustá, a vodní páry se tak dostávaly do kosmického prostoru (Carr et. al. 2011). Na povrchu Marsu však lze i přesto identifikovat ojedinělé systémy kaňonů, které pocházejí právě z tohoto období. Kapalná voda v tomto období se pravděpodobně omezila na doprovodný jev probíhající vulkanické činnosti, která zahřívala ledové masy a tající voda z nich tak erodovala povrch planety (Tanaka 1986).

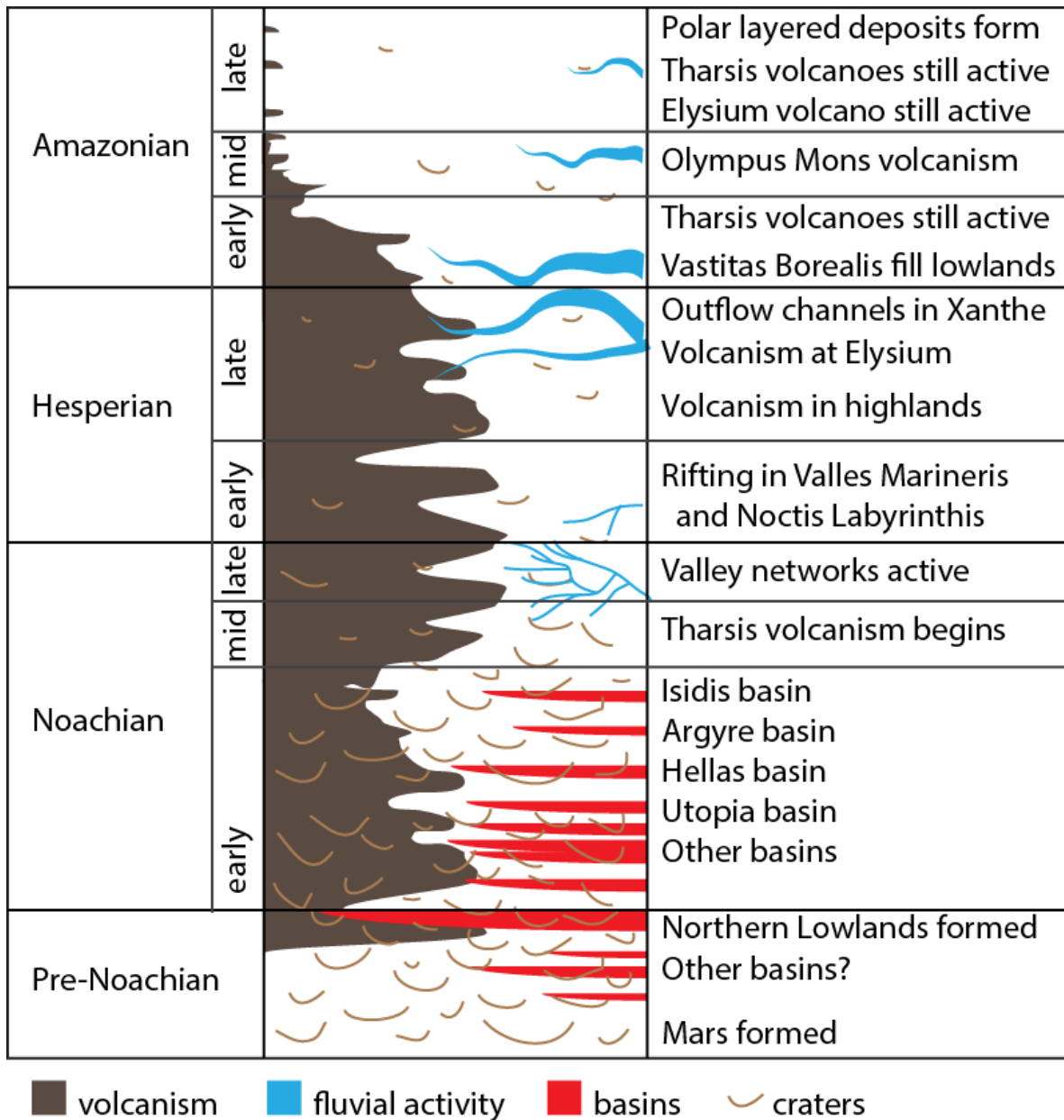
### **Amazonian**

Pro období Amazonianu (před 3 miliardami let až současnost) je typické další ochlazování planety, řidnutí atmosféry a postupný útlum vulkanické

činnosti (Tanaka 1986). V tomto období Mars prakticky ztratil atmosféru, jejíž hustota se postupně snížila na velmi nízkou hodnotu, která se do současnosti o mnoho nezměnila (hustota atmosféry Marsu je v současné době asi 150 krát nižší než hustota atmosféry Země). Tyto podmínky byly ovšem nevhodné pro výskyt vody v kapalném stavu. Pro nestálost a nízkou hustotu plynů atmosféra nebyla schopná vodní páry ve větší míře udržet, a proto byly většinou uvolněny do meziplanetárního prostoru (Carr et. al. 2011). Vulkanická činnost se snížila oproti období Hesperianu přibližně desetkrát a kaňony vzniklé v tomto období byly převážně utvořeny činností vody. V kaňonovitých údolích byly zjištěny velké sesuvy hornin. Výskyt vody v kapalném stavu tedy není vyloučen, ale pravděpodobně se vyskytovala pouze ve v omezeném množství (Carr et. al. 2011).

Klimatické podmínky na Marsu během období Amazonian byly velmi chladné, a proto se voda vyskytovala většinou v pevném skupenství. Nejvýznamnější činností, která formovala povrch, byla činnost ledových mas. Povrch byl v tomto období formován především pohybujícími se ledovými masami, které reliéf převážně zarovnávaly (Tanaka 1986). Z tohoto období byly nalezeny především usazeniny na svazích vyhaslých sopek. O činnosti ledovců také svědčí systém uložení hornin v některých oblastech Marsu. Činnost ledovců byla však omezena pouze na oblasti, které vykazovaly dostatečný sklon, který by vzhledem k nižší tíži oproti Zemi umožnil pohyb rozsáhlých ledových bloků. Systém sedimentů v údolích vytvořených v období Amazonianu také ukazuje na pravděpodobnou činnost ledových hmot (Carr et. al. 2011).

Obrázek 2: Vytváření povrchu Marsu během hlavních stratigrafických období



Zdroj: <http://www.planetary.org/blogs/emily-lakdawalla/2013/10251246-noachian-hesperian-amazonian.html>

## 2.2 ATMOSFÉRA MARSU

Atmosféra Marsu se stala v období Amazonianu tak řídkou (její tlak u povrchu se pohyboval mezi 600 až 1000 Pa), že již neprobíhala tepelná výměna mezi povrchem planety a spodní vrstvou atmosféry (Johnson et. al. 1965). Tato hustota atmosféry byla cca asi 150 krát nižší než hustota atmosféry Země, což odpovídá přibližně současné hustotě

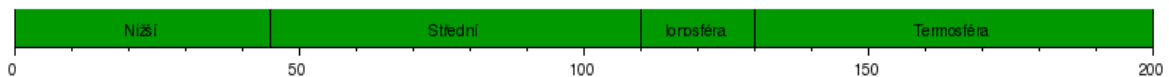


atmosféry 30 kilometrů nad zemským povrchem. Přírodní podmínky na Marsu se vyznačují především velkými rozdíly teplot mezi dnem a nocí (rozdíl i o více než 150 °C). Hlavním důvodem stálého zředování atmosféry Marsu, je sluneční vítr a jeho neustálé působení na atmosféru planety. Působení slunečního větru a dalšího kosmického záření způsobuje štěpení molekul v atmosféře, které se rozpadají na jednotlivé atomy, které jsou následně unášeny do meziplanetárního prostoru. Tento proces je díky nízké gravitaci Marsu velmi účinný (Zurek et. al. 1992).

### Členění atmosféry

V členění atmosféry Marsu lze nalézt částečnou podobnost s členěním atmosféry Země. Atmosféra Marsu je rozdělována na čtyři části: nižší vrstva, střední vrstva, termosféra zahrnující ionosféru a exosféra (Johnson et. al. 1965).

Obrázek 3: Vrstvy atmosféry na Marsu



Zdroj: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Atmosf%C3%A9ra\\_Marsu](https://cs.wikipedia.org/wiki/Atmosf%C3%A9ra_Marsu), revidováno s (Johnson et. al. 1965)

### Nižší vrstva atmosféry

Nižší vrstva atmosféry je nejnižší a zároveň nejteplejší vrstvou atmosféry. Jako jediná část je v malé míře ovlivněna výměnou tepla s povrchem planety (Owen et. al. 1977). Nižší vrstva atmosféry je klasifikována jako oblast do 45 kilometrů nad povrchem planety a vyznačuje se největším výskytem atmosférických jevů. Mezi nejvýraznější jevy, projevující se v nižší vrstvě atmosféry, jsou extrémně silné prachové bouře, jejichž vznik je velmi podobný podmínkám na Zemi. Planeta Mars má stejně jako Země skloněnou osu rotace, a tak dochází na pólech planety ke střídání polárního dne a noci (Zurek et. al. 1992). Atmosféra Marsu je velmi řídká, a proto jsou zejména v polárních oblastech výkyvy teplot extrémní.

Během polární noci se oblasti pólů silně ochlazují a dochází tak ke změně tlaku vůči rovníkovým oblastem. Tyto větry díky podmínkám panujícím v nižší vrstvě atmosféry mohou dosahovat velmi vysokých rychlostí (cca  $95 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ) a jsou tak schopny unášet prachové, ale i větší částice ve značném množství na dlouhé vzdálenosti (Zurek et. al. 1992).

V současné atmosféře Marsu je zastoupena také vodní pára. Větry proudící mezi polárními oblastmi a rovníkem jsou tak silné, že mohou vodní páru v atmosféře transportovat na velké vzdálenosti. Takto jsou vytvářeny shluky vodních par, které lze přirovnat k oblakům typu cirrus v atmosféře Země (Owen et. al. 1977).

Průměrná teplota nižší vrstvy atmosféry je  $-56 \text{ }^\circ\text{C}$ . V některých místech může teplota při povrchu Marsu dosáhnout i nad bod mrazu. Byly dokonce zaznamenány i teploty dosahující  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  (Owen et. al. 1977). Na celé planetě je podstatně nižší celkový tlak než na Zemi a voda se zde vypařuje při  $10^\circ\text{C}$ . Proto je v současné době výskyt vody v kapalném stavu na povrchu planety velmi vzácný, není však vyloučený (Zurek et. al. 1992).

### **Střední vrstva atmosféry**

Střední vrstva atmosféry se na Marsu vyskytuje mezi 45 až 110 kilometry nad povrchem planety. S narůstající výškou se teplota v této vrstvě snižuje a je ovšem nižší než v nižší vrstvě atmosféry. Střední vrstva je také mnohem chudší na atmosférické jevy a pouze občas do ní zasahují prachové bouře (Johnson et. al. 1965). Ve střední vrstvě se pravděpodobně vyskytují větrné proudy, které jsou podobné jet streamu. Jejich projevy ale zatím nebyly podrobně prozkoumány (Zurek et. al. 1992). Pro nízké teploty a působení slunečního větru je v této vrstvě vodní pára zastoupena pouze ve stopovém množství (Johnson et. al. 1965).

## **Termosféra**

Termosféra, označovaná též jako vyšší vrstva atmosféry, se vyskytuje mezi 110 až 200 km nad povrchem planety Mars. Na rozdíl od střední vrstvy atmosféry planety je podstatně teplejší, což je způsobeno přímým působením slunečního záření (Johnson et. al. 1965). Termosféra je velmi řídká, dochází zde k přímému působení slunečního větru a kosmického záření, které způsobují segregaci a štěpení molekul plynů na jednotlivé atomy. Ty jsou pak unášeny do meziplanetárního prostoru, což prakticky vylučuje přítomnost vody nebo vodních par v této sféře. Molekuly vody jsou zde rozštěpeny na atomy vodíku a kyslíku, které jsou unášeny dále do exosféry. V termosféře byla zjištěna vrstva ionosféry, a to v pásmu od 110 do 130 km nad povrchem planety (Johnson et. al. 1965).



## **Exosféra**

Exosféra je vrstva atmosféry od 200 km a výše nad povrchem planety. Její rozsah se odhaduje přibližně do 20 000 km, avšak přechod do meziplanetárního prostoru je velmi pozvolný. Pro exosféru je charakteristické intenzivní působení slunečního větru a kosmického záření a odnos rozštěpených atomů plynů do kosmického prostoru (Johnson et. al. 1965).

## **Složení atmosféry**

Atmosféra Marsu je složena z řady plynných i pevných složek, přičemž nejvíce jsou zastoupeny tyto plyny a sloučeniny (Johnson et. al. 1965): oxid uhličitý (95,32 %), dusík (2,7 %), argon (1,6 %), kyslík (0,13 %), oxid uhelnatý (0,07 %), vodní pára (0,03 %) a oxid dusnatý (0,013 %). Zbývající podíl v celkovém složení atmosféry pak náleží vzácným plynům, které se zde vyskytují pouze ve stopovém množství.

Obrázek 4: Porovnání celkového složení atmosféry Marsu a Země

Planet	Atmospheric Pressure	Atmospheric Composition	Surface Temperature
 MARS	6 - 10 mbar	Carbon Dioxide - 95.32 % Nitrogen - 2.70 % Argon - 1.60 % Oxygen - 0.13 %	-60° C
 EARTH	1000 mbar	Nitrogen - 75.52 % Oxygen - 23.13 % Argon - 1.29 % Carbon Dioxide - 0.05 %	15° C

Zdroj: <https://www.haikudeck.com/mars-uncategorized-presentation-JG0t1NurWA>

Na složení atmosféry Marsu měla v minulosti největší vliv vulkanická činnost a v současné době je to působení slunečního větru (Zurek et. al. 1992). Složení atmosféry této planety se v současné době ve větším rozsahu nemění. Nejvíce kolísá zastoupení oxidu uhličitého, jehož značná část je vázána v polárních čepičkách. Na Marsu dochází na pólech ke střídání polárního dne a noci a tedy ke značnému kolísání teplot (Daňhelová 2008). Oxid uhličitý je při vyšších teplotách uvolňován do atmosféry, kde se jeho podíl zvyšuje. Naopak při nízkých teplotách je vázán zpět jako pevná součást „polárních čepiček“ (Owen et. al. 1977).

Voda v současné atmosféře Marsu představuje pouze 0,03 % a její přítomnost je již provedenými průzkumy spolehlivě prokázána. Nejvíce se vyskytuje v nejspodnějších vrstvách atmosféry, kde je transportována větry a mohou se zde vytvořit shluky podobné oblačnosti (Johnson et. al. 1965). Ve vyšších vrstvách atmosféry Marsu se voda vyskytuje velice omezeně, protože její molekuly jsou zde díky přítomnosti slunečního větru štěpeny na vodík a kyslík.

### **3 MATERIÁLOVÉ INDICIE ČINNOSTI VODY NA POVRCHU MARSU**

V této části práce jsou popsány hlavní indicie působení vody na povrchu planety, a to jak v pevné, kapalně a plynné formě. Jedná se zejména o minerály vytvářené činností vody, dále o projevy činnosti vody v atmosféře a působení vody na reliéf Marsu.

#### **3.1 MINERÁLY UTVÁŘENÉ ČINNOSTÍ VODY NA MARSU**

Jako důkazy činnosti vody na Marsu jsou pokládány výskyty určitých druhů minerálů, na jejichž vzniku a přeměnách se musí podílet voda.

##### **Jílové minerály**

Jako důkaz činnosti vody na Marsu, je pokládán objev jílových minerálů, které byly nalezeny především v oblastech velkých impaktních kráterů. Základním předpokladem je, že tyto formy jílových minerálů vznikly interakcí vody a horniny (Ehlmann et. al. 2011). Vznik těchto minerálů je kladen do období Noachian, a to přibližně do doby před 3,7 miliardami let. Jako další možná příčina vzniku takovéto formy minerálů se uvažuje přítomnost podpovrchové hydrotermální cirkulace (Ehlmann et. al. 2011). Možnost hydrotermální cirkulace podporuje názor, že v minulosti na Marsu musela být přítomna v nezanedbatelném množství podpovrchová voda v kapalném stavu (Ehlmann et. al. 2011). Podpovrchové vody jsou na rozdíl od povrchových vod stálejší a lze u nich předpokládat dlouhodobou a intenzivní činnost při tvorbě a přeměně jílových minerálů a hornin na Marsu (Ehlmann et. al. 2011).

## **Sírany, křemičitany a fylosilikáty**

Přítomnost vody na Marsu potvrzuje také identifikace konkrétního druhu horniny pomocí dálkového průzkumu povrchu planety. Pozitivní identifikace byla provedena sondou Mars express, která je vybavena spektrometrem OMEGA (Silverman 2017). Na povrchu planety byla takto zjištěna přítomnost síranů, přičemž tyto minerály a z nich vzniklé horniny jsou důkazem přítomnosti vody v kapalném stádiu. Sírany (soli kyseliny sírové) jsou minerály, které vznikají interakcí s kapalnou a tekoucí vodou. Vznik síranů je kladen do období Noachian, kdy byl na povrchu Marsu vyvinut aktivní hydrologický systém (Poulet et. al. 2005). Zároveň zde musela být přítomna i podpovrchová voda. Dalším důkazem působení vody na Marsu je přítomnost křemičitanů, které byly při uvedeném průzkumu rovněž detekovány. Křemičitany jsou sloučeniny kyseliny křemičité a různých dalších látek, které rovněž vznikají za přítomnosti vody (Poulet et. al. 2005). Spektrometrem OMEGA byly detekovány na povrchu Marsu také fylosilikáty (obr. 5), což je další důkaz o přítomnosti vody na Marsu. Jedná se o hydratované sloučeniny obsahující atomy křemíku a voda je tedy k jejich vzniku nezbytná (Mustard et. al. 2008). Další průzkumy ukázaly, že fylosilikáty se vyskytují na poměrně rozsáhlém území, které je omezeno pouze na povrch vzniklý v rané historii planety. Většina fylosilikátů, které se na povrchu Marsu v současné době vyskytují, vznikla v období Noachian (Mustard et. al. 2008).

