

**Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta  
Ústav petrologie a strukturní geologie**

**Charles University in Prague, Faculty of Science  
Institute of Petrology and Structural Geology**

Doktorský studijní program:  
Ph.D. study program:

Autoreferát disertační práce  
Summary of the Ph.D. Thesis



Malé sopky na Marsu:  
obrazová analýza, numerické modelování a srovnání s pozemskými analogy

Small-scale volcanoes on Mars:  
image analysis, numerical modeling, and comparison with terrestrial analogs

**Mgr. Petr Brož**

Školitel/Supervisor:  
doc. Mgr. David Dolejš, Ph.D.

Praha, 11. června (2015)

## Abstrakt

Malé sopky představují různorodou skupinu povrchových těles, které se od sebe liší morfologií, morfometrií, ale i mechanismem svého vzniku. Na Zemi představují tyto malé sopky nejrozšířenější druh sopečných těles a jejich existence byla předpovězena i pro Mars. Dostupnost snímků ve vysokém rozlišení nyní umožňuje tyto malé sopky hledat, identifikovat a interpretovat jejich přítomnost na povrchu této planety. Tato dizertace se právě na tato malá sopečná tělesa zaměřuje a to ve snaze a) zdokumentovat existenci některých druhů malých sopek na povrchu Marsu, konkrétně sypaných kuželů, tufových kuželů, tufových prstenců a lávových dómů; b) určit jejich základní morfologické a morfometrické parametry a c) prozkoumat vliv rozdílného prostředí panujícího na povrchu Marsu a Země na příkladu mechanismu vzniku a vývoje sypaných kuželů.

Interpretace satelitních snímků a topografických dat odhalila, že se na povrchu Marsu vyskytují sypané kužele, tufové kužele, tufové prstence a lávové dómy – v některých případech ležících daleko od dobře známých sopečných provincií. Sypané kužele byly popsány v rámci sopečného pole Ulysses Colles ležícího v Tharsis; tufové kužele a tufové prstence byly objeveny v oblasti Nephentes/Amenthes, která se rozkládá na jižním okraji prastaré impaktní pánve Utopia. Dále byly popsány v oblasti Arena Colles ležící severně od impaktní pánve Isidis Basin, ale i uvnitř impaktního kráteru Lederberg v oblasti Xanthe Terra, lávové dómy pak byly objeveny uvnitř nepojmenované deprese ležící v oblasti Terra Sirenum. Přítomnost těchto sopek na povrchu Marsu tak dokumentuje řadu různorodých sopečných procesů: sypané kužele například dokládají existenci explozivního bazaltového vulkanismu a přítomnost a změnu zastoupení sopečných plynů v magmatu v průběhu geologické historie planety, tufové kužele a tufové prstence pro změnu dokládají výskyt (pod)povrchové vody a/či vodního ledu v marsovské historii a lávové dómy pak zaznamenávají doklady o mnohem větší variaci ve viskozitě magmatu, než se dříve myslelo.

Tvary malých explozivních sopečných těles (konkrétně sypaných kuželů, tufových kuželů a tufových prstenců) navíc odhalily, že vliv prostředí představuje významný faktor ovlivňující nejenom průběh samotné sopečné erupce, ale způsobuje i rozdíly ve vzhledu jednotlivých typů sopek při srovnání s jejich pozemskými obdobami. Například většina marsovských sypaných kuželů je vyšší než jejich pozemské obdoby, vykazují větší objemy vyvrženého materiálu, ale i přes to mají pozvolnější svahy (jen zřídka dosahující hodnoty 30°). To je způsobeno právě vlivem nižší gravitačního zrychlení a atmosférického tlaku. Nižší hodnoty těchto dvou parametrů umožňují vyvrženým částicím, aby byly distribuovány do větších vzdáleností od místa erupce, a tedy i na větší plochu, než v případě Země. Jelikož množství vyvrženého materiálu je obvykle malé, sklon svahů zmizajících kuželů nedosáhne sypaného úhlu strusky, což je na naproti tomu obvyklé pro pozemské sypané kužele. Redistribuce vyvrženého materiálu vlivem svahových procesů tak hraje během formování marsovských sypaných kuželů jen okrajovou roli. Tento rozdíl v mechanismu ukládání strusky na svazích kuželů tak umožňuje rekonstruovat růst marsovských kuželů za pomoci numerického modelování letu balistických trajektorií a zaznamenávání jejich kumulativního ukládání v místě dopadu, a tak určit inverzní úlohou parametry charakterizující samotnou sopečnou erupci. Řešení této úlohy pak naznačuje, že na Marsu jsou vyvržené částice přibližně dvacetkrát menší (okolo 2 mm) a vyvrženy přibližně dvakrát rychleji (okolo 92 m/s) než v případě Země.

Výsledky této práce tak dokládají, že malé sopky představují na povrchu Marsu globálně rozšířený fenomén s bohatým množstvím tvarů. Toto zjištění rozšiřuje naše znalosti o sopečné různorodosti Marsu a současně podtrhává význam rozdílného prostředí, které panuje na povrchu planety, na výsledný tvar sopečných těles.

## Abstract

Small-scale volcanoes represent diverse group of landforms which vary in morphology, morphometry, and mechanisms of their formation. They are the most common volcanic form on Earth, and their existence and basic characteristics were also predicted for Mars. Availability of high-resolution image data now allows to search, identify and interpret such small volcanic features on the martian surface. This thesis extends our knowledge about the small-scale volcanoes with the following objectives: (a) to document the existence of martian analogues to some of the terrestrial volcanoes, in particular scoria cones, tuff cones, tuff rings and lava domes; (b) to establish their morphological and morphometrical parameters; and (c) to examine the effect of environmental factors, which differ on Earth and Mars, on the mechanisms of formation of the scoria cones.

Interpretation of remote sensing images and digital elevation models reveals that scoria cones, tuff rings and cones, and lava domes exist on different parts of the martian surface and, in some cases, far away from previously well-known volcanic provinces. Scoria cones have been identified in the volcanic field Ulysses Colles situated within the Tharsis volcanic province; tuff cones and tuff rings have been found in the Nephenthes/Amenthes region at the southern margin of the ancient impact basin Utopia, north of Isidis Planitia in the Arena Colles region and within an impact crater Lederberg in Xanthe Terra, and lava domes were located within an unnamed depression in Terra Sirenum. These findings document volcanic processes responsible for such diversity: the scoria cones prove the presence of explosive basaltic volcanic activity on Mars and formed in response to variations in magma volatile content over the geological history; the tuff rings and tuff cones provide evidence for the presence of (sub)surface water and/or water ice in the martian history; the lava domes record much larger variations in magma viscosity than previously interpreted.

In addition, the shapes of small-scale explosive volcanoes (scoria cones, tuff cones and tuff rings) reveal the effect of environmental setting such as the gravity field and atmospheric pressure as a significant factor affecting the physics of volcanic eruptions and causing the differences from their terrestrial analogues. Most of the scoria cones show larger volumes of ejected material, larger heights, and lower average slopes (rarely exceeding  $30^\circ$ ) than their terrestrial counterparts. This is due to the lower gravity and atmospheric pressure on Mars which allow the ejected particles to be spread over a larger area than on Earth. As the volumes of erupted material are typically low, flank slopes do not reach the angle of repose – a common situation on Earth. This suggests only a minor role of avalanche redistribution during growth of martian scoria cones and permits their growth to be numerically tracked by modelling the ballistic trajectories and recording the cumulative deposition of repeatedly ejected particles. The ejected particles are about twenty times finer (about 2 mm) and ejected by a factor of two faster ( $\sim 92$  m/s) than on Earth.

The results indicate that small-scale volcanoes on Mars have wide spatial extent and diverse shapes. This extends our knowledge on the volcanological diversity of Mars and underlines the differences driven by local physical and environmental factors.

## 1. Úvod

Sopečná činnost je charakteristický znak všech terestrických planet (Merkuru, Venuše, Země a Marsu), některých měsíců (pozemského Měsíce, jupiterovo měsíce Io) a některých velkých asteroidů (např. Vesty) (Platz a kol., 2015). Jednotlivá sopečná tělesa se na těchto světech se vzájemně od sebe liší ve tvaru a to v závislosti na tom, jak se liší místní podmínky, hlavně gravitační zrychlení, atmosférický tlak a chemické složení jednotlivých těles. Pozorování naznačují, že sluneční soustava hostí značné množství různých sopečných jevů, které mohou být výrazně odlišné od jevů, které jsou známé ze Země. Morfologie těles, stejně jako styly jejich vzniku, přesahují různorodost sopek pozorovaných na Zemi.