Další spektrometr CRISM zkoumal zastoupení konkrétních fylosilikátů na povrchu Marsu (Silverman 2017). Na povrchu se vyskytují fylosilikáty téměř všech skupin, které jsou zastoupeny i na Zemi. Nejčastěji byly identifikovány minerály jako muskovit, kaolinit nebo chlorit. V menším zastoupení pak byly identifikovány smektity a také minerály bohaté na olivín (Mustard et. al. 2008). Nejčastějším prostředím, kde se fylosilikáty vyskytovaly, byly povrchové útvary utvářené v období Noachian,

především pak vrcholy vulkanických kráterů, ale také sedimenty, které byly vytvořeny činností vody (Mustard et. al. 2008).

### **Chloristany**

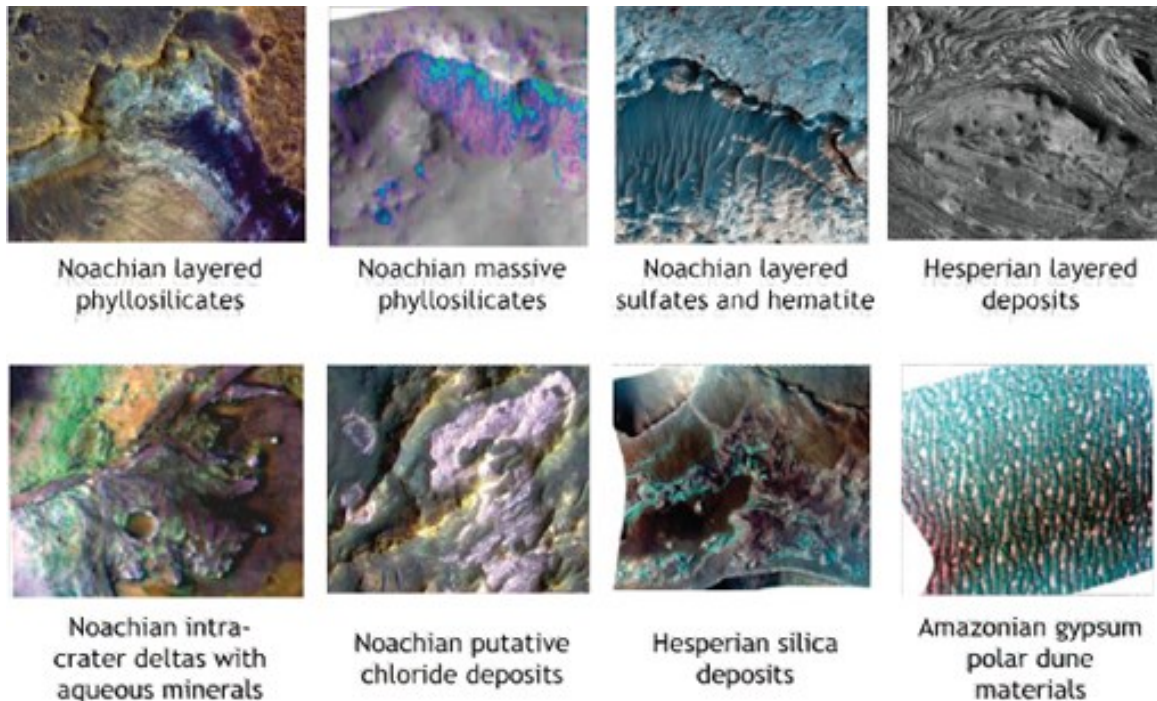
Důkaz přítomnosti vody na povrchu Marsu přinesly výzkumy založené na pozorování a analýze povrchu pomocí družice, která obíhá planetu Mars po orbitě nad jejím rovníkem (Martin-Torres et. al. 2015). Tyto práce umožňují simulaci modelů paleoklimatu na Marsu. V kráteru Gale (příloha 1) byla zjištěna přítomnost chloristanů (obr. 5), které jsou schopny vázat vlhkost z atmosféry i z povrchu planety (Martin-Torres et. al. 2015). Tyto sloučeniny pak v době, kdy je povrch odvrácený od Slunce vytvářejí slané kapalné roztoky, které se v době přivrácení povrchu části planety ke Slunci opět vypaří. Pomocí přístroje Curiosity a jeho měření vlhkosti vzduchu v atmosféře Marsu a ve vrstvách těsně pod povrchem, byla prokázána výměna vody mezi povrchem a atmosférou (Martin-Torres et. al. 2015).

### **Hematit**

Pomocí spektrometru TES byla zjištěna přítomnost šedého hematitu (obr. 5) na mnoha místech na povrchu Marsu, především pak v oblasti Valles Marineris (příloha 1). Území, ve kterých je výskyt hematitu nejčastější, se vyznačují drobnými vrstvami složenými z bazaltických sedimentů, kde je hematit obsažen přibližně z 10 % – 15 % (Christensen et. al. 2001). Další oblast výskytu hematitu je také pánev Aram Charos. Sedimenty s bazaltickým materiálem i velké uzavřené pánve jsou indiciemi, že v těchto oblastech v minulosti působila voda. Hematit prokazuje přítomnost vody, protože nejčastěji vzniká srážením slané mořské vody obsahující potřebné minerály (Christensen et. al. 2001). Vznik hematitu na Marsu je s největší

pravděpodobností spojen se srážením z vodního prostředí nebo s hydrotermální činností (Christensen et. al. 2001).

Obrázek 5: Ukázka snímků vybraných minerálů vytvořených za přítomnosti vody



Zdroj: <https://www.nap.edu/read/13117/chapter/9>

## 3.2 PROJEVY EXISTENCE VODY V ATMOSFÉŘE

### Oblačnost

Hlavní poznatky o oblačnosti na Marsu přinesla mise Phoenix (Silverman 2017), na jejímž základě jsou rozlišovány dva typy oblačnosti. Převládajícím typem oblačnosti jsou oblaka tvořená oxidem uhličitým, což je plyn nejvíce zastoupený v atmosféře Marsu. Výskyt vodních par a oblačnosti tvořené vodou potvrdila měření, která prováděla sonda Global Surveyor (Whiteway et. al. 2009). Bylo zjištěno, že oblaka jsou převážně složena z malých krystalků ledu a oxidu uhličitého, což je způsobeno výrazně nízkými teplotami v atmosféře Marsu (Příhoda 2002). Další měření sondou Mariner 9 umožnilo vysvětlit chod oblačnosti. Výskyt oblaků tvořených vodou je oproti oblakům tvořených oxidem uhličitým



poměrně vzácný, přičemž vznikají obvykle v oblastech pólů v období polárního léta (Whiteway et. al. 2009). Polární čepičky, tvořené z větší části oxidem uhličitým, obsahují také stopové množství vody. Pokud teplota atmosféry stoupne na dostatečnou hodnotu, voda se začne vypařovat a stoupat vzhůru. Ve vyšších polohách panují velmi nízké teploty, a vodní pára opět zmrzne. Díky silným větrům, které na Marsu vznikají vlivem nerovnoměrného zahřívání povrchu, jsou malé krystalky ledu tvořící oblaka unášeny k rovníku. V této oblasti klesají na povrch, a je pozorován úkaz, který lze přirovnat ke vzniku jinovatky na Zemi (Whiteway et. al. 2009). Oblaka na Marsu jsou srovnávána s oblaky typu Cirrus na Zemi. Měření sondou Mariner 9 také ukázala, že tento typ oblačnosti se vyskytuje zejména do výšky 4 km nad povrchem Marsu.

### **Výpar a vodní páry**

Údaje o chování, vlastnostech a změnách vodních par v atmosféře přinesla především měření, která byla uskutečňována během mise Viking. K detekci vody v atmosféře byl využit pětikanálový mřížkový spektrometr MAWD měřící ve spektrálním pásmu vodní páry kolem vlnové délky 1,4  $\mu\text{m}$  (Farmer et. al. 1977). Vodní pára v atmosféře byla monitorována od letního slunovratu k následující rovnodennosti na severní polokouli. Tato měření ukázala, že vodní pára je přerozdělována nerovnoměrně v průběhu roku od pólů směrem k rovníku (Farmer et. al. 1977). Výpar vody do atmosféry Marsu se projevuje nejvíce v oblasti pólů. Polární čepičky obsahující také částice vody se nejvíce vypařují v období polárního dne. Výpar je ovlivněn zeměpisnou šířkou, ale také nadmořskou výškou a tvarem a sklonitostí reliéfu (Farmer et. al. 1977). V jiných oblastech, kde se souvislé polární čepičky nevyskytují, je výpar vody nepatrný. Možnost výparu vody je pouze z drobných slaných roztoků, které byly zjištěny ve velkých vulkanických kráterech, nebo z vysrážených ledových krystalků, které byly vytvořeny při klesání oblaků s výskytem částic ledu.

## **4 INDICIE ČINNOSTI VODY NA POVRCHOVÝCH TVARECH**

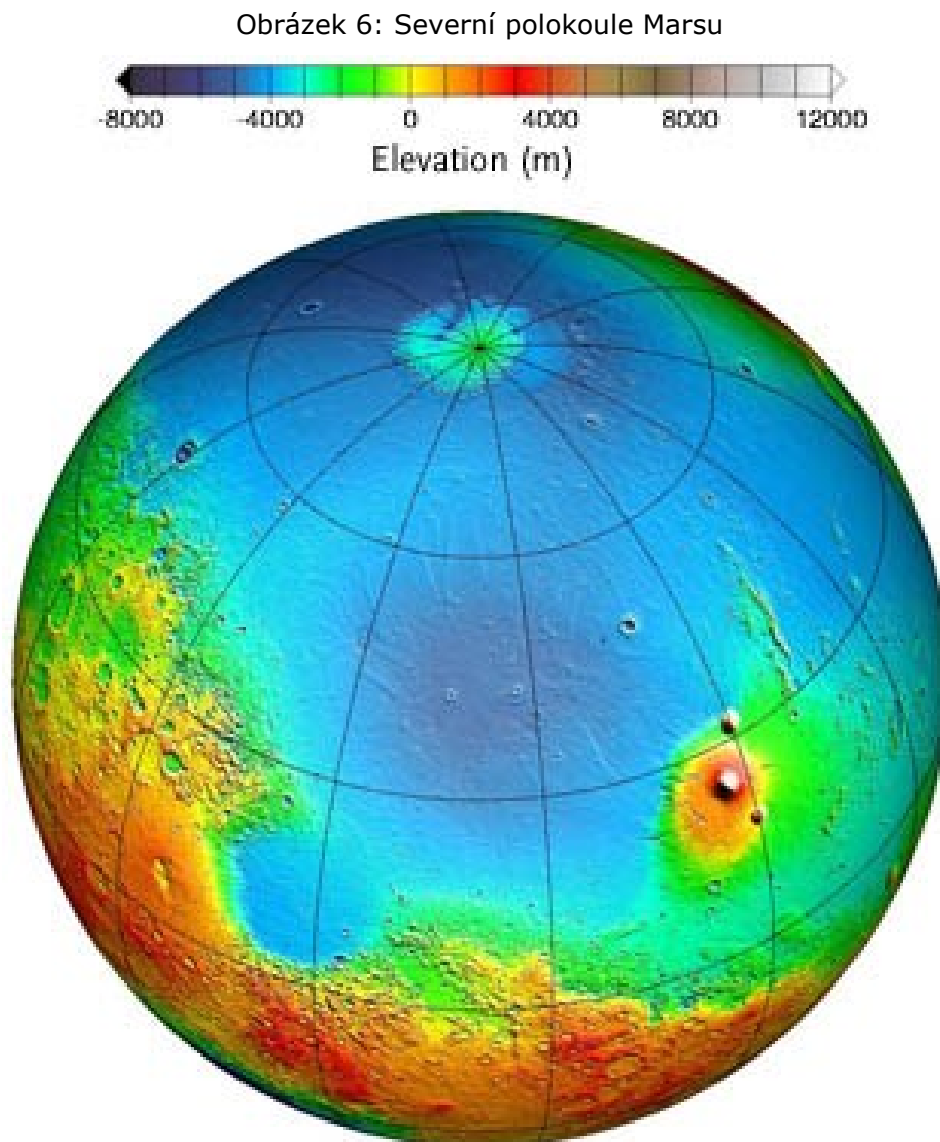
Činnost vody v kapalném stavu na Marsu probíhala zejména v období Noachianu (Di Achille et. al. 2010). Podle dosavadních indicií lze předpokládat, že v Noachianu se na povrchu planety vyskytovaly rozsáhlé vodní plochy podobné oceánům na Zemi, a dále plochy podobné jezerům. Na Marsu se mohla vyskytovat říční síť nebo hydrotermální cirkulace vody pod povrchem (Di Achille et. al. 2010). Všechny tyto procesy spojené s činností vody vytvářely povrch planety, navíc zde působila voda v pevné fázi, a to v útvarech podobným ledovcům na Zemi (Di Achille et. al. 2010). Významné doklady o činnosti vody na Marsu v různých obdobích historie této planety jsou pravděpodobné výskyty oceánů, jezer, říční sítě a působení ledu na morfostrukturní a polygenetické povrchové tvary.

### **4.1 MORFOLOGICKÉ PROJEVY VÝSKYTU OCEÁNŮ**

Oceán se na Marsu vyskytoval v období Noachian. Jako oblast, která se jeví jako nejpříhodnější místo k výskytu rozsáhlé vodní plochy, je Vastitas Borealis (Di Achille et. al. 2010). Jedná se o rozsáhlou depresi, která se nachází přibližně 4 – 5 kilometrů pod okolním povrchem (Příhoda 2002). Z názvu této deprese pak bylo odvozeno označení oceánu, který deprese v období Noachian vyplňoval, a to Oceanus Borealis.

Základní indicie, které svědčí o výskytu oceánu na severní polokouli Marsu, jsou především specifické složení minerálů, které se v oblasti Vastitas Borealis (příloha 1) vyskytuje, zarovnaný povrch severní polokoule, rozsáhlá deprese a také útvary nacházející se na jejích okrajích, připomínající oceánské pobřeží na Zemi (Di Achille et. al. 2010).

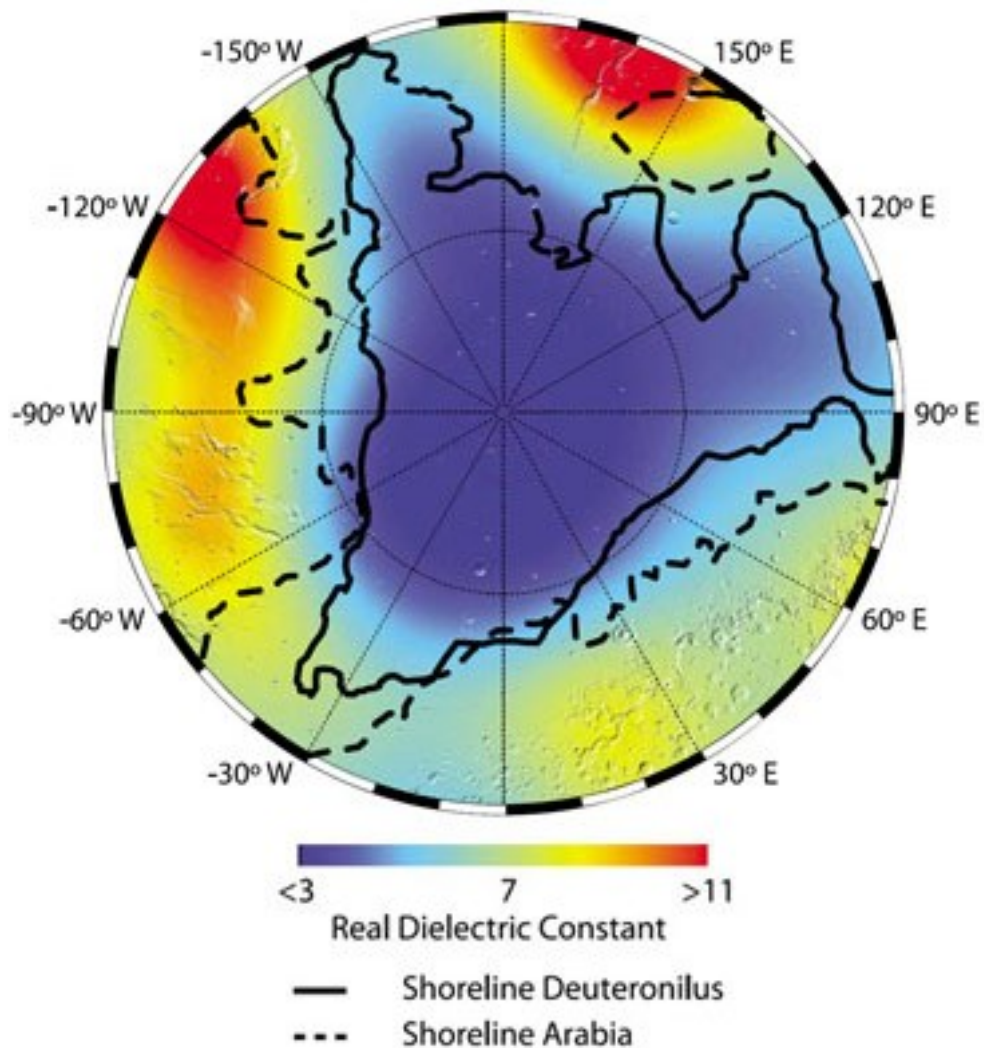
V roce 1976 byl na Marsu prováděn výzkum pomocí sondy Viking (Silverman 2017). Během monitoringu povrchu planety byly objeveny dvě linie, které svými znaky vykazovaly podobnost s pobřežními liniemi.