První důkazy o projevech vulkanismu na povrchu Marsu pocházejí ze snímků, které pořídily během průletů americké planetární sondy Mariner 4, 6, 7 a 9, a následně pak i od dvojic sond Viking I a Viking II, které byly úspěšně navedeny na oběžnou dráhu Marsu. Ze získaných snímků bylo jasně patrné, že marsovská krajina dominují hory vysoké první desítky kilometrů s centrálními krátery – později interpretovanými jako rozsáhlé štítové sopky s několikanásobnými sopečnými kalderami – a lávové proudy, dlouhé stovky kilometrů (McCauley a kol., 1972; Greeley a Spudis, 1981; Grott a kol., 2013 a reference tam). Původně byla hlavní pozornost vědců zaměřena právě na tyto velké sopky, například na Olympus, Arsia, Pavonis, Ascraeus a Elysium Mons. Tyto sopky jsou spojeny s rozsáhlými sopečnými pláněmi, které dohromady vytvářejí dvě hlavní sopečné provincie – Tharsis a Elysium – nicméně na povrchu Marsu existují i další sopečné oblasti (Grott a kol., 2013 a reference tam). Morfologická, morfometrická a spektroskopická data odhalila, že oblasti Tharsis, Elysium, ale i oblast Syrtis Major, představují projevy výlevného vulkanismu materiálu o velice nízké viskozitě (např., Mougini-Mark a kol., 1992; Zimbelman, 2000; Hauber a kol., 2011). Naproti tomu sopky spojené s impaktní pánví Hellas mají rozdílné tvary od sopek v Tharsis či Elysium – nejspíše představují zbytky prastaré sopečné činnosti s dominantními explozivními erupcemi (Williams a kol., 2007, 2008). Obě dvě skupiny výše popsaných sopek byly podrobeny detailnímu výzkumu, jak z pohledu mechanismu vzniku, době vzniku, tak i jejich postupného vývoje v čase (např., Grott a kol., 2013; Platz a kol., 2015).

Naproti tomu jen málo pozornosti bylo věnováno malým sopečným tělesům dosahujících rozměrů pouze několika kilometrů. A to převážně kvůli nedostatečnému rozlišení snímků pořízených kamerami operujícími z oběžné dráhy Marsu. Například kamery na palubě sond Viking měly rozlišení, které umožňovalo nasnímat většinu povrchu s rozlišením okolo 200 metrů/pixel, menší část s rozlišením od 50 do 200 metrů/pixel a jen velmi malou část povrchu s rozlišením okolo 10 metrů/pixel. Toto rozlišení bylo v některých oblastech dostatečné k rozeznání útvarů na povrchu Marsu, které by mohly být malými sopkami (Hodges a Moore, 1994), nicméně bez dodatečného rozlišení snímků pro jednoznačné potvrzení. Nová generace snímků pořízených sondami po roce 1997, nabídla možnost tyto pozorování revidovat a na malá sopečná tělesa se znovu zaměřit a tak získat nezvratné důkazy o jejich existenci na povrchu Marsu.

Na základě těchto dat se v minulých letech povedlo doložit či potvrdit na povrchu Marsu existenci nízkých štítových sopek (např., Hauber a kol., 2009; Vaucher a kol., 2009a), sypaných kuželů (Keszthelyi a kol., 2008; Mougini-Mark a Christensen, 2005; Meresse a kol., 2008; Hauber a kol., 2009; Lanz a kol., 2010), lávových dómů (Rampey a kol., 2006), tuyas (Hodges a Moore, 1979; Keszthelyi a kol., 2010), spečených kuželů (Cattermole; 1986; Head a kol., 2005; Hauber a kol., 2009) a bezkořenových kuželů (Greeley a Theilig, 1978; Keszthelyi a kol., 2010). Pouze některé z uvedených sopečných těles byly podrobeny detailnímu

průzkumu, konkrétně nízké štítové sopky, tuyas a bezkošenové kužele (např., Hauber a kol., 2009; Vaucher a kol., 2009a; Hodges a Moore, 1979; Greeley a Theilig, 1978; Keszthelyi a kol., 2010). Některé typy sopek tak nebyly zatím detailně zkoumány či jen velmi povrchně.

Na Zemi představují malé sopky nesourodou a velice četnou skupinu, ve které se jednotlivé typy malých sopek od sebe liší jak tvarem, tak i mechanismem svého vzniku. Dá se předpokládat, že podobná nesourodost tvarů a vysoká četnost těchto sopek by měla platit i pro Mars, jelikož na také na jeho povrchu panují vhodné podmínky pro jejich vznik. Jak ale ohraničit tuto nesourodou skupinu společným jmenovatelem? V případě Marsu se zdá, že je tuto skupinu možné ohraničit množstvím magmatu, které se dostala na povrch. Největší malé sopky, konkrétně nízké štítové sopky, jsou tvořeny maximálně  $2 \times 10^2 \text{ km}^3$  magmatu (Hauber a kol., 2009). Obzvláště dobře patrné je toto malé množství magmatu při srovnání se štítovými sopkami v oblasti Tharsis a Elysium, které tvoří o několik řádů více sopečného materiálu. Malé sopky mohou v obecné rovině vznikat dvěma způsoby v závislosti na fragmentaci magmatu; efuzivní či explozivní činností (Sheridan a Wohletz, 1983; Parfitt a Wilson, 2008). Ke vzniku efuzivní činnosti dochází tehdy, pokud je vystupující magma zcela bez sopečných plynů, či jich obsahuje jen velice malé množství. Za takové situace nedochází k dezintegraci celistvosti magmat (Parfitt a Wilson, 2008). Naproti tomu, během explozivních erupcí dochází k fragmentaci magmatu a následného vyvrhování úlomků hornin různých velikostí do okolí. K fragmentaci magmatu dochází buď vlivem odplyňování magmatu, anebo vlivem interakce vody s magmatem (Sheridan a Wohletz, 1983).

## 2. Cíle práce

Cílem předložené práce je prohloubit znalosti o rozmanitosti vulkanismu na Marsu. Na jeho povrchu totiž do současnosti nebyla existence mnoha typů malých sopek uspokojivě prokázána, takže nebylo možné detailně popsat jejich tvary a tím získat přesnější představu o mechanismu jejich vzniku. Z toho důvodu jsem si vytkl pro tuto dizertaci následující úkoly:

1. Zdokumentovat přítomnost nedostatečně popsáných nebo zcela nepopsáných druhů malých sopek na povrchu Marsu a to za pomoci obrazové analýzy snímků pořízených ve viditelném spektru světla a topografických dat umožňující srovnat tvary zkoumaných těles s pozemskými obdobami a tím poskytnout základní morfometrické údaje charakterizující jejich tvary.

2. Detailně prozkoumat morfometrické tvary jednoho typu malých sopek, konkrétně sypaných kuželů, ve snaze odhalit případné odlišnosti od pozemských analogů a poskytnout vysvětlení případných rozdílů.

3. Vyvinout numerický model vzniku a vývoje marsovských sypaných kuželů a s jeho pomocí prozkoumat efekt rozdílných parametrů prostředí na průběh strombolského typu erupce. Předpokládám, že bych měl být schopen vysvětlit s využitím tohoto modelu případné odlišnosti tvarů marsovských sopek od pozemských analogů a tak lépe pochopit zdroj těchto variací.