Zdroj: <http://www.skyandtelescope.com/astronomy-news/new-evidence-for-ancient-martian-ocean/>

Na obrázku 6 je nápadné, že reliéf severní polokoule Marsu je málo členitý a na rozdíl od jižní polokoule výrazně nižší.

Obrázek 7: Hraniční linie deprese na severní polokouli Marsu



Zdroj: <http://www.skyandtelescope.com/astronomy-news/new-evidence-for-ancient-martian-ocean/>

Jak je znázorněno na obrázku 7, pomocí průzkumu povrchu planety byly detekovány dva útvary, připomínající břehové linie na povrchu Země. Byly označeny jako Arabia a Deuteronilus (Di Achille et. al. 2010). Nebylo jasné, jestli tyto několik tisíc kilometrů dlouhé linie je možné považovat za pobřeží původního oceánu, protože jejich průběh je značně nepravidelný. Tato rozkolísanost však byla dodatečně vysvětlena erozivní činností, která na Marsu neustále probíhá, a také změnami sklonu osy planety, který se

od období vzniku planety do současnosti značně změnil (Di Achille et. al. 2010).

### **Deuteronilus**

První linie ze dvou břehových zón na severní polokouli Marsu je Deuteronilus (obr. 7), která představuje nápadnou geologickou hranici. Je to břehová linie táhnoucí se podél okraje dichotomie (tedy sníženiny na severní polokouli Marsu). Vyznačuje se především zarovnaným povrchem, který byl formován činností ledovce (Ivanov et. al. 2017). Linie od sebe odděluje rozsáhlou nížinu severní polokoule Marsu od okolních vysočin. Ledová čepička se dnes vyskytuje pouze v menším rozsahu v oblasti pólů. V minulosti po zamrznutí rozsáhlého severního oceánu na konci Noachianu však byla mnohem rozsáhlejší a na svých okrajích pak tento led přemodeloval terén břehové linie Deuteronilus (Ivanov et. al. 2017). Oblast zaniklého oceánu na severní polokouli je také nápadná mnohem nižším výskytem impaktních kráterů. Převážná část této oblasti je tvořena sedimentárními horninami.

### **Arabia**

Druhá břehová linie pozorovatelná na severní polokouli je Arabia (obr. 7). Od linie Deuteronilus se liší podstatně mnohem vyšší výškou. Proto je hladina oceánu na Marsu diskutabilní, a zatím nebylo jednoznačně určeno, do jaké výšky oceán na Marsu zasahoval. Do oblasti Arabia rovněž zasahují kaňony, které ústí do rozsáhlé nížiny na severní polokouli. Jsou považovány za pozůstatek říční sítě, která byla na oceán navázána (Zuber et. al. 2010).

Další odlišností Arabie od Deuteronilu je vyšší výskyt impaktních kráterů. Ty mají obvykle strmé srázy, které ale v minulosti dobře odolaly erozi. V impaktních kráterech lze nalézt uložené vrstvy sedimentů. Průzkumem bylo zjištěno, že spodní vrstvy jsou mnohem tmavší a byly vytvořeny

sedimentační činností na dně hlubokomořské pánve (Zuber et. al. 2010). Svrchní světlejší sedimenty, které starší souvrství překryly, vznikly činností větru a akumulací unášeného materiálu.

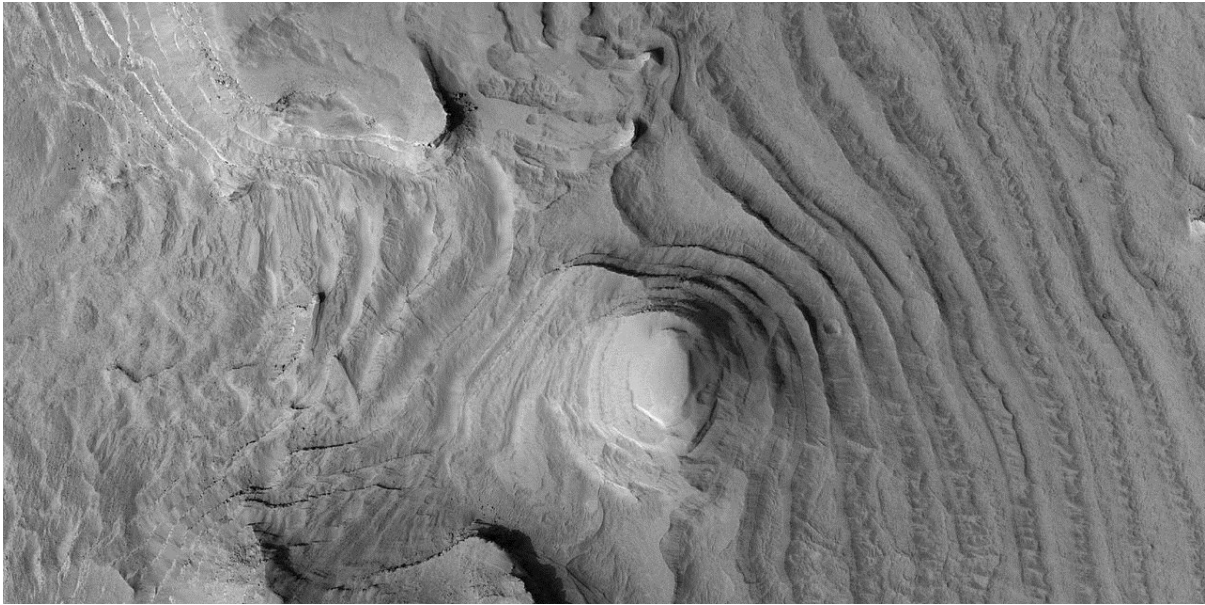
Další indicií přítomnosti oceánu na Marsu je výskyt útvarů, které jsou podobné říčním deltám na Zemi. Jsou součástí zóny Arabia, a jsou na ně navázány hluboké a rozsáhlé sítě kaňonů. Většina z nich probíhá v severojižním směru. Od jihu k severu se postupně zahlubují, voda by tedy odtékala z výše položených oblastí na jihu do sníženiny na severu, kde se v minulosti nacházel oceán (Zuber et. al. 2010).

Přítomnost oceánu na Marsu rovněž dokazuje jak chemické složení povrchu nížin na severní polokouli, tak chemické znaky podél obou pobřežních linií. Byla zde detekována přítomnost síranů nebo chloridů, které odkazují na činnost tekoucí vody (Di Achille et. al. 2010). Z minerálního složení povrchu, které bylo doposud zjištěno, je zřejmé, že oceán na Marsu měl spíše kyselé pH (Di Achille et. al. 2010).

Podle klimatických podmínek, které se na Marsu výrazně měnily, oceán zanikl na konci Noachianu. Oceánské vody zamrzly, a vznikl velký ledovec, jehož hmota postupně sublimovala do atmosféry. V současné době lze identifikovat v atmosféře Marsu vodík nebo deuterium. Díky erozivní činnosti na povrchu planety byl relikt ledovce postupně překryt eolickými sedimenty a voda ve formě ledu se tak pod povrchem Marsu vyskytuje pravděpodobně i v současnosti (Di Achille et. al. 2010).

Pro oblasti oceánů je typický právě reliéf tvořený sedimenty (obr. 8), ty jsou pak dobře viditelné v oblastech, kde je zvýšený výskyt vulkanických kráterů.

Obrázek 8: Sedimenty v oblasti Arabia



Zdroj:

[https://en.wikipedia.org/wiki/Arabia\\_Terra#/media/File:47421\\_1890layersbutte.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Arabia_Terra#/media/File:47421_1890layersbutte.jpg),  
revidováno s (Di Achille et. al. 2010)

## 4.2 MORFOLOGICKÉ PROJEVY VÝSKYTU JEZER

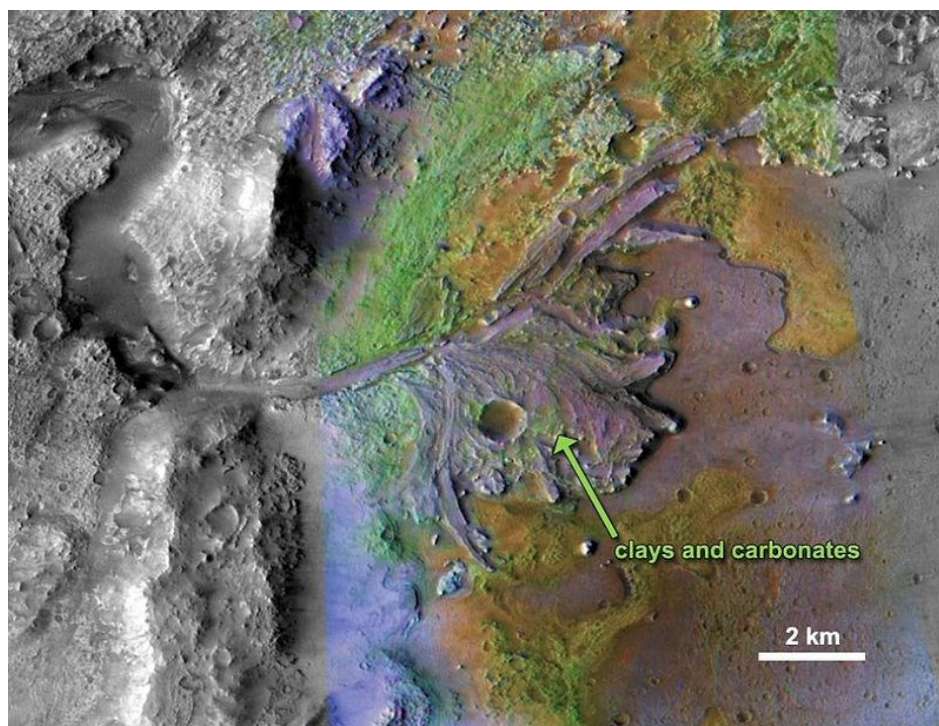
Kromě velkého oceánu, který v období Noachianu pokrýval velkou část severní polokoule, byly na Marsu detekovány menší útvary po možných vodních plochách, podobné morfologii jezer na Zemi. K tomu, že byly některé velké krátery v minulosti zaplněny vodou, vede několik významných indicií. Nejnápadnější z nich, je výskyt delt a kaňonů podobných těm, které byly identifikovány u břehových linií okraje zaniklého oceánu na severní polokouli (Horton et. al. 1996). Jezerní pánve, které na povrchu Marsu můžeme pozorovat, lze rozdělit na dva základní typy. Prvním typem pánví jsou jezera akumulární, což jsou obvykle pánve v kráterech, které byly v minulosti vyplněny vodou (Horton et. al. 1996). Do impaktních kráterů pak ústí jedno, nebo více údolí, popřípadě kaňony, které byly v minulosti vytvořeny tekoucí vodou. Údolí nebo kaňony fungovaly jako přívod vody do kráteru. Přívodní kaňony

a údolí obvykle vytvářely rozsáhlé sítě, podobně jako říční síť na Zemi (Horton et. al. 1996).

Druhým typem pánví jsou pak jezera průtočná. Jsou opět tvořena velkým impaktním kráterem, ten má však kromě ústí také odtokovou cestu, kterou mohla voda odtékat z jezera. Tento typ jezer byl tedy součástí říční sítě s údolími a kaňony, které vodní plochy jezer tohoto typu spojovaly (Horton et. al. 1996). Důkazem přítomnosti vodních jezer v kráterech je přítomnost sedimentů, které se na dnech kráterů ukládaly (Caleb et. al. 2008).

Nápadnou indicií je okraj kráteru, který byl v minulosti jezerem (obr. 9). Důkazem existence jezer je rovněž přítomnost minerálů vytvářených činností vody, jako jsou sírany, chloridy, karbonáty nebo jílovité materiály (obr. 9).

Obrázek 9: Příklad dna jezer vzniklých na Marsu



Zdroj:

[https://www.nasa.gov/mission\\_pages/msl/multimedia/pia15097.html#.W1iFO9IzbIU](https://www.nasa.gov/mission_pages/msl/multimedia/pia15097.html#.W1iFO9IzbIU)

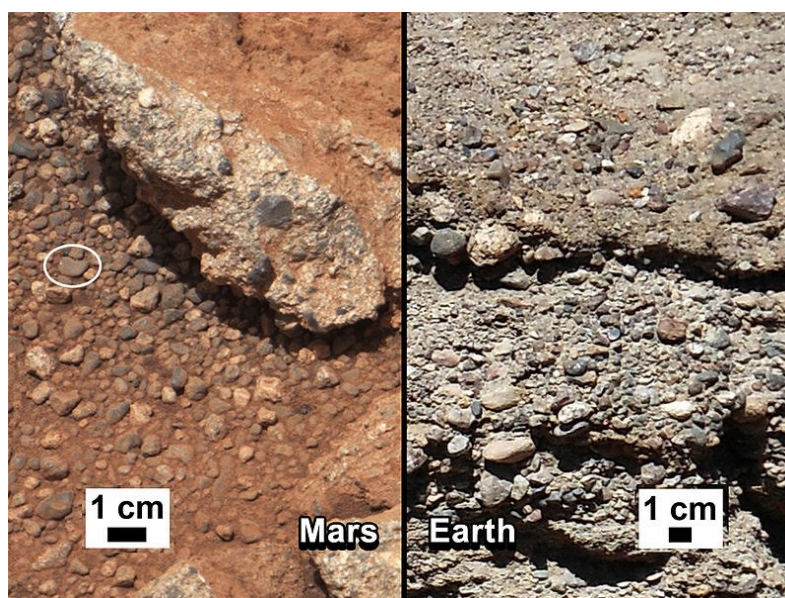


Na základě družicového průzkumu povrchu Marsu byly identifikovány krátery, kde se pravděpodobně nacházela největší jezera (Caleb et. al. 2008). Voda v jezerech nebyla doplňována pouze přitékající vodou, ale také srážkami z atmosféry. Dalším zdrojem byly také zásoby podzemní vody, které byly v období Noachianu značné.

## Kráter Gale

Kráter Gale (příloha 1) byl v minulosti rovněž vyplněn vodou a nacházelo se zde velké jezero. Na jeho přítomnost, podobně jako u kráteru Terby v oblasti Hellas Platinia (příloha 2), ukazují výskyty delt a drobných koryt ústících do kráteru. Hlavní indicií přítomnosti vody je však zde minerální složení hornin na povrchu a jeho struktura. Průzkum provádělo vozítko Curiosity, které detekovalo přítomnost síranů a hematitu vznikajících za účasti vody (Grotzinger et. al. 2014). Specifickou indicií je v této oblasti přítomnost smektitových jíílů v oblasti Yellowknife Bay v rámci kráteru Gale. Činnost vody, která přitékala údolími, zformovala v deltách konglomeráty (slepence, obr. 10) podobné těm, které se vyskytují na Zemi (Grotzinger et. al. 2014).

Obrázek 10: Konglomeráty v kráteru Gale



Zdroj: <https://tema.aktuality.sk/nasa/>

Na dně kráteru Gale lze pozorovat struktury povrchu a horniny vzniklé za účasti vody (obr. 11), např. pískovcové útvary, struktury jemnozrnných jílových hornin nebo deltové útvary.

Obrázek 11: Kráter Gale



Zdroj:

<https://www.popularmechanics.com/space/moon-mars/news/a17707/mars-curiosity-lakes/>

### **Elysium Platinia Paleolake**

Další oblastí s dávným výskytem jezer je pánev Elysium (příloha 1). I zde byly identifikovány krátery, které byly v minulosti vyplněny vodou. Specifikem této oblasti je pak dávná silná vulkanická činnost (Hartmann et. al. 2000). Proto byla jezera formována nejen činností samotné vody, ale také vulkanismem, podobně, jako např. na Islandu na Zemi. Pozůstatkem jsou pak reliktů vyvřelých hornin na dně kráteru. Součástí těchto areálů jsou drobné vyvýšeniny, které v minulosti byly ostrůvky,

system koryt a menších údolí, ale také nánosy velmi rozmanitých jezerních sedimentů. Říční síť přiléhající k jezerům v této oblasti byla rovněž formována výlevy lávy, které přemodelovaly tvary a směry koryt (Hartmann et. al. 2000).

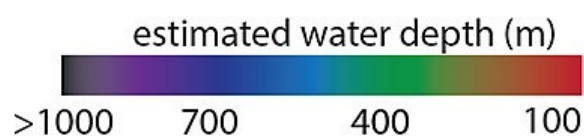
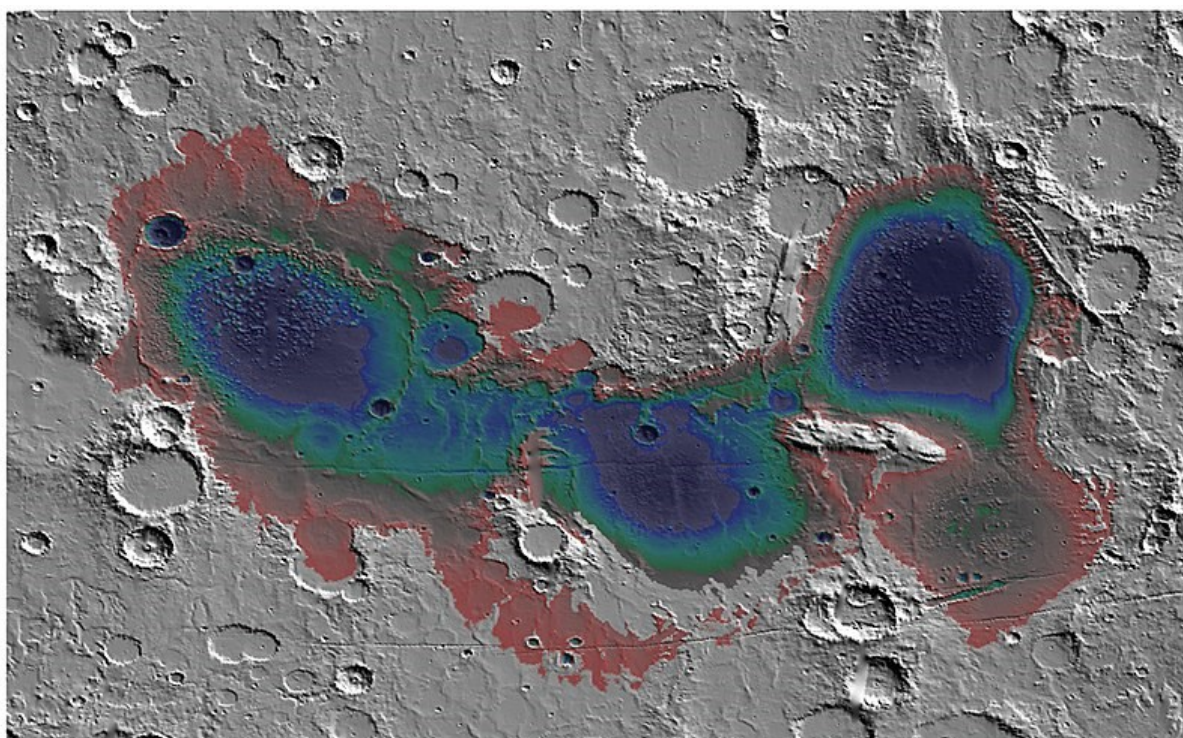
### **Kráter Jezero**

Tento velký kráter v oblasti Syrtis Major (příloha 1) byl v minulosti rovněž vyplněn vodou, což je patrné z mnoha poznatků, které byly v této oblasti pořízeny pomocí Mars Reconnaissance Orbiter (Silverman 2017). Byla zde pozorována dvě koryta, která pravděpodobně ze severu toto jezero zásobovala vodou. Na nich lze sledovat i meandry typické pro pozemské vodní toky (Baker et. al. 2009). Obě koryta ústí do kráteru rozsáhlou deltou. Hlavní indicií činnosti vody je přítomnost smektitových jíílů na dně kráteru. Specifikum tohoto kráteru je celková členitost povrchu, tvořeného mnohoúhelníkovými útvary. Jedná se pravděpodobně o trhliny vznikající při rychlém vysychání jezerních sedimentů a tedy o indicie, že kráter Jezero v minulosti skutečně vodu obsahoval (Baker et. al. 2009).

### **Jezero Eridania**

Jezero Eridania v oblasti Terra Cimmeria (příloha 1) je největší zaniklé jezero na Marsu. Jeho rozloha je přibližně 1,1 milionu čtverečních kilometrů, a maximální hloubka je odhadována na 2 400 metrů. Toto jezero lze rozdělit na čtyři základní části (obr. 12), které byly v minulosti oddělenými impaktními krátery, které ale spojila činnost vody (Baker a kol. 2009).

Obrázek 12: Jezero Eridania



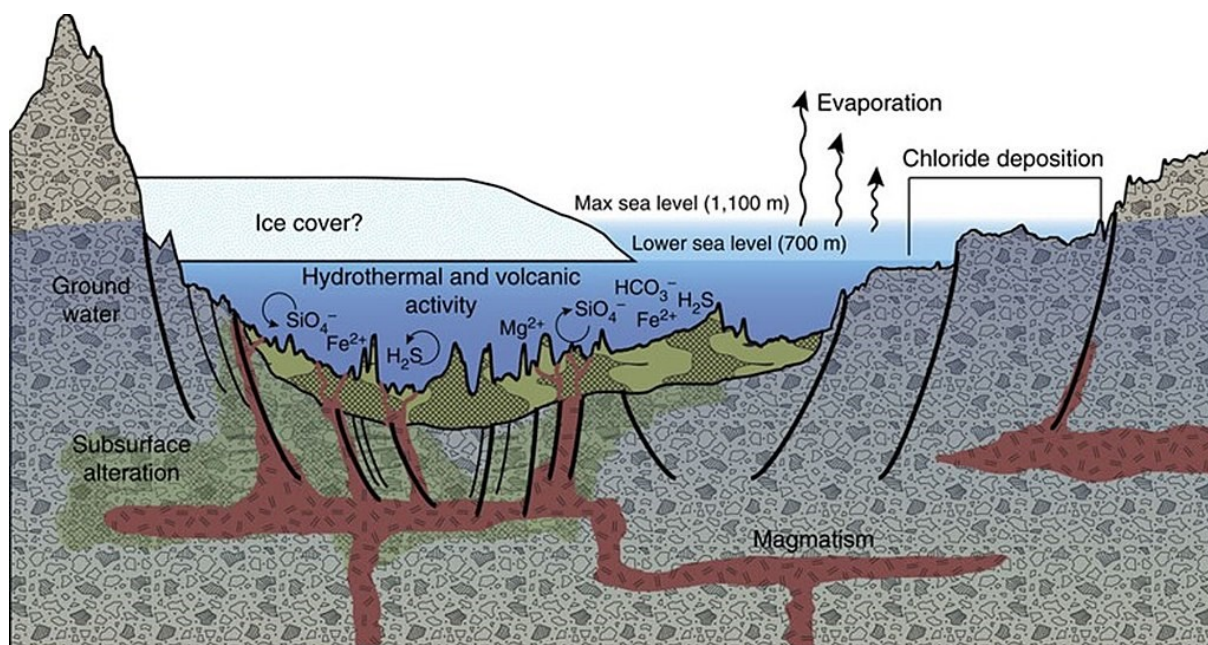
Zdroj:

<https://www.avaruus.fi/uutiset/astrobiologia/raju-tulos-mars-luotaimelta-muinaisen-meren-alueella-on-toiminut-kuumia-lahteita.html>

Jezero Eridania je pro probíhající výzkumy zajímavé především proto, že se zde vyskytuje nejvyšší zastoupení minerálů, které vznikají činností vody (obr. 13). Díky hyperspektrálním datům z družice CRISM zde byly identifikovány fylosilikáty bohaté na Mg, Al a Fe (Baker et. al. 2009). Na povrchu se vyskytují smektitové jíly ve formě slepenců a horniny obsahující kaolin rovněž utvářené činností vody. Jako další minerály vzniklé činností vody, zjištěné průzkumem OMEGA, jsou uváděny sulfáty, sulfidy, slída, serpentín a uhličitany. V břehové linii na okraji krátera jsou pak identifikovány chloridy a křemičitany (Baker et. al. 2009). Některé z těchto minerálů vznikají také v teplých minerálních vodách. Na vzniku minerálů a hornin se podílela i geotermální energie a činnost magmatu

pod povrchem dna kráteru (obr. 13). Obrázek 13 dokládá schéma, jak bylo toto celé jezero zahříváno a obohacováno o minerály.

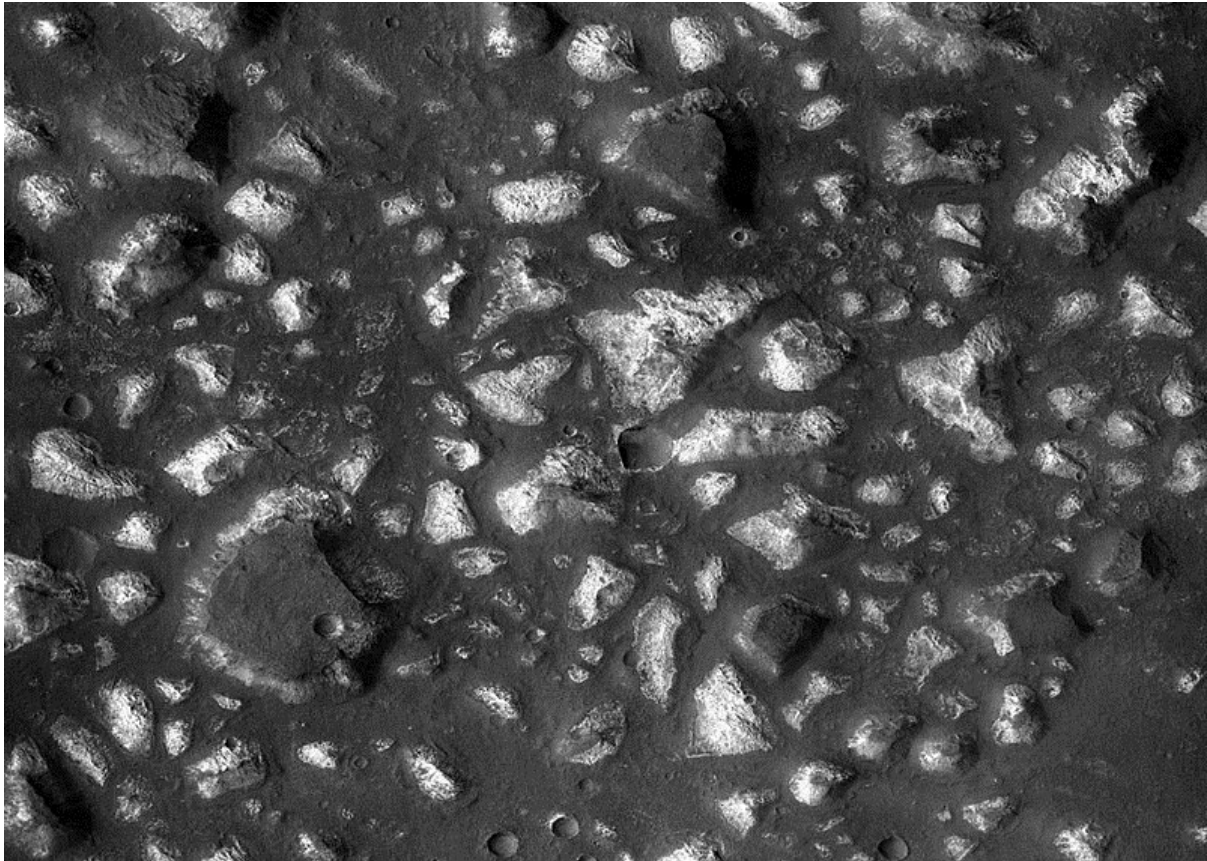
Obrázek 13: Tvorba a minerální složení jezera Eridania



Zdroj: <https://core.ac.uk/download/pdf/141204761.pdf>

Díky přítomnosti jezerních vod, byly popsány usazeniny delší dobu chráněny před erozí způsobenou eolickou činností, a z tohoto důvodu jsou pozorovatelné i v současné době (obr. 14). Byly vytvořeny hydrotermální činností a po zamrznutí jezera byly proti erozi částečně chráněny ledovým příkrovem (Baker et. al. 2009).

Obrázek 14: Usazeniny na dně kráteru Eridian



Zdroj: <http://www.spaceflightinsider.com/missions/solar-system/mars-hydrothermal-deposits-hint-habitable-conditions/>

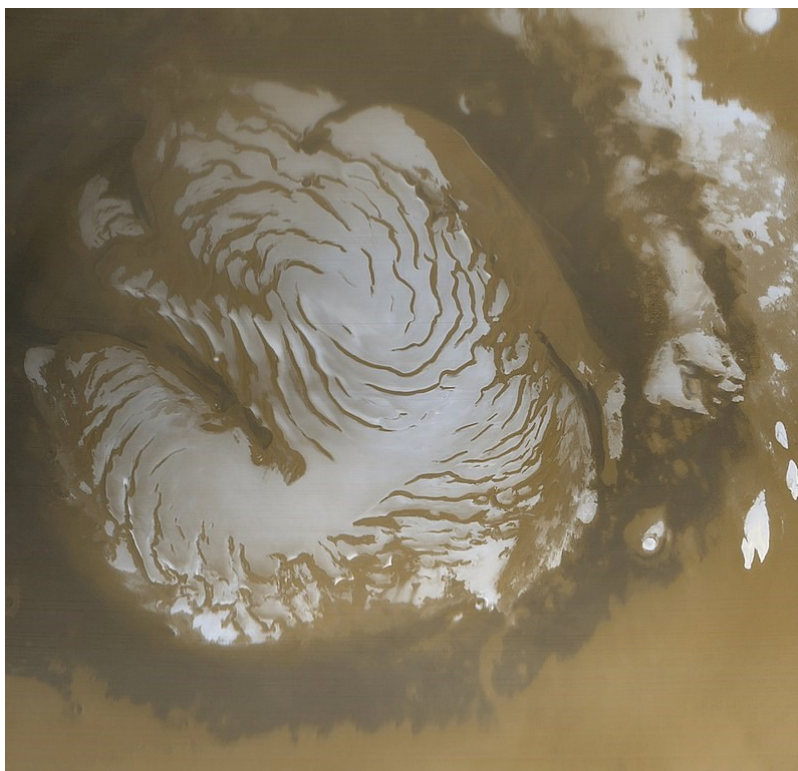
### **4.3 MORFOLOGICKÉ PROJEVY ČINNOSTI LEDU**

Přítomnost ledu na povrchu Marsu naznačuje již složení atmosféry, v níž bylo zjištěno v malém množství vodní páry, a ve větší míře deuterium. V současné době se voda v kapalném stavu na Marsu prakticky nevyskytuje, a tyto plyny se do atmosféry dostávají sublimací z vody v pevném stavu (Sharp 2017). Led na Marsu se tedy nyní vyskytuje pouze v omezeném množství. Většina ledu je vázána v polárních čepičkách (Příhoda 2002), a menší ledové plochy lze pozorovat na svazích kráterů, které se nachází v blízkosti pólů (Sharp 2017).

V minulosti, a to na konci období Noachian, v průběhu Hesperianu a počátkem Amazonianu byl ledový pokryv planety mnohem rozsáhlejší. Koncem Noachianu došlo k zamrznutí oceánu na severní polokouli.

Zamrzla ale také jezera nebo říční systémy. Tyto ledové hmoty dlouhodobě působily na povrch Marsu, a proto se v současnosti na Marsu nachází mnoho reliktních minulého zalednění (Sharp 2017). Od konce Noachianu docházelo k sublimaci ledu, a jeho postupnému uvolňování v plynné formě do atmosféry. Zároveň ale na povrchu probíhala eolická erozivní činnost. Některé ledové masy byly překryty eolickými sedimenty, a pod povrchem byly uchovány dodnes. Na Marsu v minulosti probíhala hydrovulkanická činnost, během výzkumu povrchových tvarů vzniklých hydrovulkanismem byla prokázána přítomnost podzemního vodního ledu (Brož 2013).

Obrázek 15: Polární ledová čepička na severní polokouli Marsu v průběhu léta



Zdroj: <https://glaciersonmars.com/research/>

Nejvíce vody je v současné době na Marsu vázáno v polárních čepičkách (obr. 15). Chemické složení čepiček je přibližně 85 % oxidu uhličitého a 15 % vody. Severní čepička je větší, a zasahuje přibližně do hloubky 3,7 kilometru. Objem čepiček mírně kolísá v závislosti na ročním období,

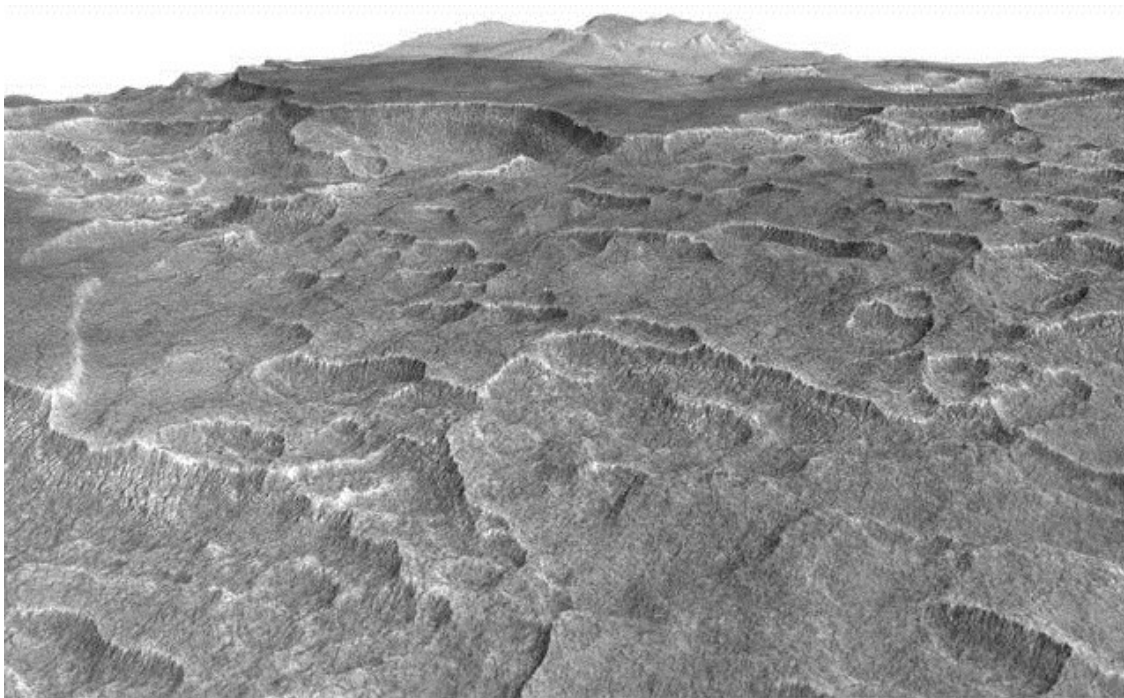
v létě sublimují a v zimě jsou naopak CO<sub>2</sub> a voda proměněny zpět do pevného stavu (Sharp 2017). Jak je vidět na obrázku 15, povrch polárních čepiček je velmi nehomogenní a je překrýván eolickým materiálem, a to zejména prachovými a písečnými částicemi. I okraje polárních čepiček jsou překryté eolickým materiálem a volně tak přecházejí do okolních plání (Sharp 2017). V roce 2008 potvrdilo přítomnost vodního ledu robotické vozítko Phoenix, později, v roce 2010 Mars Reconnaissance Orbiter a dále Mars Surveyor v průběhu rozsáhlé analýzy povrchu planety (Silverman 2017).