## 3. Metodika

Kvůli nedostatečnému rozlišení nemohou být morfologické útvary na Marsu zkoumány za pomoci pozemských teleskopů. Nicméně, nyní jsou k dispozici snímky povrchu s metrovým rozlišením od planetárních sond, stejně jako detailní elevační model (DEM) povrchu Marsu. Současné rozlišení satelitních dat je tedy dostačující k detailnímu výzkumu kilometrových těles. Pro tuto studii byly použity snímky pořízené různými kamerami ve viditelném spektru světla, konkrétně snímky pořízené za pomoci *ConTeXt* kamery (CTX;

rozdílení 5-6 m/pixel; Malin a kol., 2007) a *High Resolution and Imaging Science Experiment* kamery (HiRISE; ~30 cm/pixel; McEwen a kol., 2007) umístěných na palubě americké sondy *Mars Reconnaissance Orbiter*. Dále byly použity snímky pořízené kamerou *High Resolution Stereo Camera* (HRSC; 10-20 m/pixel; Jaumann a kol., 2007) na palubě evropské sondy *Mars Express*. Snímky ve viditelném světle byly příležitostně doprovázeny termálními daty získanými za pomoci *Thermal Emission Imaging System* (THEMIS-IR denní i noční; ~100m/pixel; Christensen a kol., 2004) nacházející se na palubě americké sondy *Mars Odyssey Mission*. Pro prvotní analýzu těchto dat, tedy hledání objektů výzkumného zájmu, byl použit program *GoogleEarth™* (Google Inc. 2011<sup>1</sup>). Když byla zájmová tělesa objevena, z databáze *Mars Space Flight Facility 'Image Explorer'*<sup>2</sup> byla stažena volně dostupná data a následně zpracována za pomoci softwaru *ISIS3*<sup>3</sup> (*Integrated Software for Imagers and Spectrometers*) vyvíjeného americkou USGS. V tomto kroku došlo ke kalibraci a projekci satelitních snímků. Projekce byla vždy vybrána s ohledem pozice zkoumané oblasti na povrchu Marsu: Mercatorovo zobrazení bylo použito pro rovníkové oblasti, kdežto Sinusoidální zobrazení bylo použito pro oblasti nacházející se ve středních šířkách planety. Tento výběr zobrazení minimalizuje potenciální změny tvarů zkoumaných těles vlivem projekce na plochu. V několika krocích tak program *ISIS3* navrátí vhodně orientované a přesně lokalizované snímky vůči marsovskému povrchu. Orientované snímky byly následně načteny do softwaru *ArcGIS 10*<sup>4</sup> od společnosti ESRI, kde byly sloučeny s topografickými daty ze dvou globálních datových souborů – jeden datový soubor odvozený z měření zařízení *Mars Orbiter Laser Altimeter* (MOLA; Zuber a kol., 1992; Smith a kol., 2001) umístěného na palubě sondy *Mars Global Surveyor*, a druhý datový soubor ze stereo-snímku pořízených kamerou HRSC na palubě evropské sondy *Mars Express* (Jaumann a kol., 2007). V některých případech byly použity i topografická data získaná z kombinace stereo-snímku kamer HiRISE a CTX (Morattip a kol., 2010).

Rozdílení těchto datových souborů je obvykle rozdílné s ohledem na metodu jejich získání. MOLA DEM tak mají vertikální přesnost v řádu několika metrů v závislosti na kvalitě signálu a členitosti terénu. Horizontální vzdálenost mezi jednotlivými body měření je okolo ~300 m v severně-j jižním směru (Smith a kol., 2001), kdežto ve východně-západním směru závisí vzdálenost mezi jednotlivými body měření na pozici měření; mezeera mezi body je nižší v blízkosti pólů, kdežto směrem k rovníku narůstá a může dosáhnout až několika kilometrů. HRSC DEM je oproti tomu vytvořen za pomoci stereo-snímku, kde topografický model byl interpolován z 3D bodů na základě pravidelné sítě s mezerou 50 až 100 metrů a s průměrnou chybou 12,6 m (Gwinner a kol., 2010). HRSC DEM poskytuje dobrou vertikální i horizontální přesnost a to i v rovníkových oblastech. Nejvyšší přesnosti pak dosahují topografická data získaná ze stereo-snímku HiRISE a CTX. Jejich horizontální rozdílení je okolo 1 m/pixel, respektive 10 m/pixel a vertikálního rozdílení je pak okolo několika metrů.

Snímky povrchu Marsu a topografická data byly společně sloučeny v programu *ArcGIS10*, kde byly následně objekty zájmu označeny a kde došlo k určení jejich morfologických a morfometrických vlastností (s využitím nástroje *3D analyst*). Podobný postup byl aplikován i na několik oblastí na Zemi, kde se vyskytují geomorfologické útvary obdobné tvary těm zkoumaným na Marsu. Pozemská topografická data byla získána z programu *GoogleEarth™*. Tento program využívá topografická data pořízená v rámci mise *NASA Shuttle*

---

<sup>1</sup> *GoogleEarth™* verze 7.1.2.2041.

<sup>2</sup> Dostupné na <http://viewer.mars.asu.edu>.

<sup>3</sup> *ISIS3* verze 3.4.8, dostupné na <http://isis.astrogeology.usgs.gov>.

<sup>4</sup> ESRI *ArcGIS* verze 10.2.1. pro stolní počítače.

*Radar Topography Mission* (Farr a kol., 2007) s horizontálním rozlišením 10 až 30 m pro USA, okolo 90 metrů pro zbytek světa a vertikální chybou menší než 16 metrů (Jarvis a kol., 2008).

Případně prostorové spojení mezi jednotlivými sopečnými kužely bylo testováno za pomoci techniky (*2-point azimuth technique*) popsané Cebriou a kol. (2011). Absolutní modelové stáří jednotek Marsu bylo určeno s pomocí mapování distribuce četnosti impaktních kráterů za použití softwaru *CraterTools*<sup>5</sup> (Kneissl a kol., 2011) a nástroje *Craterstats*<sup>6</sup> (Michael a Neukum, 2010) využívající produkční funkci navrženou Ivanovem (2001) pro spočtení absolutního stáří.

## 4. Výsledky a diskuse

### 4.1. Sypané kužele

#### 4.1.1. Unikátní sopečné pole v Tharsis: pyroklastické kužele jako důkaz explozivního vulkanismu

Na základě morfologických a morfometrických analýz skupina povrchových útvarů v oblasti Ulysses Colles v Tharsis byla interpretována jako sopečné pole tvořené pyroklastickými kužely s doprovodnými lávovými proudy. Tento závěr je konzistentní s hypotézou, že explozivní bazaltický vulkanismus by měl být na povrchu Marsu obvyklý. Je proto překvapivé, že zkoumané pole je zatím jediné, které bylo v Tharsis pozorované. A to s ohledem na skutečnost, že pyroklastické kužele představují na Zemi nejvíce rozšířený typ sopečných těles (Wood, 1980; Valentine a Gregg, 2008). Možné vysvětlení tohoto rozporu mezi pozorováním a teoretickými předpoklady je, že podobná sopečná pole existovala na povrchu Marsu dříve v historii, ale byly postupně pohřbeny mladšími sopečnými uloženinami později. Pokud by tato hypotéza byla pravdivá, pozorování tohoto pole by naznačovalo postupnou změnu stylu sopečné činnosti v Tharsis: od více explozivní k více efuzivní. Prostorová distribuce kuželů dále naznačuje, že jejich rozmístění je řízené regionálním napětovým polem. Kužele jsou totiž uspořádány podél linie hrástí a příkopů probíhající v SSZ směru. Z analyzovaných snímků není zcela zřejmé, jestli byla sopečná činnost doprovodným jevem vzniku hrástí a příkopů, nebo jestli je sopečná činnost mladší a udála se tak až po skončení tektonických pochodů. V takovém případě by přírodní žíly mohly vystupovat po již existujících prasklinách představující strukturálně slabší místa v marsovské kůře a tedy vhodné výstupní dráhy pro stoupající magma.

#### 4.1.2. Tvary sypaných kuželů na Marsu, aneb co odhaluje numerické modelování balistických křivek

Sklon svahů marsovských sypaných kuželů v oblasti sopečného pole Ulysses Colles nedosahují kritického sypného úhlu pro srusku, v rozporu s tím, co je obvyklé pro pozemské sypané kužele. I přes to, že objem vyvrženého materiálu tvořícího marsovské kužele je mnohem větší než v případě Země, nedosahuje potřebného množství, aby tento kritický úhel byl dosažen. To je způsobeno tím, že vyvržený materiál je na povrchu Marsu rozprostřen na mnohem větší plochu během explozivní erupce vlivem menšího odporu atmosféry a menšího gravitačního zrychlení. Jelikož marsovské sypané kužele nedosahují sypného úhlu, jejich morfologický tvar stále zachovává záznam o parametrech prostředí v době sopečné erupce. To naznačuje, že

---

<sup>5</sup> CraterTools verze 2.1.