Pod povrchem Marsu se vyskytuje zmrzlá voda. Horniny a zvětraliny těsně pod povrchem jsou rovněž zmrzlé, a s vlastnostmi podobnými permafrostu na Zemi. Na povrchu Marsu jsou také pozorovány útvary, které svědčí o tom, že dochází ke střídavému zamrznání a rozmrznání zvětralin na povrchu (Carr et. al. 1986). Byly identifikovány mnohoúhelníkové polygonální struktury, které jsou podobné strukturním půdám na Zemi (Carr et. al. 1986).

Pozůstatkem po původním ledovém pokryvu je členitý terén s malými vyvýšeninami a mělkými depresiemi (obr. 16), které postupně vznikaly sublimací ledu do atmosféry nebo eolickou činností (Carr et. al. 1986). Tyto deprese a vyvýšeniny mohou mít rozsah i tisíce km<sup>2</sup>, záleží to na mocnosti zalednění.



Obrázek 16: Terén vytvořený ledem



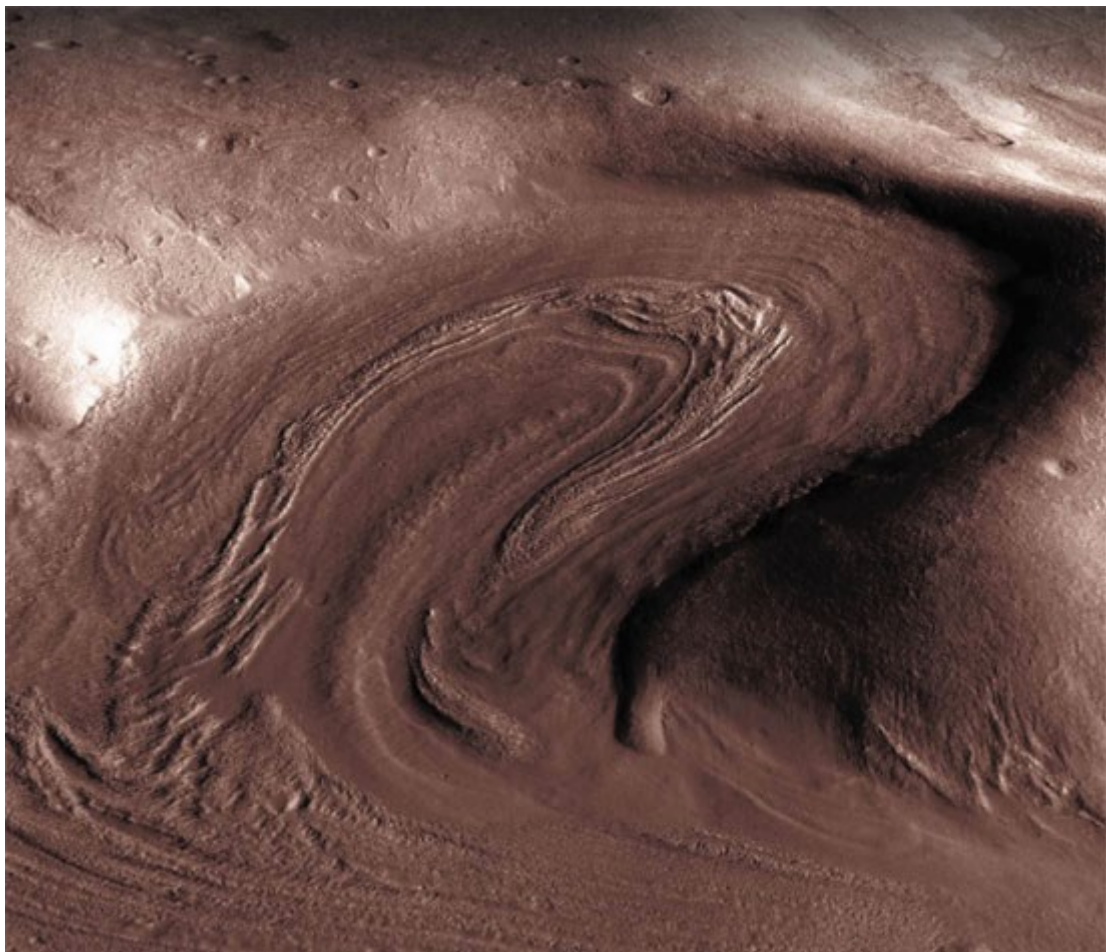
Zdroj: <https://cz.pinterest.com/pin/546835579739253760/>

Dalším projevem činnosti ledu, který je pozorován na povrchu Marsu, jsou tzv. ledové skvrny. Jsou to malé plochy ledu umístěné v impaktních kráterech (Carr et. al. 1986). Vyskytují se v jižnějších zeměpisných šířkách než ostatní projevy ledu. Ledové skvrny jsou na povrchu pokryty vrstvou zvětralin, přes kterou jsou sice pozorovatelné, ale zároveň jim brání v sublimaci do atmosféry. Ledové skvrny jsou sice na povrchu přítomné během celého roku, okolní terén ale nijak neovlivňují (Carr et. al. 1986).

Ledovce jsou schopny zásadně přemodelovat terén, a proto se do současné doby na povrchu Marsu zachovalo poměrně dost útvarů, které na činnost ledovce odkazují (obr. 17). Nejvyšší výskyt ledovců byl v minulosti především v oblastech Ismenius Lacus a Deuteronilus Mensae, které se nachází severně od Arabia Terra (příloha 1), nebo v oblasti Olympus Mons (příloha 2, Colaprete et. al. 1998).

V minulosti Marsu měly ledovce podobné vlastnosti jako ledovce na Zemi. Byly to hmoty, které erodovaly a transportovaly horninový materiál. Na povrchu Marsu tak lze pozorovat akumulovaný materiál, který byl ledovcem přemístěn (obr. 17), a také ledovcová údolí vyplněná těmito ledovcovými sedimenty. Na několika místech byly zjištěny tvary velmi podobné morénám na Zemi (Colaprete et. al. 1998).

Obrázek 17: Morfologické indicie činnosti ledovců na povrchu Marsu v oblasti Ismenius Lacus, včetně morénových akumulací

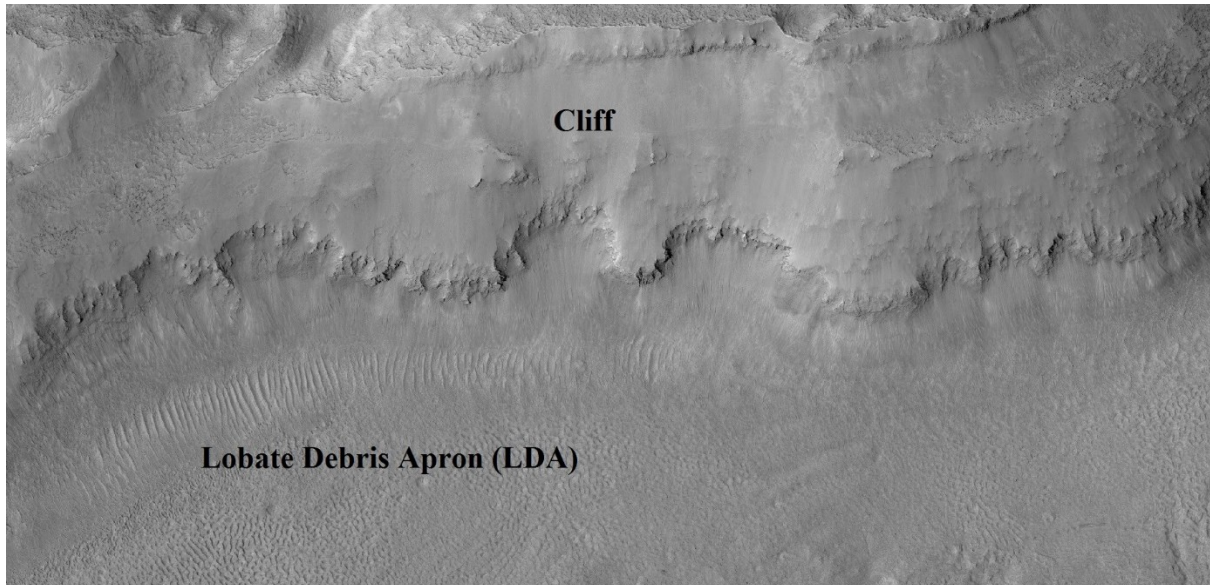


Zdroj: <https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/news/2008/eiszeiten-auf-dem-mars/>

Další formou ledovců jsou skalní ledovce (obr. 18), jejichž přítomnost je doložena nahromaděným materiálem označovaným jako „lobate debris apron“. Jedná se o úlomky drtě hornin uložené pod strmými svahy. Tyto

akumulace byly transportovány činností skalního ledovce (Colaprete et. al. 1998).

Obrázek 18: Skalní ledovce na Marsu



Zdroj: [https://wikivividly.com/wiki/Martian\\_dichotomy](https://wikivividly.com/wiki/Martian_dichotomy)

I když na Marsu bylo mnoho oblastí, kde mohly morény (obr. 19) vznikat, nejsou na jeho povrchu častým povrchovým prvkem. Ledovce na Marsu byly v minulosti mnohem chladnější, a méně viskózní než ty, které známe na Zemi. Navíc ledovce velmi často přimrzaly ke členitému podloží, nebyly tak pohyblivé, a k vytvoření morénových akumulací tak nebyly vždy příliš vhodné podmínky (Colaprete et. al. 1998). Tuto hypotézu podporuje malá četnost výskytu ledovcových údolí tvaru U nebo jiných povrchových tvarů vzniklých pohybem ledovců.

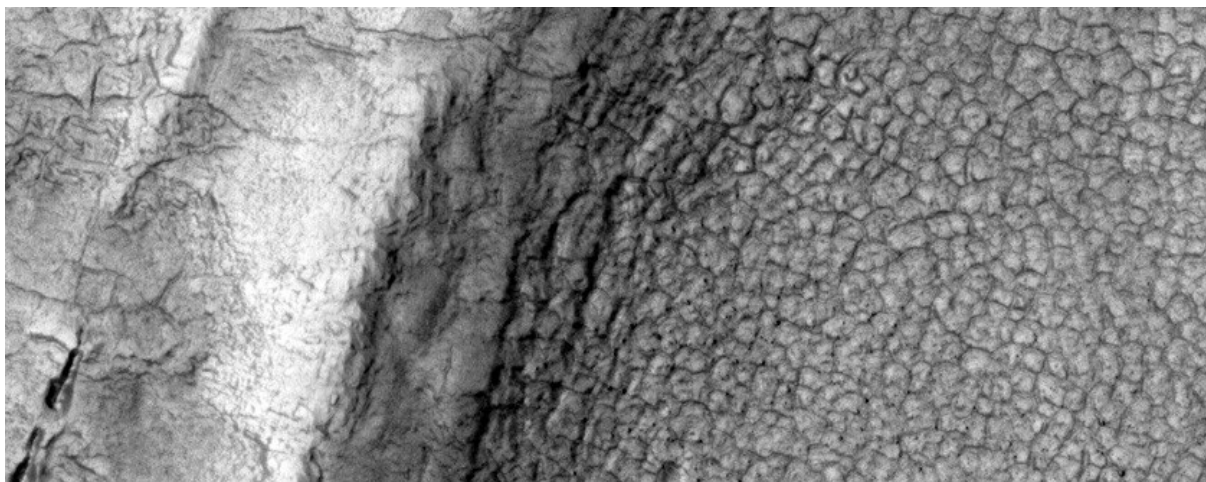
Obrázek 19: Topografie ledovcových morén v oblasti Ismenius Lacus



Zdroj: <https://logiclogiclogic.wordpress.com/2016/05/30/mars-missions-3-6-start-farming-mining-and-looking-at-habitat-construction/>

Další indicií přítomnosti vody na povrchu Marsu je výskyt polygonálních útvarů (obr. 20) na zarovnaném povrchu, který je typický právě pro oblast Deuteronilus Mensae severně od Arabia Terra (příloha 1). Tento reliéf vznikl sublimací ledu, který se zde v minulosti vyskytoval. Polygonální struktury v této oblasti byly pozorovány a zkoumány pomocí družice HIRISE (Silverman 2017).

Obrázek 20: Polygonální útvary na povrchu Marsu



Zdroj: [https://wikivividly.com/wiki/Martian\\_dichotomy](https://wikivividly.com/wiki/Martian_dichotomy)

#### **4.4 MORFOLOGICKÉ PROJEVY ČINNOSTI TEKOUČÍ VODY**

Hlavními indiciemi činnosti tekoucí vody na povrchu Marsu jsou výskyty odtokových kanálů a údolních sítí. Tyto povrchové tvary vytvářejí rozsáhlé systémy téměř na celé planetě (Sharp et al. 1975). Nejvíce zastoupeny jsou v oblasti Valles Marineris (příloha 1), která se nachází východně od rozsáhlé oblasti Tharsis. Kaňony a údolí v oblasti Tharsis a Valles Marineris vznikaly tektonickou činností a následnou vodní erozí (Caleb et. al. 2008). Příkladem jsou Noctis Labyrinthus nebo údolní systém Ganges Chasmata. Tektonická činnost zásadně ovlivnila strukturu povrchu a tvary, vyskytující se na povrchu planety Mars.

Údolní sítě (obr. 21) se častěji vyskytují na jižní polokouli v oblastech vysočin. Jejich vznik je kladen do vlhkého období Noachian, a to přibližně do doby před čtyřmi miliardami let. Většina těchto údolí je maximálně 5 kilometrů široká, a jejich délka může dosáhnout několika set kilometrů (Baker et al. 1992). Předpokladem pro vývoj těchto údolních sítí vzniklých činností vody je aktivní hydrologický cyklus, který mohl na Marsu během Noachianu probíhat.

Obrázek 21: Údolní síť v oblasti Thaumasia



Zdroj: [http://grazinspace.oeaw.ac.at/2016/2010/presentations/Kargl\\_-\\_Mars\\_Fernerkundung\\_GiS2010.pdf](http://grazinspace.oeaw.ac.at/2016/2010/presentations/Kargl_-_Mars_Fernerkundung_GiS2010.pdf)

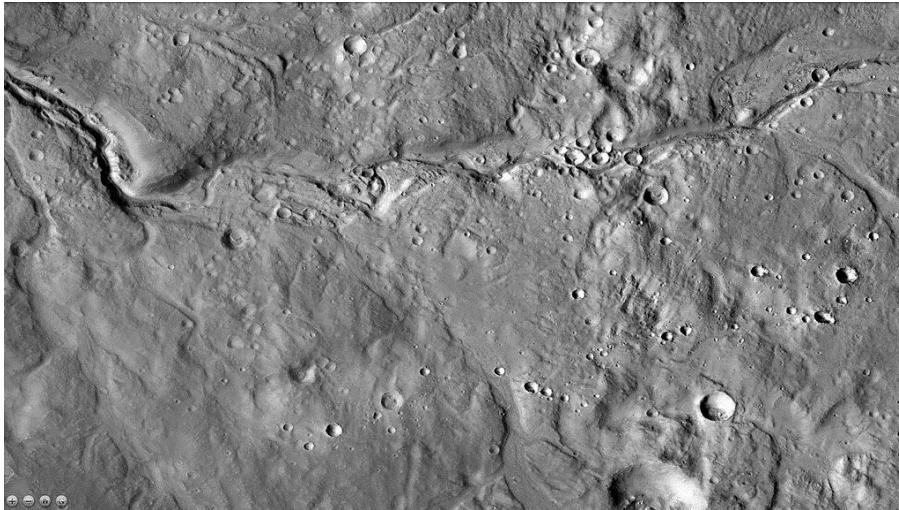
Údolní sítě na Marsu dosahují obvykle hloubky 50–200 metrů. Jejich šířka v průběhu podélného profilu značně kolísá s tím, že se směrem k ústí rozšiřují. Příčné profily se v průběhu údolí také mění – v horních částech údolí má příčný profil tvar písmene V, zatímco dolní části údolí má profil tvar písmene U. Jednotlivá údolí se v průběhu toku postupně spojují, vytváří rozsáhlou údolní síť (obr. 22 a 23), která často ústí deltou do místní topografické deprese, která byla obvykle v minulosti jezerem nebo v případě severní polokoule oceánem (Baker et al. 1992). Na dnech údolí byly často identifikovány sedimenty a akumulární tvary, které byly postupně vytvářeny činností vody. Nejsou však přímo zjištěny u všech údolních sítí, protože v některých případech jsou zakryty eolickými

sedimenty. Eolická činnost byla a je i v současné době na Marsu velmi intenzivní, a proto se většina údolí nebo údolních sítí nedochovala v původní podobě (Baker et al. 1992). Období vzniku údolních sítí nelze zatím přesněji určit, většina z nich však vznikla před 4 – 3,7 miliardami let. Je prokázáno, že se údolní síť (obr. 22) vytvářela činností vody i po skončení období Noachian. Nápadné a nejlépe pozorovatelné jsou údolní sítě, které se vyskytují v oblastech velkých pánví. Jedná se např. o údolní síť v pánvi Hellas, v oblasti Terra Cimmeria (příloha 1) a v oblasti Arabia (příloha 1, Baker et al. 1992).