<sup>6</sup> Craterstats verze 2.0.

numerické modelování může být použito k prozkoumání základních fyzických parametrů kontrolujících formaci kužele. To umožňuje revidovat dřívější teoretické predikce. Naše výsledky ukazují, že vybudovat pozorované sypané kužele na Marsu, je potřeba, aby počáteční rychlost vyvržené částice byla zvýšena minimálně dvojnásobně vůči obvyklé rychlosti vyvržené částice na Zemi. To odpovídá reálné rychlosti okolo 92 m/s. Současně je potřeba, aby vyvržené částice byly přibližně 0,1 až 0,2 krát menší než v případě Země, tedy reálně mezi 4 až 8 mm. Tyto výsledky potvrzují dřívější teoretické předpovědi Wilsona a Heada (1994), kteří argumentovali pro vyšší stupeň fragmentace magmatu a vyšší výletové rychlosti, a umožňují nám tak lépe pochopit vývoj marsovských sypaných kuželů. Navržený model je případně možné použít i na dalších terestrických tělesech, kde byla přítomnost malých explozivních sopek naznačena.

#### 4.1.3. *Sypané kužele na Marsu: detailní výzkum jejich morfometrie na základě HiRISE a CTX DEM*

Tato studie nabízí konzistentní databázi morfologických parametrů 28 kuželovitých těles na povrchu Marsu, které se vyskytují ve třech oblastech – v Ulysses Colles, Hydraotes Colles a Coprates Chasma. Tyto parametry byly odvozeny z nově dostupných digitálních elevačních modelů s vysokým rozlišením získaných ze stereo-snímků HiRISE a CTX. Pro každý kužel jsme zrekonstruovali jeho průměrný vzhled a určili jeho základní morfometrické parametry – objem, výšku, šířku základny, šířku kráteru a sklon svahů. Pro kužele v HC a CC ukazují získané hodnoty v morfometrických srovnáních podobnou distribuci, což naznačuje, že obě pole vznikla obdobným geologickým procesem. Kužele v oblasti UC, které byly interpretovány Brožem a Hauberem (2012) jako sypané kužele, tvoří samostatnou skupinu hodnot a jejich parametry tak jsou rozdílné od kuželů v HC a CC. Obecně jsou kužele v UC více objemné a mají menší sklon svahů. S použitím numerického balistického modelu (Brož a kol., 2014) jsme ukázali, že rozdíly ve velikosti kuželů mezi jednotlivými poli jsou jen zdánlivé. Přes zjevné morfologické rozdíly jejich velikosti mohou být vysvětleny za použití stejného balistického modelu a za použití stejných hodnot výletových rychlostí a velikostí částic. To naznačuje, že všechny zkoumané kužele vznikly stejným fyzikálním procesem a že se tedy jedná o sypané kužele. Rozdíly ve tvarech kuželů v UC vůči kuželům v HC a CC jsou totiž spojeny s rozdílnou výškou nad nulovou hladinou Marsu. Rozdílná výška se totiž projevuje do rozdílných hodnot odporu atmosféry vůči pohybující se částici. Po započtení vlivu výšky pozice sopečných polí do numerického modelu jsme zjistili, že hodnoty výletových rychlostí vyvržení částice a velikosti částic jsou ve všech oblastech stejné a ve shodě s teoretickými predikcemi Wilsona a Heada (1994). Tato práce potvrzuje hypotézu, že se marsovské sypané kužele liší od pozemských sypaných kuželů kvůli rozdílnému mechanismu tvorby jejich svahů (Brož a kol., 2014). Kvůli delšímu balistickému rozsahu vyvržených částic nedosahují svahy sypaných kuželů na Marsu sypného úhlu a jsou tedy plně utvářeny balistickou depozicí – to je v rozporu se Zemí, kde svahové sesuvy po dosažení sypného úhlu představují dominantní proces formování svahů sypaných kuželů. Marsovské sypané kužele proto ukazují širší rozmanitost tvarů, velikostí a sklonů svahů a to v závislosti na rozdílných stupních vývoje růstu kužele a na rozdílných objemech vyvrženého materiálu. Získané morfometrické parametry dále nabízí možnost srovnání s dalšími kuželovitými tělesy na povrchu Marsu a tak pomoci odhalit podobnost či rozdílnost ve způsobu vzniku.

#### 4.2. *Tufové kužele a tufové prstence*

##### 4.2.1. *Hydrovulkanické tufové prstence a kužele jako indikátory pro freatomagmatické explozivní erupce na Marsu*



Na základě detailního morfologického a morfometrického výzkumu jsme na jižním okraji Utopia Planitia rozpoznali malé kužele s centrálními krátery, které sdílí mnoho morfologických podobností s pozemskými tufovými prstenci a tufovými kužely. Původ těchto marsovských kuželů vlivem hydrovulkanické aktivity je tak konzistentní s pozorovanými tvary a s regionálními geologickými podmínkami. Společně s malými kopci, které jsme interpretovali jako pravděpodobně pozemské lávové dómy (tzv. coulées), jsme tyto útvary interpretovali jako rozsáhlé sopečné pole. Obdobné pole s identickými útvary se nám podařilo detekovat i v oblasti Arena Colles ležící severně od Isidis Planitia, v místě taktéž ležící na okraji Utopia Planitia. Podobné morfologické charakteristiky jako kužele na jižním okraji Utopia Planitia sdílí i několik kuželů v impaktním kráteru Lederberg v oblasti Xanthe Terra. Tato tři pozorování naznačují, že vznik zkoumaných kuželů nevyžaduje unikátní tektonické a geologické podmínky, ani zvláštní vliv okolního prostředí, ale že se jedná o fenomén odehrávající se v různých oblastech Marsu. Naše závěry tak ukazují, že některé z bodů, které byly původně použity Skinnerem a Tanakou (2007) pro podepření hypotézy o vzniku kuželů na jižním okraji Utopia Planitia jako bahenních sopek, budou muset být znovu zváženy. A to i přes to, že představená bahenní hypotéza nebyla naší studií zcela vyvrácena.

### **4.3. Lávové dómy**

#### *4.3.1. Důkazy pro vysoce viskózní lávy z období Amazonianu v oblasti jižních vysočin Marsu*

V oblasti jižní vysočiny Marsu jsme identifikovali malé sopečné útvary, pravděpodobně lávové dómy, které jsou relativně mladé – se stáří v období Amazonianu. Jejich příkré svahy naznačují, že byly vytvořeny vysoce viskózní lávou, která buď způsobila dóming během intruze s následnou extruzí, či nejprve extruzí s následovným výzdvihem částí podloží. Pokud jsou naše závěry správné, naznačují, že sopečné útvary tvořené evolovaným magmatem nemusí být přítomny pouze v oblasti severních nížin v oblasti Arcadia Planitia (Rampey a kol., 2007), ale že se mohou vyskytovat také v jižních vysočinách – daleko od hlavních sopečných oblastí. Výskyt evolovaného magmatu v severních šířkách (Farrand a kol., 2011) je spojována s hypotézou, že viskozita magmatu narostla vlivem odplynění magmatu a/nebo vlivem vysokého stupně krystalizace, a tato hypotéza může být platná i v jižních vysočinách. Existence lávových dómů by naznačovala, že magma nevystoupilo na povrch přímo, ale že se po určitý čas shromažďovalo v různých hloubkách marsovské kůry. Naše pozorování a závěry tak rozšiřují znalosti o existenci evolovaného magmatu na Marsu, které se v současnosti zdá být mnohem více rozšířené, než se dříve myslelo (Carter a Poulet, 2013; Sautter a kol., 2014). Současně poukážeme na potřebu, že další výzkum objeveného sopečného pole je zapotřebí, detekované lávové dómy jasně představují ideální cíl pro spektroskopická pozorování, která by mohla objasnit chemické složení evolovaných láv

### **5. Závěry**

Tato dizertační práce se zaměřuje na malé marsovské sopky – rozsáhlou skupinu sopečných těles, které nebyly doposud předmětem žádné rozsáhlé a detailní studie. V rámci předkládaného výzkumu jsem se zaměřil na několik kuželovitých a dómovitých těles nacházejících se v různých oblastech Marsu a to za pomoci volně dostupných snímků pořízených ve viditelném světle doprovázených topografickými daty (HiRISE, CTX, HRSC, MOLA, HRSC DEM; HiRISE a CTX DEM). Použití těchto dat mi umožnilo určit množství morfologických a morfometrických parametrů a tak porovnat tvary pozorovaných útvarů s potenciálními pozemskými obdobami.

V rámci předložené práce se mi povedlo zdokumentovat přítomnost několika druhů malých sopek: sypaných kuželů v oblasti Ulysses Colles ležícího v Tharsis; tufových prstenců a tufových kuželů v oblasti Nephentes/Amenthes ležící na jižním okraji prastaré impaktní pánve Utopia, dále v oblasti Arena Colles ležící severně od Isidis Planitia, ale i uvnitř impaktního kráteru Lederberg ležícího v oblasti Xanthe Terra; a lávových dómů v bezejmenné depresi ležící v oblasti Terra Sirenum. Dále jsem na základě morfometrických dat potvrdil dříve navrženou existenci sypaných kuželů na dně rozsáhlého kaňonu Coprates Chasma (části kaňonovitého systému Valles Marineris) a v oblasti chaotického terénu Hydraotes Chaos. Zdá se, že malé sopky tedy představují na Marsu globálně rozšířený fenomén, který je v některých případech nespojen s velkými sopečnými oblastmi Tharsis a Elysium. Na základě počítání četnosti impaktních kráterů jsem odhalil, že zkoumané sopky vznikly v Hesperianu (či později). To naznačuje, že vulkanismus probíhal v širším časovém rámci, než se dříve předpokládalo – minimálně v regionálním měřítku a ve smyslu malých objemů magmat.

Nová pozorování mi umožnila prokázat, že Mars byl sopečně bohaté a různorodé těleso sluneční soustavy, kde vzniklo mnoho druhů malých sopek, které dokládají různorodost sopečných jevů. Sypané kužele v oblasti Ulysses Colles například dokládají existenci magmatu bohatšího na sopečné plyny, které způsobily fragmentaci magmatu a vznik strombolského typu erupce. Zmiňované sopečné pole se nachází na vyvýšené části staré popraskané kůry v oblasti Tharsis, pravděpodobně vzniklé v období Hesperianu, která přežila zaplavení mladšími lávovými proudy spojenými s výlevným vulkanismem plání během nejmladší sopečné aktivity. Toto uspořádání tak nabízí jednu z mála příležitostí, kde se dá v sopečné provincii Tharsis pozorovat starší povrch. Navíc, přítomnost sypaných kuželů v této části Tharsis odhaluje, že sopečná činnost v Tharsis nebyla pouze výlevná v průběhu historie jejího formování, jak by se mohlo dnes zdát při pohledu na rozsáhlé lávové proudy, ale že se v průběhu času mohla změnit. Naproti tomu přítomnost tufových prstenců a tufových kuželů v blízkosti impaktní pánve Utopia, ale i v dalších popsaných lokalitách, naznačuje existenci (pod)povrchové vody a/či vodního ledu v době výstupu magmatu. Přítomnost těchto útvarů vyžadující přítomnost vody ke svému vzniku tak poskytuje informaci o paleo-podmínkách v době jejich vzniku. Naproti tomu přítomnost vysoce viskózních lávových dómů v jižních vysočinách Marsu naznačuje, že evolované magma v mělkých hloubkách kůry mohlo vzniknout a později vystoupat k povrchu. To podporuje nově formulovaný názor (Baratoux a kol., 2014), že marsovská kůra může mít vyšší hustotu ( $>3100 \text{ kg m}^{-3}$ ) než se dříve myslelo.

Výzkum morfometrie malých sopek dále odhalil, že sypané kužele, tufové prstence a tufové kužele se významně liší od svých pozemských analogů kvůli rozdílnosti prostředí na těchto dvou planetách. Nově vyvinutý numerický model sledující balistické trajektorie vyvržených částic a jejich postupné hromadění v místě dopadu umožnil rekonstruovat tvary kuželů v oblasti Ulysses Colles, Hydraotes Colles a Coprates Chasma a tak potvrdit, že se jedná o sopky, konkrétně o sypané kužele, a současně vysvětlit, proč se svými tvary liší od pozemských analogů. Výsledky modelování také ukázaly, že pro rekonstrukci tvarů zkoumaných kuželů je zapotřebí vzít v potaz jiné podmínky, než které obvykle panují na Zemi – částice magmatu musí být vyvrženy minimálně dvakrát rychleji a částice musí být přibližně dvacetkrát menší, než je tomu na Zemi. To odpovídá reálné rychlosti okolo 92 m/s a velikosti částic okolo 2 mm. Vyšší výletové rychlosti společně s nižším atmosférickým tlakem a nižším gravitačním zrychlením způsobily, že částice byly vyvrženy do mnohem větší vzdálenosti, než v případě Země. Obvyklé množství vyvrženého materiálu proto nebylo dostatečné k tomu, aby svahy sypaných kuželů na Marsu mohly dosáhnout kritického sypného úhlu způsobující redistribuci sesuvy. To je v rozporu se Zemí, kde se jedná o běžnou situaci.

Pochopení rozdílnosti v procesu formování sypaných kuželů na Marsu a na Zemi umožnilo vznik uceleného modelu jejich . Na počátku probíhá formování na obou planetách stejně –

postupným nárůstem výšky a sklonem svahů kuželů a to vlivem balistické distribuce částic. Nicméně kvůli rozdílnosti v balistickém doletu jsou vyvržené částice na Zemi ukládány mnohem blíže centrálnímu kráteru, než v případě Marsu. Na Zemi pak i relativně malé množství materiálu způsobí, že dojde k dosažení kritické hodnoty sypného úhlu (okolo  $30^\circ$ ) a začátku svahových procesů. Hodnota sypného úhlu nemůže být dále překročena a tak sklon svahů zůstává okolo  $30^\circ$  a sopka proto postupně roste do výšky, ale současně i do šířky vlivem sesouvání materiálu po svazích. Naproti tomu marsovské sopky vznikají jen výsledkem balistické distribuce a to i přes výrazně větší množství vyvrženého materiálu, které je k dispozici. Na jejich svazích nedochází k dosažení hodnoty sypného úhlu, takže marsovské sypané kužele představují záznam konkrétních fyzikálních podmínek v době svého vzniku. Pochopení těchto rozdílů ve vývoji jednoho druhu sopky tak dokládá, jak důležitou roli hrají rozdílné parametry prostředí na fyzikální procesy řídící sopečnou činnost, které jsou jinak na obou planetách shodné, a jak je potřeba tyto rozdíly správně pochopit při snaze srovnávat morfologické vlastnosti útvarů na různých světech sluneční soustavy.

# 1. Introduction

Volcanic activity is a characteristic feature of all terrestrial planets (Mercury, Venus, Earth and Mars), some moons (Earth's Moon, Jupiter's moon Io), and some large asteroids (Vesta) (Platz et al., 2015). Volcanic edifices vary in shapes as do local environmental conditions, mainly gravitational acceleration, atmospheric pressure and chemical composition on individual cosmic bodies. These observations imply that the Solar system hosts an astonishing array of volcanic phenomena that are sometimes very different from the known terrestrial analogs. Their morphology as well as styles of formation are both likely to exceed the variability that has been known on Earth.

The first evidence for extensive volcanic products on the martian surface comes from imaging during flybys of the American planetary probes Mariner 4, 6, 7 and 9, Viking I and II, which successfully entered into an orbit of Mars. The martian landscape is dominated by mountains dozens kilometers high with summit craters – later interpreted as large shield volcanoes with multiple calderas – and by lava flows extending over hundreds of kilometers of the planetary surface (McCauley et al., 1972; Greeley and Spudis, 1981; Grott et al., 2013 and references therein). Main attention was initially paid to the large volcanic edifices, e.g., Olympus, Arsia, Pavonis, Ascraeus, and Elysium Mons. These volcanoes are associated with extensive volcanic plains, together forming two prominent volcanic provinces – Tharsis and Elysium – but other volcanic centers exist as well (Grott et al., 2013 and references therein). The morphological, morphometric and spectroscopic data revealed that the Tharsis and Elysium centers, and the Syrtis Major volcanic complex, represent prominent large-scale volcanic effusions of low-viscous basaltic lavas (e.g., Mougini-Mark et al., 1992; Zimbelman, 2000; Hauber et al., 2011). By contrast, the volcanoes associated with the Hellas Basin vary in morphologies from those known in Tharsis and Elysium, and they may represent relics of ancient explosive volcanism (Williams et al., 2007, 2008). Both groups were extensively studied and their formation, timing and evolution were reviewed (e.g., Grott et al., 2013; Platz et al., 2015).