V prvních etapách výzkumu Marsu byla činnost vody jako faktor vzniku údolí zpochybňována a za hlavní činitele byly označovány vulkanická činnost, působení ledu z oxidu uhličitého, eroze lávou nebo větrem. Názory na vznik údolí na Marsu činností tekoucí vody však již potvrzuje řada údajů. Údolní sítě na Marsu jsou často stovky i tisíce kilometrů dlouhé, k jejich vzniku je tedy potřeba tekoucí kapalná látka s přiměřenou viskozitou. U některých částí údolních sítí je také nápadný jejich vývoj v podobě meandrů a systém údolí obvykle končí ústím s rozsáhlou deltou uložených akumulací (Baker et al. 1992). Tekoucí voda, která popsané údolní sítě vytvářela, pocházela pravděpodobně z atmosférických srážek nebo z podzemních vod.

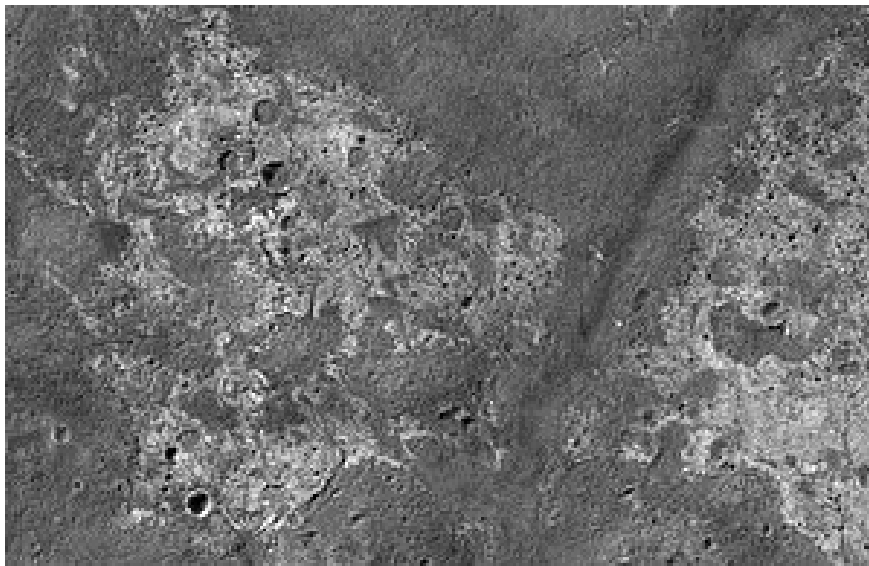
Na obrázku 22 je vidět síť údolí v oblasti Arabia Terra (příloha 1), která je značně rozvětvená a svažuje se směrem zleva doprava. Jedná se o koryto zaniklé řeky, která ústila do oceánu.

Obrázek 22: Říční síť v oblasti Arabia Terra



Zdroj: <https://www.revolvy.com/page/Arabia-Terra>

Obrázek 23: Údolní síť v oblasti Candor Chasma



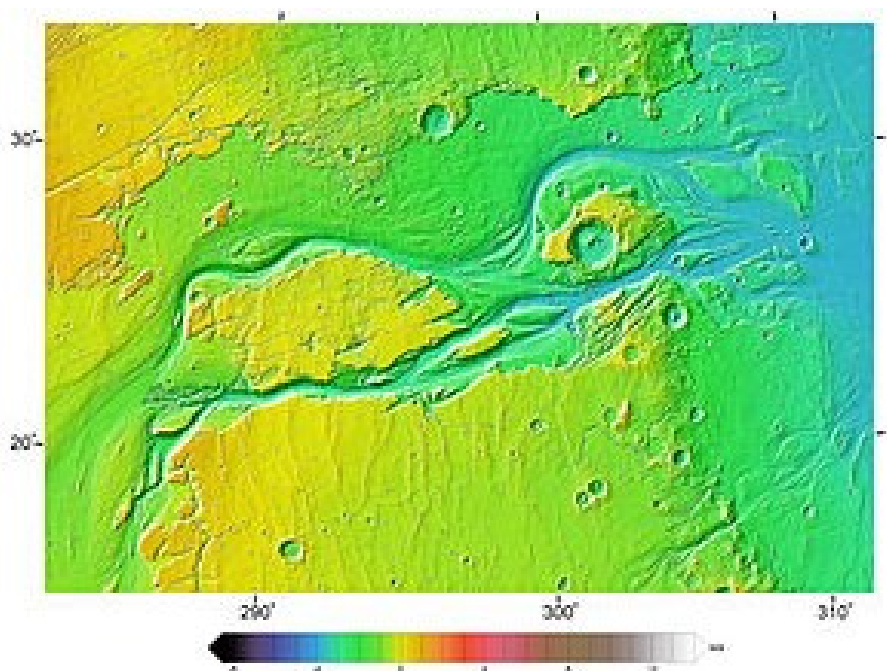
Zdroj: [http://www.ncrworks.com/learn?s=Valley\\_networks\\_\(Mars\)](http://www.ncrworks.com/learn?s=Valley_networks_(Mars))

Odtokové kanály (obr. 24) jsou velmi dlouhé a poměrně široké útvary na povrchu Marsu. Jejich šířka obvykle přesahuje jeden kilometr a dosahují délky od stovek do tisíců kilometrů. Největší z nich, Kasei Vallis (příloha 1), je dlouhý 3500 km, široký 400 km a dosahuje hloubky přibližně 2,5 km. Odtokové kanály vznikly v období pozdního Hesperianu (Baker et al. 1992). Na jejich vzniku se podílely rozsáhlé povodně, které v tomto období na Marsu probíhaly. V morfologických projevech těchto



povodní je i určitá podobnost se záplavovými tvary na povrchu Země. Popsaná odtoková koryta postrádají přítoky a jsou typická pro několik oblastí na povrchu Marsu (Sharp et al. 1975). Nejlépe jsou dosud dokumentována odtoková koryta v blízkém okolí pánví Chryse a Acidalia (příloha 1), v západní části vulkánu Elysium (příloha 2), ve východní části pánve Hellas (příloha 2) a na západním a jižním okraji Amazonis Planitia (příloha 2).

Obrázek 24: Odtokové kanály v oblasti Echus Chasma



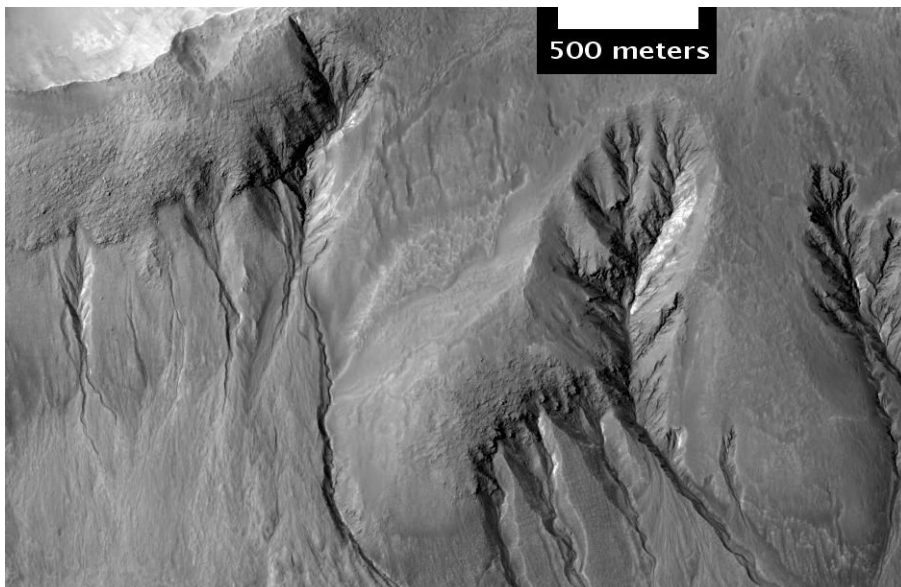
Zdroj:

<https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/astronomie-video-mars-plongee-vallee-geante-kasei-valles-51622/>

Dalšími výraznými tvary na povrchu Marsu, které mohou být spojovány s činností vody, jsou erozní rýhy a stružky (obr. 25). Jsou to menší lineární útvary, které se vyskytují nejčastěji na stěnách impaktních kráterů, kde se spojují do spletitých sítí (Sharp et al. 1975). Tyto rýhy a stružky mají většinou dendrický tvar, jejich horní části jsou rozšířené a směrem dolů vybíhá úzký a postupně se rozšiřující kanál. Stružky jsou považovány za poměrně mladé útvary, vyskytují se pouze na svazích

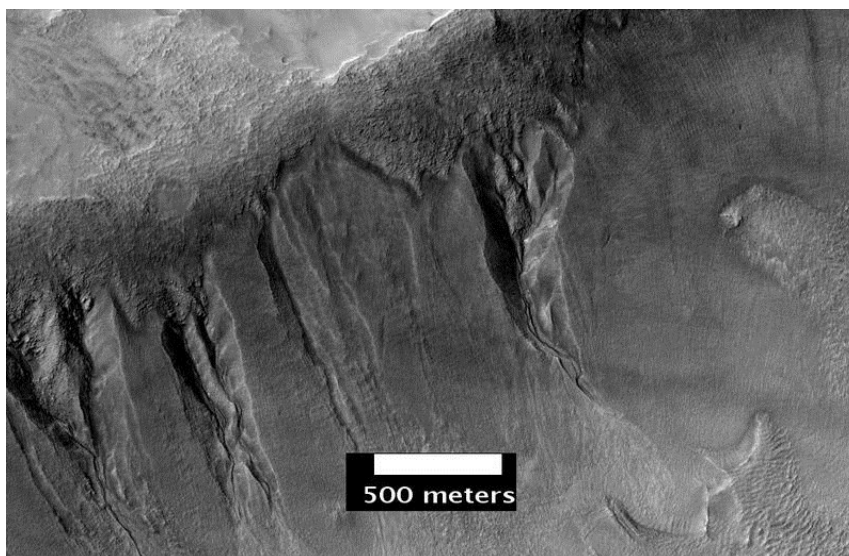
u některých kráterů a na písečných dunách (Sharp et al. 1975). Rýhy a stružky se vyskytují na obou polokoulích Marsu, bylo jich objeveno již několik tisíc, a na stěnách kráterů se rozbíhají všemi směry. Na severní polokouli byly zjištěny zejména v oblastech Arcadia Platinia, Acidalia Platinia, Utopia Platina a Tempe Terra (příloha 1) a na jižní polokouli v oblastech Hellas, Argyre nebo Noachis Terra (Sharp et al. 1975). Vznik stružek (obr. 26) za pomoci tekoucí vody je však také zpochybňován (Carr et al. 2010) a dosud nebylo dostatečně prokázáno jejich vytváření činností tekoucí vody. Stružky na svazích pravděpodobně mohly vznikat sublimací oxidu uhličitého. Výskyt procesů sezónního rozmrazování ukazuje, že sublimovaný oxid uhličitý může být příčinou vzniku identifikovaných rýh a stružek (Carr et al. 2010).

Obrázek 25: Erozní stružky v oblasti Argyre Platinia



Zdroj: <http://fracademic.com/dic.nsf/frwiki/1826581>

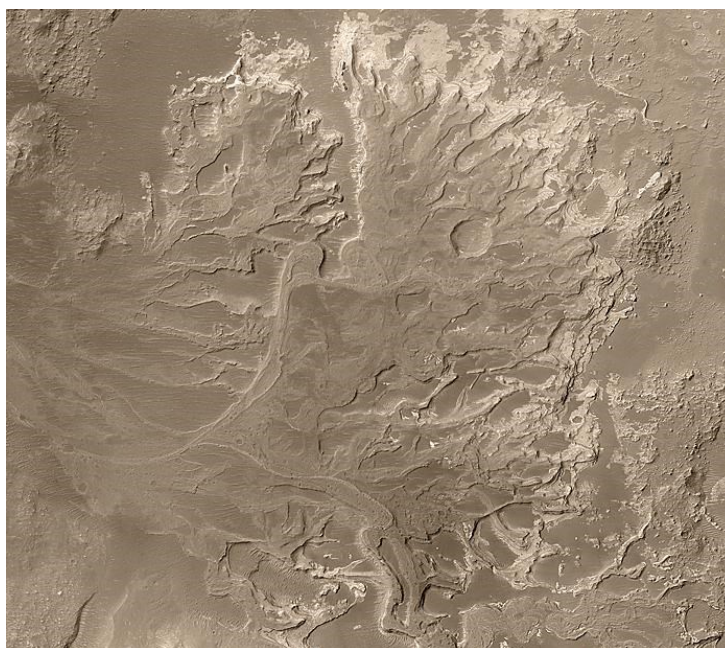
Obrázek 26: Stružky na okraji kráteru Newton



Zdroj: [https://howlingpixel.com/i-en/Water\\_on\\_Mars](https://howlingpixel.com/i-en/Water_on_Mars)

Na obrázku 27 je zachycen deltový komplex na okraji kráteru Eberswalde v oblasti Margarifiter Terra (příloha 1), který byl v minulosti jezerem. Tento snímek byl pořízen družicí Mars Surveyor. Deltové útvary vznikly činností tekoucí vody, která přitékala říčním systémem do kráteru Eberswalde.

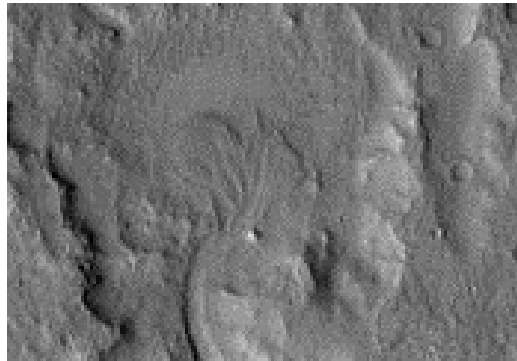
Obrázek 27: Deltové útvary na okraji kráteru Eberswalde



Zdroj: <https://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/details.php?id=PIA04293>

Znázorněná delta (obr. 28) ukazuje na přítomnost zaniklých jezer v oblasti Margaritifer Sinus quadrangle (příloha 1). Deltové útvary se vyskytují na okraji velkého impaktního kráteru. Tento snímek byl pořízen družicí THEMIS.