By contrast, little attention was paid to small-scale volcanic landforms, only several kilometers large, due to inadequate spatial resolution of the cameras orbiting Mars. The cameras onboard Viking orbiters allow observing most of martian surface with a resolution of about 200 m/pixel, locally between 50 and 200 m/pixel and a very small fraction of Mars with a resolution of about 10 m/pixel. Such resolutions were in some areas sufficient for observations of structures, which might prove to be small-scale volcanoes (Hodges and Moore, 1994), however without the required accuracy to verify these suggestions. A new generation of images from the fleet of probes orbiting Mars since 1997 offered a possibility to investigate great spatial details of the martian surface and, as a result, revealed existence of volcanic edifices on kilometer scale.

The existence of low shield volcanoes (e.g. Hauber et al., 2009; Vaucher et al., 2009a), scoria cones (Keszthelyi et al., 2008; Mougini-Mark and Christensen, 2005; Meresse et al., 2008; Hauber et al., 2009; Lanz et al., 2010), lava domes (Rampey et al., 2006), tuyas (Hodges and Moore, 1979; Keszthelyi et al., 2010 and references therein), spatter cones (Cattermole; 1986; Head et al., 2005; Hauber et al., 2009), and rootless cones (Greeley and Theilig, 1978; Keszthelyi et al., 2010 and references therein) was suggested and/or subsequently confirmed. Only some of these volcanic groups, in particular the low shield volcanoes, tuyas and rootless cones, were subjects of detailed research (e.g., Hauber et al., 2009; Vaucher et al., 2009a; Hodges and Moore, 1979; Greeley and Theilig, 1978; Keszthelyi et al., 2010), whereas

physical volcanology and comparative studies with terrestrial analogs remain poorly constrained.

On Earth, small-scale volcanoes represent a wide group of volcanic landforms which vary in shapes and mechanism of their formation, and similar characteristics should be valid for Mars. A common aspect of these edifices on Mars is a low magma volume with a representative maximum of  $2 \times 10^2 \text{ km}^3$  (Hauber et al., 2009). This is particularly well illustrated by comparison with the shield volcanoes in Tharsis and Elysium that are several orders of magnitude larger. The small-scale volcanoes are formed by effusive or explosive volcanic eruptions in a direct response to magma fragmentation (Sheridan and Wohletz, 1983; Parfitt and Wilson, 2008). For the effusive volcanic edifices (extrusion as homogeneous liquid without mechanical disruption) to form, the rising magma must be bubble-free or -poor to prevent its disaggregation (Parfitt and Wilson, 2008). By contrast, the explosive eruptions are characterized by ejection of magma fragments of various sizes. They represent more complex phenomena as fragmentation may be caused by magma degassing and/or water-magma interaction (Sheridan and Wohletz, 1983).

## **2. Aims of the study**

The aim of this study is to deepen our understanding of variety of martian volcanoes. For several types of small-scale volcanoes the existence and/or mechanisms of their formation remain poorly understood or controversial. I have therefore defined the following thesis objectives:

1. To document the presence of poorly described or unknown small-scale volcanic edifices on the martian surface by image analyses in the visible light range; to use topographic data to compare edifice shapes with possible terrestrial analogs in an attempt to extend current knowledge about the variety of volcanoes on Mars and to provide principal morphometric properties of their shapes.

2. To investigate the morphometric shape of one particular type of edifice in detail, for instance the scoria cones, in order to evaluate their variations from terrestrial analogs and provide genetic explanation.

3. To develop a numerical model for the formation of martian scoria cones and to investigate the effects of the initial eruption parameters on the nature of Strombolian eruptions. I expect to explain the causal reasons for differences in the cone shapes on Mars and, in addition, to address the source of their variations with respect to their terrestrial analogs.

## **3. Methods**

Morphological features of Mars cannot be analyzed by terrestrial telescopes due to the insufficient spatial resolution. However, images resulting from planetary probes capturing meter-scale aspects of the martian surface are now available as are detailed elevation models. Several types of image data acquired in visible light by Context camera (CTX; 5–6 m/pixel; Malin et al., 2007) and during High Resolution and Imaging Science Experiment (HiRISE; ~30 cm/pixel; McEwen et al., 2007), both onboard Mars Reconnaissance Orbiter and by High Resolution Stereo Camera (HRSC; 10–20 m/pixel; Jaumann et al., 2007) onboard Mars Express were used as well as the thermal data taken by Thermal Emission Imaging System (THEMIS-IR day and night; ~100m/pixel; Christensen et al., 2004) onboard Mars Odyssey Mission.

These data were browsed via GoogleEarth™ (Google Inc., 2011<sup>7</sup>) to search for objects of interest. Once such objects were discovered, freely available raw data were downloaded from the Mars Space Flight Facility ‘Image Explorer’ database<sup>8</sup> and processed with the USGS software ISIS3<sup>9</sup> (‘Integrated Software for Imagers and Spectrometers’) for calibration and projection. The projection was chosen with the respect to latitude where objects of interest were situated. This procedure minimizes any possible distortion of final shapes of the investigated edifices; the Mercator projection was used for equatorial areas and the sinusoidal projection for mid-latitudes. Images processing in ISIS3 returned the proper orientation and position of the images on the martian surface. The projected images were uploaded to the ESRI ArcGIS 10<sup>10</sup> software together with the topographic data from global datasets – by Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA; Zuber et al., 1992; Smith et al., 2001) placed onboard Mars Global Surveyor, from the HRSC stereo images onboard Mars Express (Jaumann et al., 2007), and from stereo-pairs of HiRISE and CTX images following the methods described, for instance, by Moratto et al. (2010).

The resolution of these datasets generally varies due to the different methods of their generation. The MOLA data have vertical accuracy on the order of several meters, depending on a signal quality and a terrain roughness. Horizontal spacing between individual spots is near ~300 m in the south-north direction (Smith et al., 2001), whereas the east-west spacing depends on the latitude; it is lower in polar regions but may reach several kilometers near the equator. The HRSC DEM is derived from stereo-images where the topographic model has been interpolated from 3D points on a regular grid spaced 50 to 100 m with an average intersection error of 12.6 m (Gwinner et al., 2010). The HRSC DEM data provide a good vertical and horizontal resolution even in the equatorial regions. These HiRISE and CTX DEM data reach a spatial resolution of ~1 or ~10 m/pixel, respectively, and the vertical accuracy of the stereo-derived DEM data can be estimated to be a few meters.

The visible-light and topographic data were merged in the ArcGIS 10 software, the objects of interest were mapped, and their morphological and morphometrical properties were interpreted using the 3D analyst tool in the ArcGIS 10 environment. The same procedure of image analysis was applied to several terrestrial regions in order to locate and compare analogous volcanic phenomena, and match their shape characteristics. The terrestrial data were obtained from the GoogleEarth™ software. GoogleEarth™ uses the DEM data collected by the NASA Shuttle Radar Topography Mission (Farr et al., 2007) with a cell size of 10 to 30 m for the USA, and ~90 m for the rest of the world. The vertical error of these DEM is reported to be less than 16 m (Jarvis et al., 2008).

In addition, spatial connection between individual cones was investigated by a 2-point azimuth technique described by Cebriá et al. (2011). Absolute model ages were determined from the crater size-frequency distributions utilizing the software tool CraterTools<sup>11</sup> (Kneissl et al., 2011), which ensures a distortion-free measurement of crater diameters independent of map projection. The age data were interpreted using the impact-cratering chronology model with the software Craterstats<sup>12</sup> (Michael and Neukum, 2010), which applies the production function of Ivanov (2001).

---

<sup>7</sup> GoogleEarth™ version 7.1.2.2041.

<sup>8</sup> Available on <http://viewer.mars.asu.edu>.

<sup>9</sup> ISIS3 version 3.4.8, available at <http://isis.astrogeology.usgs.gov>.

<sup>10</sup> ESRI ArcGIS version 10.2.1. for Desktop.

<sup>11</sup> CraterTools version 2.1.

<sup>12</sup> Craterstats version 2.0.