Obrázek 28: Deltové útvary v oblasti Margaritifer Sinus quadrangle

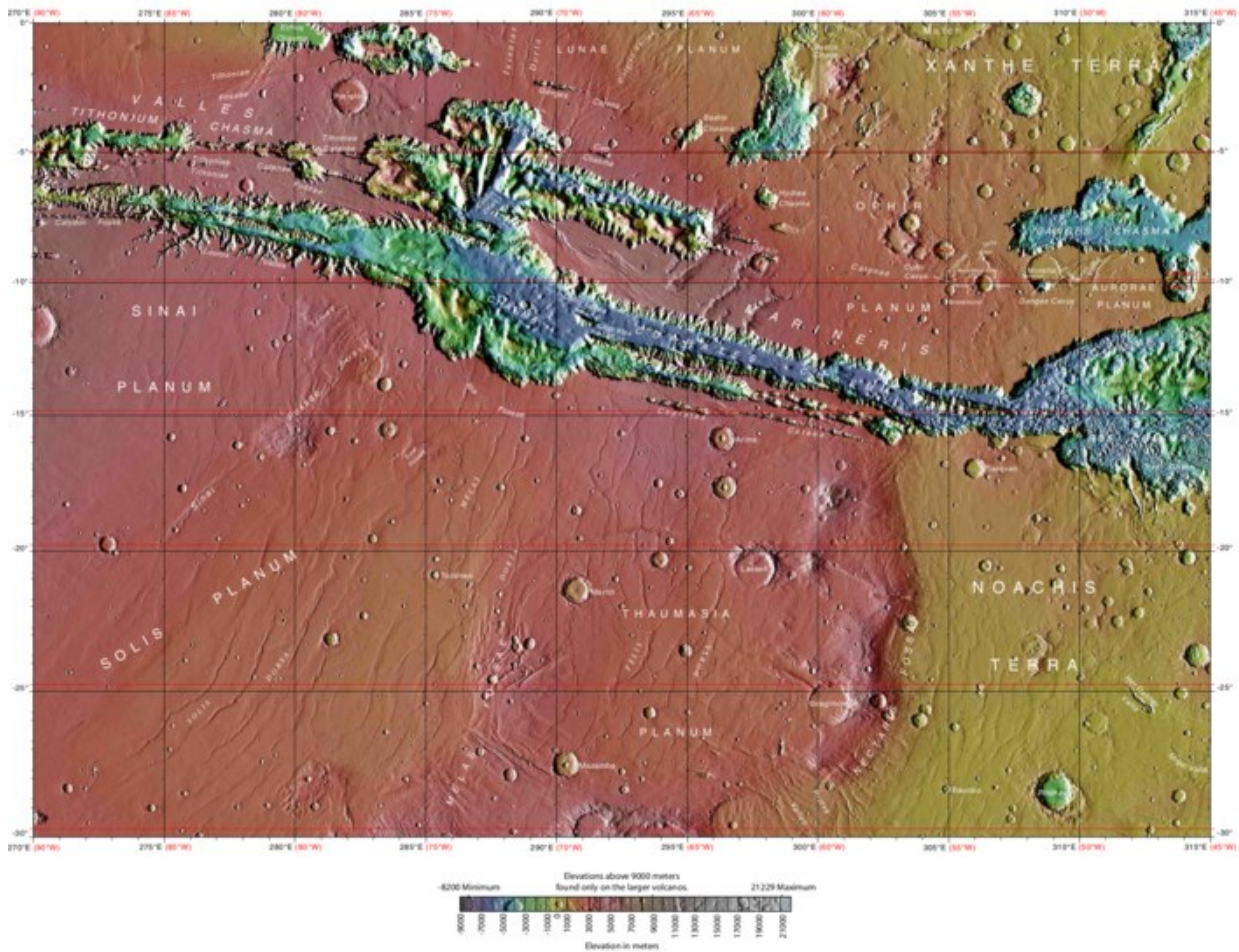


Zdroj:

<http://www.dvd-game-new-releases.info/skin/how-are-alluvial-fans-and-deltas-formed.akp>

Valles Marineris (obr. 29) je oblast na jižní polokouli Marsu, která je charakteristická velmi rozsáhlým systémem kaňonů vytvořených tekoucí vodou. Tento systém zahrnoval také jezera (Caleb et. al. 2008), která byla mezi sebou propojena systémem kaňonů podobně, jako některé jezerní pánve na Zemi. Průzkum pomocí přístroje HIRISE byl v této oblasti prováděn zejména ve dvou největších kaňonech Candor Chasma a Juventae Chasma, ve kterých byly identifikovány sedimenty obsahující sírany a chloridy odkazující na činnost vody (Caleb et. al. 2008).

Obrázek 29: Valles Marineris

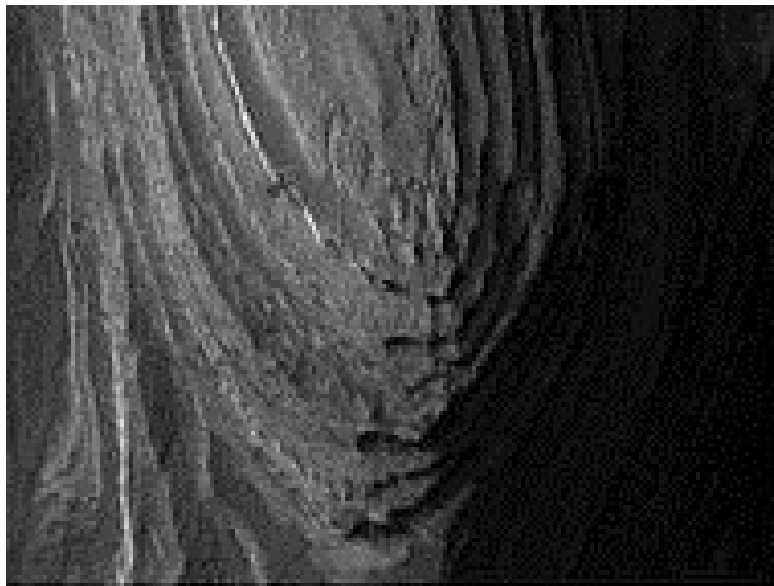


Zdroj: [https://Lakes\\_on\\_Mars#/media/File:USGS-Mars-MC-18-CopratesRegion-mola.png](https://Lakes_on_Mars#/media/File:USGS-Mars-MC-18-CopratesRegion-mola.png)

Pánev Hellas (příloha 2) je označována jako oblast s největším potenciálním povodím, které se na Marsu vyskytovalo. Větší rozlohu měl v minulosti pouze oceán na severní polokouli. Největší jezero v této oblasti vzniklo v impaktním kráteru Terby, který vznikl před 3,9 miliardami let (Crown et. al. 1992). Indicie, které svědčí o přítomnosti jezer a vodních toků v této oblasti jsou především břehové linie na okrajích kráteru nebo útvary, které jsou na břehové linie navázány. Na dně tohoto impaktního kráteru lze pozorovat vrstvy sedimentárních hornin (obr. 30), které byly díky značné erozní činnosti odkryty, což bylo pozorováno přístrojem Mars Reconnaissance Orbiter (Silverman 2017). Směrem ke kráteru také směřuje systém údolí dávného říčního systému, který velké jezero naplňoval vodou. Pro tuto oblast je také typická vulkanická činnost, jezera

zde na konci Noachianu zamrzala později než v dalších územích Marsu, protože voda v nich byla zahřívána geotermální energií a přítomnými výlevy magmatu (Crown et. al. 1992).

Obrázek 30: Sedimentární horniny v pánvi Hellas



Zdroj: [https://wikivisually.com/lang-it/wiki/Categoria:Maglia\\_MC-21](https://wikivisually.com/lang-it/wiki/Categoria:Maglia_MC-21)

## 5 DISKUSE

Na povrchu Marsu lze v současné době identifikovat velké množství povrchových tvarů (např. sítě kaňonů, deprese na severní polokouli, deltové útvary atd.), které byly vytvořeny činností vody. Pro výskyt vody na Marsu bylo v minulosti jednoznačně nejvhodnější období Noachian (4,1 až 3,7 miliardy let před současností). Voda se však na povrchu planety vyskytovala během celé její historie (obr. 31) a po celou dobu také na její povrch působila (Carr et. al. 2011). Podle dosavadních indicií lze předpokládat, že v Noachianu se na povrchu planety vyskytovaly rozsáhlé vodní plochy podobné oceánům na Zemi, a dále plochy podobné jezerům. Na Marsu se vyskytovala říční síť nebo hydrotermální cirkulace vody pod povrchem (Di Achille et. al. 2010). Všechny tyto jevy a procesy spojené s činností vody se podílely na vytváření povrchu planety. Navíc zde působila voda v pevné fázi, a to v útvarech podobným ledovcům na Zemi (Di Achille et. al. 2010).

Již v době vzniku planety byla voda ve stopovém množství přítomna v atmosféře jako její plynná složka. Počátkem Noachianu (přibližně 4,1 miliardy let před současností) se teplota planety snížila natolik, že se voda mohla na Marsu vyskytovat i v jiném, než plynném stavu (Carr et. al. 2011). Nejstarší indicie činnosti vody v kapalném stavu na povrchu planety jsou právě z této doby.

Na počátku Noachianu vznikl díky výskytu vody v kapalném stavu oceán na severní polokouli planety, který dostal název Oceanus Borealis. Jeho vznik je datován do doby 4,1 miliardy let před současností (Příhoda 2002). Základní indicie, které svědčí o výskytu oceánu na severní polokouli Marsu, jsou především specifické složení minerálů, vyskytující se v oblasti Vastitas Borealis (příloha 1), zarovnaný povrch severní polokoule velmi dobře pozorovatelný i v současné době, rozsáhlá deprese a také útvary

nacházející se na jejích okrajích (obr. 7), připomínající oceánské pobřeží na Zemi (Di Achille et. al. 2010). Další indicií přítomnosti oceánu na Marsu je výskyt útvarů, které jsou podobné říčním deltám na Zemi. Jsou součástí zóny Arabia a jsou na ně navázány hluboké a rozsáhlé sítě kaňonů. Přítomnost oceánu na Marsu rovněž dokazuje jak chemické složení povrchu deprese na severní polokouli, tak chemické složení povrchu podél obou pobřežních linií (obr. 6). Oceán se na severní polokouli vyskytoval během celého Noachianu a pravděpodobně i po jeho skončení. Povrchové útvary vzniklé díky jeho přítomnosti jsou tak velmi časté, a dobře pozorovatelné i v současné době.

Během Noachianu probíhalo silné bombardování povrchu Marsu impaktory, a vznikly tak velké impaktní krátery (Tanaka 1986). Krátce po vzniku oceánu na severní polokouli planety začala po celé planetě vznikat také jezera. Dna některých kráterů byla postupně zčásti nebo úplně zaplněna vodou. Nejnápadnější indicií, která odkazuje na přítomnost jezer, je výskyt delt a kaňonů (obr. 9) podobných těm, které byly identifikovány u břehových linií okraje zaniklého oceánu na severní polokouli (Horton et. al. 1996). Další indicií jsou okraje kráterů připomínající břehové zóny (obr. 9). Důkazem existence jezer je rovněž přítomnost minerálů vytvářených činností vody, jako jsou sírany, chloridy, karbonáty nebo jílové materiály (obr. 9). Reliktem výskytu jezer jsou také konglomeráty (slepence) a sedimenty na dně jezer, zformované činností přítékající vody (obr. 10, Grotzinger et. al. 2014). Míra zachování povrchových tvarů po původních jezerech se liší. Na povrchu Marsu totiž působí i eolická činnost, povrch některých menších jezer byl překryt sedimenty a útvary na okrajích kráterů byly přemodelovány. Lze však identifikovat krátery s dobře zachovalými deltovými útvary, údolními systémy nebo břehovými liniemi. Typickými příklady jsou kráter Gale a kráter Eridian.

Díky významnému množství vody v plynném stavu v atmosféře a v kapalném stavu v oceánu na severní polokouli a v jezerech na celé



planetě začal v průběhu Noachianu vznikat aktivní hydrologický systém. Hlavními projevy činnosti tekoucí vody na povrchu Marsu jsou výskyty odtokových kanálů a údolních sítí. Tyto nápadné povrchové tvary vytvářejí rozsáhlé systémy téměř na celé planetě. (Sharp et al. 1975). Je prokázáno, že se údolní síť (obr. 22) vytvářela činností vody i po skončení období Noachian. Nejlépe pozorovatelné jsou údolní sítě, které se vyskytují v oblastech velkých pánví (Baker et al. 1992). Odtokové kanály, jež jsou dalším důkazem přítomnosti aktivního hydrologického systému, vznikly v období pozdního Hesperianu (Baker et al. 1992). Na jejich vzniku se podílely také rozsáhlé povodně, které v tomto období na Marsu probíhaly. Všechny uvedené povrchové útvary jsou dobře pozorovatelné a vyskytují se téměř na celé planetě.

Dalšími výraznými tvary na povrchu Marsu, které mohou být spojovány s činností vody, jsou erozní rýhy a stružky (obr. 25), které se vyskytují nejčastěji na stěnách impaktních kráterů, kde se spojují do spletitých sítí (Sharp et al. 1975). Vznik stružek (obr. 26) za pomoci tekoucí vody byl však později zpochybněn, pravděpodobně vznikly sublimací oxidu uhličitého (Carr et al. 2010). Deltové útvary vznikly činností tekoucí vody, která přitékala říčním systémem a nachází se obvykle na okrajích impaktních kráterů nebo v břehových zónách dávného oceánu. Oblast s největším potenciálním povodím, které se na Marsu vyskytovalo, je pánev Hellas. Větší rozlohu povodí měl v minulosti pouze oceán na severní polokouli. Aktivní hydrologický systém na Marsu tedy byl v minulosti velmi rozsáhlý (Crown et al. 1992).

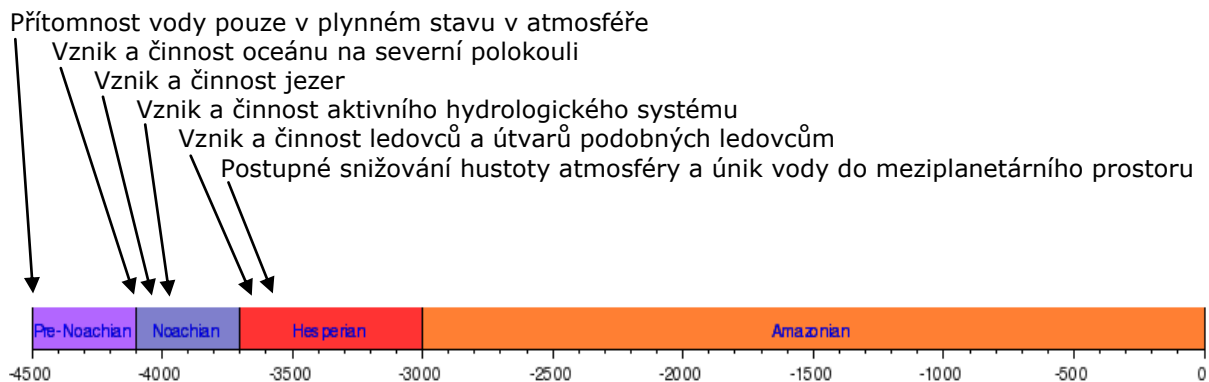
Vlivem postupného snižování teploty atmosféry planety Mars během Hesperianu se kapalná voda v oceánu, jezerech i v jiných povrchových útvarech postupně přeměnila v led. Led na Marsu se v současné době vyskytuje pouze v omezeném množství, většina je vázána v polárních čepičkách (Příhoda 2002). Menší ledové plochy lze pozorovat na svazích kráterů, které se nachází v blízkosti pólů (Sharp 2017). Ledové hmoty od počátku Hesperianu dlouhodobě působily na povrch Marsu, a proto se

v současnosti na Marsu nachází mnoho morfologických reliktních zalednění (Sharp 2017). Od konce Noachianu docházelo k sublimaci ledu, a tedy k jeho postupnému uvolňování v plynné formě do atmosféry. Pozůstatkem po původním ledovém pokryvu je členitý terén s vyvýšeninami a mělkými depresiemi (obr. 16), přičemž tyto deprese a vyvýšeniny mohou být i několik tisíc kilometrů dlouhé.

Dalšími projevy činnosti ledu, které jsou pozorovány na povrchu Marsu, jsou tzv. ledové skvrny nebo pozůstatky po skalních ledovcích (obr. 18), jejichž přítomnost je doložena nahromaděným materiálem označovaným jako „lobate debris apron“. Zajímavými tvary jsou také polygonálních útvarů (obr. 20) na zarovnaném povrchu (Colaprette et. al. 1998). Glacigenní a periglaciální tvary se vyskytují na celém povrchu Marsu, což svědčí o značném rozsahu zalednění v obdobích Hesperian a Amazonian.

Zásluhou rozsáhlých badatelských projektů (např. Mars Science Laboratory, Mars Atmosphere and Volatile Evolution atd.), podpořených mimořádným rozvojem kosmických technologií, je prokázáno, že projevy činnosti vody na Marsu jsou velmi rozmanité. Tyto projevy shrnuje tabulka 2 a lze je pozorovat téměř na celém povrchu této terestrické planety, jak je možné vidět v přílohách 1 a 2. Vznik většiny povrchových útvarů spojených s výskytem a činností vody na Marsu lze datovat do období Noachian, v případě odtokových kanálů nebo tvarů vzniklých činností ledu pak do období Hesperian. Významné změny přírodního prostředí v dlouhodobé historii této planety byly příčinou jak rozmanitosti morfologických projevů působení vody, tak jejich polygenetickými rysy a rozsahem jejich zachování do současné doby.

Obrázek 31: Časové schéma morfologických projevů výskytu a činnosti vody na Marsu  
(Údaje na časové přímce jsou uvedeny v milionech let.)



Zdroj: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Mars\\_\(planeta\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Mars_(planeta)), revidováno s (Carr. et. al. 2011)  
a autorsky doplněno popisem projevů

Tabulka 2: Morfologické indicie činnosti vody na povrchu Marsu

Typ morfologické činnosti	Projevy morfologické činnosti
Činnost oceánu (Noachian – Hesperian)	Specifické složení minerálů Deprese na severní polokouli Zarovnaný povrch Břehové linie Arabia a Deuteronilus Deltové útvary Navázaná síť kaňonů a údolí Chemické složení povrchu
Činnost jezer (Noachian – Hesperian)	Deltové útvary Kaňony Břehové linie Specifické složení minerálů Slepence a sedimenty na dně Chemické složení povrchu
Činnost tekoucí vody (Noachian – Amazonian)	Odtokové kanály Kaňony Údolní síť
Činnost vody v pevném stavu (Hesperian – Amazonian)	Členitý terén Vyvýšeniny Deprese Ledové skvrny Pozůstatky po skalních ledovcích Polygonální struktury povrchu

## 6 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo na základě studia odborné literatury předložit přehled o současném stavu výzkumů morfologických indicií činnosti vody na povrchu Marsu, tyto projevy vyhodnotit a charakterizovat. Projevy činnosti vody na Marsu jsou jednotlivě lokalizovány, charakterizovány a jsou zařazeny do historického kontextu vývoje přírodních podmínek planety. Pomocí rešeršní práce byly popsány povrchové útvary, které byly vytvořeny působením vody v plynném, kapalném nebo pevném skupenství. Tvary povrchu a hlavní známé oblasti jejich výskytu byly dokumentovány pomocí dvou přehledných map, byla popsána jejich geneze a jejich postavení v přírodním prostředí planety Mars. Mapy povrchu Marsu byly získány z dostupných internetových zdrojů a jejich relevantnost zkontrolována s odbornou literaturou.