## 4. Results and discussion

### 4.1. Scoria cones

#### 4.1.1. *A unique volcanic field in Tharsis, Mars: Pyroclastic cones as evidence for explosive eruptions*

Based on morphological and morphometrical analyses, we interpret an assemblage of landforms in a field of Ulysses Colles in Tharsis as a volcanic field with pyroclastic cones and associated lava flows. This result is consistent with the hypothesis that explosive basaltic volcanism should be common on Mars. It is surprising that this is the only well-preserved field of this kind seen so far on Mars, given the fact that pyroclastic cones are the most common volcanoes on Earth (Wood, 1980; Valentine and Gregg, 2008). A possible explanation is that similar volcanic fields existed in the past, but were subsequently buried by younger volcanic deposits. If true, this might imply a gradual change in eruption style in Tharsis, from more explosive towards more effusive volcanism. The spatial distribution of cones is controlled by regional tectonic trends, and cones are aligned along NNW-trending normal faults and grabens. It is not clear whether the volcanic activity was contemporaneous with the faulting, or whether the magmatism postdated the tectonism, with dikes ascending along pre-existing lines of structural weakness. Faulted volcanic substrate beneath the cones suggests that at least some of the faulting was post-volcanic

#### 4.1.2. *Shape of scoria cones on Mars: insights from numerical modeling of ballistic pathways*

The flank slopes of scoria cones in the Ulysses Colles region on Mars do not reach the critical angle of repose, in contrast to terrestrial scoria cones. Although the volume of the ejected material is much larger than on Earth, it is not sufficient for the critical angle to be reached since it is dispersed over a much larger area during an explosive eruption. Because the cones on Mars did not reach the angle of repose, their morphological shape still preserves a record of environmental conditions at the time of eruption. This suggests that numerical modeling could be used to examine in more detail the basic physical parameters controlling cone formation and hence refine earlier theoretical predictions. Our results show that to build a scoria cone on Mars as observed, the initial velocity of ejected particles has to be increased by a factor of at least  $\sim 2$  with respect to the typical velocity on Earth, corresponding to a mean particle velocity of  $\sim 92$  m/s or higher, and that the particles have to be finer by a factor of 0.1 and 0.2, corresponding to a real particle size of 4 to 8 mm. Our findings thus confirm earlier theoretical predictions by Wilson and Head (1994) and help us to understand the development of scoria cones on Mars. A similar approach might be used on other terrestrial bodies from which small-scale volcanoes of explosive origin were reported.

#### 4.1.3. *Scoria cones on Mars: detailed investigation of morphometry based on HiRISE and CTX DEMs*

Our study provides a coherent set of morphometric characteristics of 28 conical martian edifices from three regions – Ulysses Colles, Hydraotes Colles and Coprates Chasma. These characteristics are derived from newly available high-resolution DEMs based on HiRISE and CTX stereo-pair images. For each cone we carefully reconstruct its average (axisymmetric) shape and determine the basic morphometric parameters – volume, height, basal width, crater width and slope. The parameters obtained for the cones in HC and CC show similar

distributions which suggests that both fields were created by the same geological process. The cones in UC, which have been interpreted by Brož and Hauber (2012) as scoria cones, form an independent cluster on morphometric graphs and their characteristics differ from those in HC and CC – the cones are more voluminous and have smaller average slope angles than the cones in the other two regions. Using our numerical ballistic model, we show that the difference between the cones in UC and those in HC and CC is only apparent. In spite of obvious morphological differences, the cones in all three fields can be explained by the same ballistic model with the same ejection velocity and particle size distributions. This result suggests that the edifices in all three regions are scoria cones which were formed by the same physical process. The differences in the shape of the cones in UC and those in HC and CC are associated with different elevations of the sites and can be explained by different values of the atmospheric drag. The values of ejection velocity and particle size inferred from the topographic data are in agreement with the theoretical predictions by Wilson and Head (1994) who argued for stronger magma fragmentation and higher ejection velocities on Mars in comparison with the Earth. Our results support the hypothesis that martian scoria cones differ in shape from the terrestrial cones due to the different mechanism of flank formation (Brož et al., 2014). Because of a long ballistic range, the slopes of scoria cones on Mars never reach the angle of repose and their shapes are fully determined by ballistic deposition – in contrast to the Earth where the subsequent avalanche redistribution plays the dominant role. As a consequence, martian scoria cones show a wide variety of sizes and slope angles, corresponding to different stages of the scoria cone's growth and different volumes of ejected material. The set of morphological characteristics derived in this study can further be used for comparative studies of other conical edifices on Mars, such as pingos, rootless cones, mud volcanoes or tuff rings and tuff cones. This set can help to overcome the uncertainties associated with using terrestrial morphometric data which correspond to different environmental conditions and possibly include effects that are not relevant to Mars.

## **4.2. Tuff rings and tuff cones**

### *4.2.1. Hydrovolcanic tuff rings and cones as indicators for phreato-magmatic explosive eruptions on Mars*

Pitted cones along the southern margin of Utopia Planitia share morphological similarities to terrestrial tuff cones and tuff rings. A hydrovolcanic origin of these cones is consistent with the observed morphology and the regional geologic setting. Mounds associated with the cones resemble terrestrial lava domes (coulées). Together, we interpreted these landforms as a volcanic field. Another field with identical landforms was newly detected north of Isidis Planitia in the Arena Colles region, also along the margin of Utopia Planitia. Several cones in an impact crater Lederberg in Xanthe Terra share the same morphological characteristics. These new observations of this type of pitted cones suggest that their formation may not require unique tectonic or environmental conditions. While the consistent mud volcano-scenario of (Skinner and Tanaka, 2007) cannot be ruled out, several points used previously against an igneous volcanic origin of these landforms have been reevaluated. The geotectonic setting and the growing evidence for additional volcanic centres in the wider region would be consistent with igneous volcanism. The general lack of obvious structural control is not a conclusive argument, as structural control would be expected for both igneous and mud volcanism. The spatial association with Amenthes Cavi, as postulated by Skinner and Tanaka (2007), however, is not explained by an igneous volcanic scenario.



### **4.3. Lava domes**

#### *4.3.1. Evidence for Amazonian highly viscous lavas in the southern highlands on Mars*

We have identified small-scale volcanic edifices in the southern highlands of Mars that have a relatively young Amazonian age. The steep-sided morphology suggests that highly viscous lava formed them, magma intruding into the crust causing doming and extruding onto the surface or vice versa. If so, volcanic edifices composed of evolved magmas may not only be present in the northern lowlands in Arcadia Planitia (Rampey et al., 2007), but also in the southern highlands, far from any known major volcanic centres. The proposed explanation for cryptodomes in Arcadia Planitia (Farrand et al., 2011), in which magma viscosity increased due to magma degassing and/or a high degree of crystallization, may be also be valid here. Although decompression-induced degassing and/or crystallization changes the magma's composition, it remains open as to how differentiated the magma is that formed these volcanic domes and cones. The extrusion of small-volume differentiated lava onto the surface implies multiple storage levels during magma ascent through a thick, southern highland crust. Our observations and conclusions expand our knowledge about evolved magmas on Mars, which seem to be more widespread than previously thought (Carter and Poulet, 2013; Sautter et al., 2014). Further investigations are required to elucidate the origin of these edifices; they clearly represent ideal candidates for detail spectroscopic observations.

## **5. Conclusions**

This thesis concentrates on small-scale volcanoes on Mars – a comprehensive group of volcanic landforms which have not been a subject of any detailed study. I investigate several conical and domical volcanic edifices on martian surface using available visible-light image and topographic data sets and stereo-pair images (HiRISE, CTX, HRSC; MOLA, HRSC DEM; HiRISE, CTX DEMs). These data permit to determine various morphological and morphometric parameters and compare edifice shapes with possible terrestrial counterparts. As a result, several types of volcanic edifices, namely the scoria cones, tuff rings, tuff cones and lava domes, were discovered on the martian surface.