V předložené práci bylo uvedeno mnoho indicií, které dokazují přítomnost vody na Marsu v minulosti ve všech třech skupenstvích, přičemž nebyla vyloučena její přítomnost i v současné době. Charakterizované útvary na povrchu planety jsou velmi rozmanité, jejich velikost je značně rozdílná a byly lokalizovány po celém povrchu planety. Historické období Marsu, ve kterém se činnost vody projevovala nejvíce, byl Noachian, působení vody na povrchové útvary však pokračovalo i po jeho skončení.

V práci byly při dokumentaci vybrány nejnápadnější povrchové útvary a indicie činnosti vody uváděné v odborných publikacích, na povrchu planety Mars jich ale můžeme v současné době identifikovat mnohem více. Na utváření povrchových útvarů se nejvíce podílela činnost oceánu, jezer, tekoucí vody a vody v pevném stavu (tabulka 2). U některých tvarů povrchu byla zdůrazněna určitá podobnost s tvary a projevy činnosti vody na povrchu Země. Vývoj a současný stav přírodního prostředí na Marsu a na Zemi jsou však podstatně rozdílné. Dosavadní poznatky o Marsu

svědčí o tom, že množství vody na této planetě terestrického typu se v dlouhodobém trendu od Noachianu do mladšího Amazoninu zmenšuje.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

BAKER, D. M. et. al. (2009): The Origin of Eridania Lake and Ma'adim Vallis: An Investigation of Closed Chaos Basins, Hesperian Ridged Plains, and Tectonic Constructs on the Floor of a Large Hypothesized Paleolake on Mars. *Lunar and Planetary Science*, 1835, 23–27.

BAKER, V. R. et. al. (1992): Channel and valley network. University of Arizona Press, *Space Science Series*, 493–522.

BROŽ, P. et. al. (2012): Hydrovolcanic tuff rings and cones as indicators for phreatomagmatic explosive eruptions on Mars. *Journal of Geophysical Research*, 118, 1656-1675.

CALEB, I. F. et. al. (2008): Valley network-fed, open-basin lakes on Mars: Distribution and implications for Noachian surface and subsurface hydrology. *Icarus*, 198, 37–56.

CARR, M. H. et. al. (2010): Geological history of Mars. *Earth and Planetary Science Letters*, 294, 3–4, 185–203.

CARR, M. H. et. al. (1986): Geomorphic Evidence for the Distribution of Ground Ice on Mars. *Science*, 17, 249–252.

COLAPRETE, A. et. al. (1998): Ice flow and rock glaciers on Mars. *Journal of Geophysical Research*, 103, 5897–5909.

CROWN, D. A. et. al. (1992): Geologic evolution of the east rim of the Hellas basin, Mars. *Icarus*, 100, 1–25.

DAŇHELOVÁ A. (2008): Přírodní prostředí planety Mars. Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, katedra fyzické geografie a geoekologie, Praha, s. 44.

DI ACHILLE, G. et. al. (2010): Ancient ocean on Mars supported by global distribution of deltas and valleys. *Nature Geoscience*, 3, 459–463.

EHLMANN, L. B. et. al. (2011): Subsurface water and clay mineral formation during the early history of Mars. *Nature*, 479, 53–60.

FARMER, C. B. et. al. (1977): Mars: Water vapor observations from the Viking orbiters. *Journal of Geophysical Research*, 82, 4225–4248.

GOUDGE, T. A. et. al. (2015): Assessing the mineralogy of the watershed and fan deposits of the Jezero crater paleolake system, Mars. *Journal of Geophysical Research*, 120, 775–808.

GROTZINGER, J. P. et. al. (2014): A Habitable Fluvio-Lacustrine Environment at Yellowknife Bay, Gale Crater, Mars. *Science*, 343, 124–277.

HARTMANN, W. K. et. al. (2000): Elysium Planitia lava flows: Crater count chronology and geological implications. *Journal of Geophysical Research*, 105, 15011–15025.

HORTON, E. N. et. al. (1996): Impact crater lakes on Mars. *Journal of Geophysical Research*, 101, 14951–14955.

CHRISTENSEN, P. R. et. al. (2001): Global mapping of Martian hematite mineral deposits: Remnants of water-driven processes on early Mars. *Journal of Geophysical Research*, 106, 23873–23885.

IVANOV, M. A. et. al. (2017): Topography of the Deuteronilus contact on Mars: Evidence for an ancient water/mud ocean and long-wavelength topographic readjustments. *Planetary and Space Science*, 144, 49–70.

JOHNSON, F. S. et. al. (1965): Atmosphere of Mars. *Science*, 150, 1445–1448.

MALTAGLIATI, L. et. al. (2011): Evidence of water vapor in excess of saturation in the atmosphere of Mars. *Science*, 333, 1868–1871.

MARTIN–TORRES, F. J. et. al. (2015): Transient liquid water and water activity at Gale crater on Mars. *Nature Geoscience*, 8, 357–361.

MUSTARD, J. F. et. al. (2008): Hydrated silicate minerals on Mars observed by the Mars Reconnaissance Orbiter CRISM instrument. *Nature*, 454, 305–309.

OWEN, T. et. al. (1977): The composition of the atmosphere at the surface of Mars. *Journal of Geographical Research*, 82, 4635–4639.

POULET, F. et. al. (2005): Phyllosilicates on Mars and implications for early Martian climate. *Nature*, 438, 623–627.

PŘÍHODA, P. (2002): Planety zemského typu z pohledu nových kosmonautických výzkumů. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, 47, 2, 89 -102.

SHARP, P. R. et. al. (1975): Channels on Mars. *GSA Bulletin*, 86, 593–609.

SHARP, P. R. (2017): Ice on Mars. *Journal of Glaciology*, 13, 173–185.

SHEEHAN, W. (1996): The planet Mars: A history of observataion and discovery. The University of Arizona Press, United States of America, 3. edition.

SILVERMAN, B. (2017): Mars Missions: A Space Discovery Guide. Lerner Publishing Group, Minneapolis USA.

TANAKA, L. K. (1986): The stratigraphy of Mars. *Journal of Geophysical Research*, 91, 139–158.

WHITEWAY, J. A. et. al. (2009): Mars Water-Ice Clouds and Precipitation. *Science*, 325, 68–70.



ZUBER, T. M. et. al. (2010): Early Mars hydrology: Meridiani playa deposits and the sedimentary record of Arabia Terra. *Journal of Geophysical Research*, 115, 73–83.

ZUREK, R. W. et. al. (1992): Dynamics of the atmosphere of Mars. *Mars*, 93, 835–933.

ŽÍŽALOVÁ, I. (2016): Hlavní formy reliéfu Marsu a jejich význam pro sledování dynamiky a vývoje jeho povrchu. Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, katedra fyzické geografie a geoekologie, Praha, s. 57.

### **Internetové zdroje**

Arabia Terra [online]. Dostupné z: <https://www.revolvvy.com/page/Arabia-Terra> [21.5.2018].

Arabia Terra – layer sbutte [online]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Arabia\\_Terra#/media/File:47421\\_1890layer\\_sbutte.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Arabia_Terra#/media/File:47421_1890layer_sbutte.jpg) [20.5.2018].

Atmosféra Marsu [online]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Atmosf%C3%A9ra\\_Marsu](https://cs.wikipedia.org/wiki/Atmosf%C3%A9ra_Marsu) [19.4.2018].

Branched Gullies [online]. Dostupné z: <https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/astronomie-video-mars-plongee-vallee-geante-kasei-valles-51622/> [19.5.2018].

Branches Channels of Viking [online]. Dostupné z: [http://grazinspace.oeaw.ac.at/2016/2010/presentations/Kargl\\_-\\_Mars\\_Fernerkundung\\_GiS2010.pdf](http://grazinspace.oeaw.ac.at/2016/2010/presentations/Kargl_-_Mars_Fernerkundung_GiS2010.pdf) [22.5.2018].

Candor Channels [online]. Dostupné z: [http://www.ncrworks.com/learn?s=Valley\\_networks\\_\(Mars\)](http://www.ncrworks.com/learn?s=Valley_networks_(Mars)) [22.5.2018].

Corporates Region – mola [online]. Dostupné z:  
[https://Lakes\\_on\\_Mars#/media/File:USGS-Mars-MC-18-CopratesRegion-mola.png](https://Lakes_on_Mars#/media/File:USGS-Mars-MC-18-CopratesRegion-mola.png) [28.4.2018].

Curiosity Rover – Rock Outcrops [online]. Dostupné z:  
<https://tema.aktuality.sk/nasa/> [21.5.2018].

Deep Gullies [online]. Dostupné z:  
<http://fracademic.com/dic.nsf/frwiki/1826581> [10.5.2018].

Deep Gullies – Water on Mars [online]. Dostupné z:  
[https://howlingpixel.com/i-en/Water\\_on\\_Mars](https://howlingpixel.com/i-en/Water_on_Mars) [12.5.2018].

Delta in Margaritifer Sinus [online]. Dostupné z: <http://www.dvd-game-new-releases.info/skin/how-are-alluvial-fans-and-deltas-formed.akp>  
[18.5.2018].

Eberswalde delta in high resolution [online]. Dostupné z:  
<https://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/details.php?id=PIA04293>  
[19.5.2018].

Eridania Depths – Lakes on Mars [online]. Dostupné z:  
<https://www.avaruus.fi/uutiset/astrobiologia/raju-tulos-mars-luotaimelta-muinaisen-meren-alueella-on-toiminut-kuumia-lahteita.html> [25.4.2018].

Mars Glaciers [online]. Dostupné z:  
[https://wikivividly.com/wiki/Martian\\_dichotomy](https://wikivividly.com/wiki/Martian_dichotomy) [11.5.2018].

Glacier close up hirise [online]. Dostupné z:  
<https://glaciersonmars.com/research/> [10.5.2018].

Ismenius Lacus [online]. Dostupné z:  
<https://logiclogiclogic.wordpress.com/2016/05/30/mars-missions-3-6-start-farming-mining-and-looking-at-habitat-construction/> [30.4.2018].

Jezero Crater – Delta [online]. Dostupné z:  
[https://www.nasa.gov/mission\\_pages/msl/multimedia/pia15097.html#.W1iFO9IzbIU](https://www.nasa.gov/mission_pages/msl/multimedia/pia15097.html#.W1iFO9IzbIU) [13.5.2018].

Lakes on Mars [online]. Dostupné z: [https://wikivisually.com/lang-it/wiki/Categoria:Maglia\\_MC-21](https://wikivisually.com/lang-it/wiki/Categoria:Maglia_MC-21) [22.5.2018].

Lakes on Mars – Mars Curiosity Rover [online]. Dostupné z:  
<https://www.popularmechanics.com/space/moon-mars/news/a17707/mars-curiosity-lakes/> [26.4.2018].

Mars by N. Murphy [online]. Dostupné z:  
<https://www.haikudeck.com/mars-uncategorized-presentation-JGOt1NurwA> [7.5.2018].

Mars: Evolution of an Earth – Like World [online]. Dostupné z:  
<https://www.nap.edu/read/13117/chapter/9> [14.5.2018].

Mars Glacial – like lobe deposit [online]. Dostupné z:  
<https://www.weltdersphysik.de/gebiet/universum/news/2008/eiszeiten-auf-dem-mars/> [3.5.2018].

Mars – Planeta [online]. Dostupné z:  
[https://cs.wikipedia.org/wiki/Mars\\_\(planeta\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Mars_(planeta)) [20.4.2018].

Martian north polar cap [online]. Dostupné z:  
<http://www.spaceflightinsider.com/missions/solar-system/mars-hydrothermal-deposits-hint-habitable-conditions/> [17.5.2018].

Natural history museum [online]. Dostupné z:  
<https://core.ac.uk/download/pdf/141204761.pdf> [17.5.2018].

New Evidence for Ancient Martian Ocean [online]. Dostupné z:  
<http://www.skyandtelescope.com/astronomy-news/new-evidence-for-ancient-martian-ocean/> [13.5.2018].

Noachian, Hesperian, and Amazonian, Mars Geologic Time Scale [online].  
Dostupné z: <http://www.planetary.org/blogs/emily-lakdawalla/2013/10251246-noachian-hesperian-amazonian.html>  
[21.4.2018].

Polygons – Deuteronilus Mensae [online]. Dostupné z:  
[https://wikivividly.com/wiki/Martian\\_dichotomy](https://wikivividly.com/wiki/Martian_dichotomy) [19.5.2018].

Scalloped Terrain Led to Finding of Buried Ice on Mars [online]. Dostupné  
z: <https://cz.pinterest.com/pin/546835579739253760/> [20.5.2018].

### **Zdroje příloh**

Mapa povrchu Marsu [online]. Dostupné z:  
<https://www.stoplusjednicka.cz/tajemstvi-rude-planety-povrchove-extremy-marsovych-sopek-kanonu> [22.5.2018].

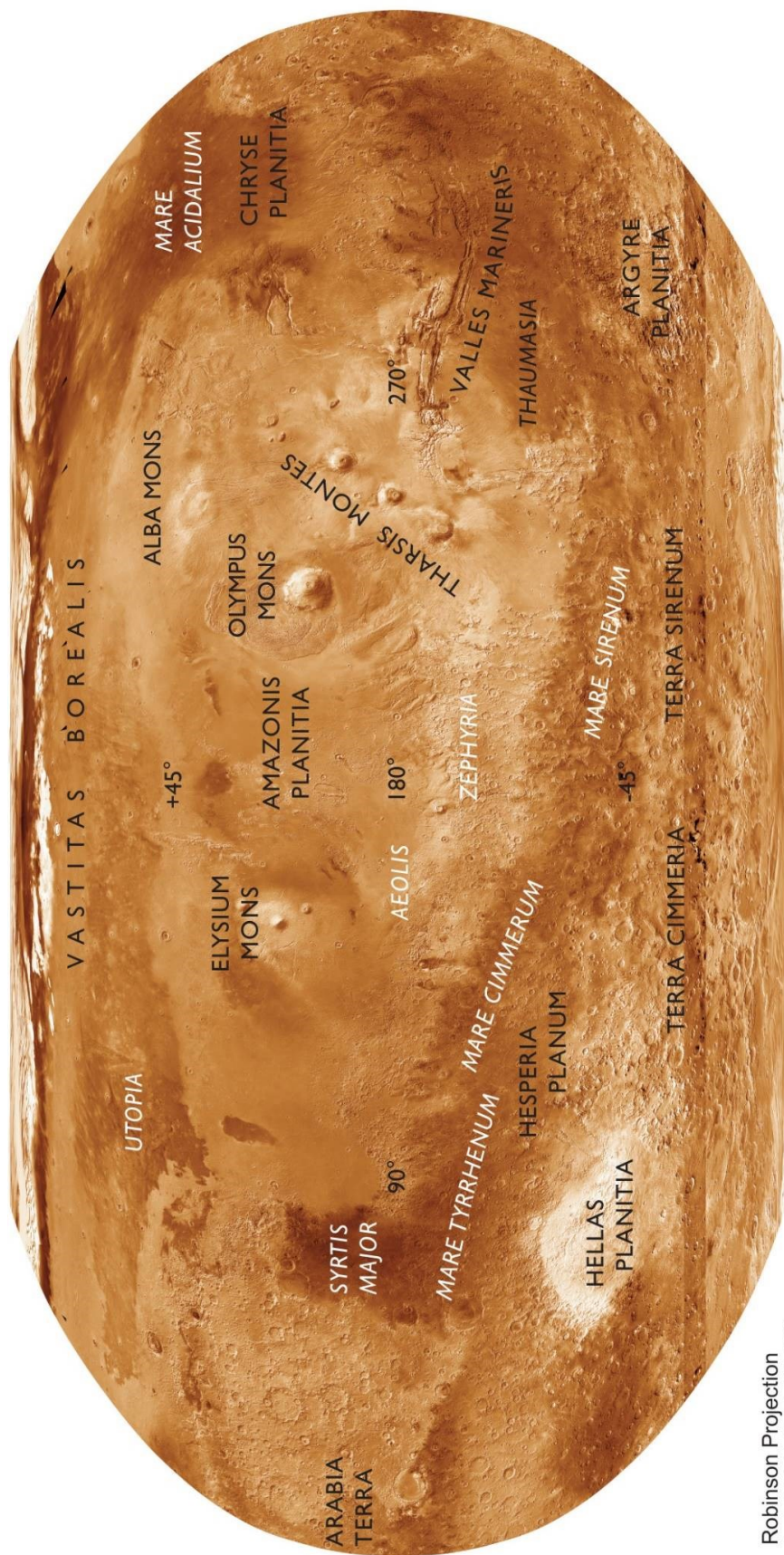
Základní orografické členění povrchu Marsu [online]. Dostupné z:  
<https://rpgforum.cz/forum/viewtopic.php?t=12830> [22.5.2018].

# PŘÍLOHA 1: Mapa povrchu Marsu



Zdroj: <https://www.stoplujednicka.cz/tajemstvi-rude-planety-povrchove-extremy-marsovych-sopek-kanonu>

## PŘÍLOHA 2: Základní orografické členění povrchu Marsu



Robinson Projection  
(cc) 2009 ELTE FFI PM

Zdroj: <https://rpgforum.cz/forum/viewtopic.php?t=12830>