I have documented the presence of several types of small-scale volcanoes in various regions of Mars: scoria cones in the volcanic field Ulysses Colles situated within Tharsis, tuff cones and tuff rings in the Nephenthes/Amenthes region at the southern edge of the ancient impact basin Utopia, north of Isidis Planitia in the Arena Colles region and within the impact crater Lederberg in Xanthe Terra, and lava domes within an unnamed depression in Terra Sirenum. Additionally, I have confirmed the presence of previously suggested scoria cones in Hydrates Chaos and supported a hypothesis about the existence of scoria cones on the floor of Coprates Chasma, a part of large canon systems of Valles Marineris, by morphological data. These volcanoes are now interpreted to indicate a globally widespread activity, partly independent and unrelated to the major volcanic provinces Tharsis and Elysium. The age of these volcanoes, constrained by crater counting, is Hesperian or younger, providing additional constraint on much wider time window for the volcanic activity than previously thought, at least regionally and in terms of magma volumes required for the small-scale volcanism.

The new morphological and morphometric observations now prove that Mars has been a volcanically rich and diverse body of the Solar system where many styles of small-scale volcanic edifices were created by igneous processes but governed by local physical and environmental factors. This may be illustrated using the example of scoria cones in volcanic field of Ulysses Colles whose formation was likely caused by the presence of a magma enriched

by volatiles responsible its fragmentation and the Strombolian eruption style. This volcanic field is superposed on a slightly elevated heavily fractured crust, probably early Hesperian in age, which escaped flooding by younger lava flows associated with effusive plain-style volcanism produced during the youngest large-scale volcanic activity. This spatial configuration thus offers the rare possibility to observe an older martian surface in Tharsis. Furthermore, the presence of scoria cones in Ulysses Colles revealed that volcanism in Tharsis was not exclusively effusive throughout the martian history as it may appear to be today, but it varied in time. In addition, the possible presence of tuff cones and tuff rings in the vicinity of Utopia Basins and at several other localities suggests the presence of (sub)surface water and/or water ice during the time of magma ascent, hence it constrains the paleo-environmental conditions on Mars during the Hesperian epoch. On the other hand, the presence of highly viscous lava domes in the southern highlands suggests that storage of evolved magmas at shallow sub-crustal level(s) may be viable on Mars thus supporting a new, higher density estimate of the martian crust ( $>3100 \text{ kg m}^3$ ) proposed by Baratoux et al. (2014).

The morphometry investigations of the small-scale volcanoes demonstrate that scoria cones, tuff rings and tuff cones significantly differ in their shapes from terrestrial analogues. A new numerical model tracks the ballistic trajectories and traces the cumulative deposition of repeatedly ejected particles to predict morphological shapes of scoria cones within Ulysses Colles, Hydraotes Colles and an unnamed field in Coprates Chasma. The observed shapes of the scoria cones in Ulysses Colles have the predicted ejection velocities by a factor of  $\sim 2$  higher and the ejected particles have their size  $\sim 20$  finer than is typical on Earth, corresponding to a mean particle velocity of  $\sim 92 \text{ m/s}$  and a particle size of  $\sim 2 \text{ mm}$  on Mars. These higher ejection velocities combined with lower atmospheric pressure and gravity acceleration cause a wider dispersion of volcanic ejecta. Characteristic eruptive volumes are then not large enough for the flank slopes to reach the angle of repose, in contrast to the Earth where attainment of this limit is common. Overall, the scoria cones on Mars are mainly formed by ballistic distribution rather than by redistribution of flank material by avalanching due to its slope instability.

These above observations and inferences lead to a comprehensive scenario for the growth of the martian scoria cones. Initially, cones on Mars and Earth develop in a comparable manner by gradually increasing the height and the slope angle. Because of the differences in the ballistic range, ejected particles are deposited on a much smaller area on Earth than on Mars and, for the same volume of ejecta, the terrestrial cone is steeper than the martian one. Once the angle of repose on Earth ( $\sim 30^\circ$ ) has been reached, the slope inclination remains constant. Continuing growth is accommodated by an increase of the cone width hence terrestrial cones show a correlation between the height and the basal diameter, also due to the avalanching. On the other hand, the martian scoria cones are built by ballistic deposition only and, despite of substantial volumes of ejected material, they never reach the angle of repose because the ejecta is distributed over much greater area. Each scoria cone on Mars thus contains a record of specific physical conditions at the time of eruption which can be, at least partly, reconstructed from its shape. This thesis highlights the significance of environmental setting on physical processes driving the volcanic activity on Mars, and more broadly on other bodies of the Solar system.

## 6. Reference/References

- Baratoux, D., Samuel, H., Michaut, C., Toplis, M. J., Monnereau, M., Wiczeorek, M., Garcia, R., Kurita, K., 2014. Petrological constraints on the density of the Martian crust, *Journal of Geophysical Research: Planets*, 119, 1707–1727, doi:10.1002/2014JE004642.
- Brož, P., Hauber, E., 2012. A unique volcanic field in Tharsis, Mars: Pyroclastic cones as evidence for explosive eruptions, *Icarus*, 218, 88–99, doi:10.1016/j.icarus.2011.11.030.
- Brož, P., Čadek, O., Hauber, E., Rossi, A. P., 2014. Shape of scoria cones on Mars: insights from numerical modeling of ballistic pathways, *Earth and Planetary Science Letters*, 406, 14–23, doi: 10.1016/j.epsl.2014.09.002.
- Carter, J., Poulet, F., 2013. Ancient plutonic processes on Mars inferred from the detection of possible anorthositic terrains, *Nature Geoscience*, 6, 1008–1012, doi:10.1038/ngeo1995.
- Cattermole, P., 1986. Linear volcanic features at Alba Patera, Mars-probable spatter ridges, *Journal of Geophysical Research*, 91, 159–165, doi: 10.1029/JB091iB13p0E159.
- Cebriá, J. M., Martín-Escorza, C., López-Ruiz, J., Morán-Zenteno, D. J., Martiny, B. M., 2011. Numerical recognition of alignments in monogenetic volcanic areas: Examples from the Michoacán-Guanajuato Volcanic Field in Mexico and Calatrava in Spain, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 201, 73–82, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2010.07.01.
- Farr, T. G., et al., 2007. The Shuttle Radar Topography Mission, *Reviews of Geophysics*, 45, RG2004, doi:10.1029/2005RG000183.
- Farrand, W. H., Lane, M. D., Edwards, B. R., Yingst, R. A., 2011. Spectral evidence of volcanic cryptodomes on the northern plains of Mars, *Icarus*, 211 (1), 139–156, doi: 10.1016/j.icarus.2010.09.006.
- Google Inc., 2011, Google Earth (Version 6.1.0.5001, software). Available from <http://www.google.com/earth>.
- Greeley, R., Spudis, P. D., 1981. Volcanism on Mars, *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 19, 13–41, doi: 10.1029/RG019i001p00013.
- Greeley, R., Theilig, E., 1978. Small Volcanic Constructs in the Chryse Planitia Region of Mars. NASA TM-79729, 202 pp.
- Grott, M., Baratoux, D., Hauber, E., Sautter, V., Mustard, J., Gasnault, O., Ruff, S. W., Karato, S.-I., Debaille, V., Knapmeyer, M., Sohl, F., Van Hoolst, T., Breuer, D., Morschhauser, A., Toplis, M. J., 2013. Long-Term Evolution of the Martian Crust-Mantle System, *Space Science Reviews*, 174, 49–111, doi:10.1007/s11214-012-9948-3.
- Gwinner, K., Scholten, F., Preusker, F., Elgner, S., Roatsch, T., Spiegel, M., Schmidt, R., Oberst, J., Jaumann, R., Heipke, C., 2010. Topography of Mars from global mapping by HRSC high-resolution digital terrain 2 models and orthoimages: Characteristics and performance, *Earth and Planetary Science Letters*, 294, 506–519, doi:10.1016/j.epsl.2009.11.007.
- Hauber, E., Bleacher, J., Gwinner, K., Williams, D., Greeley, R., 2009a. The topography and morphology of low shields and associated landforms of plains volcanism in the Tharsis region of Mars, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 185, 69–95, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2009.04.015.
- Hauber, E., Bleacher, J., Gwinner, K., Williams, D., Greeley, R., 2009b. Vaucher, J., Baratoux, D., Mangold, N., Pinet, P., Kurita, K., Grégoire, M., 2009a. The volcanic history of central Elysium Planitia: Implications for Martian magmatism, *Icarus*, 204, 418–442, doi:10.1016/j.icarus.2009.06.032.
- Hauber, E., Brož, P., Jagert, F., Jodłowski, P., Platz, T., 2011. Very recent and wide-spread basaltic volcanism on Mars, *Geophysical Research Letters*, 28, L10201, doi:10.1029/2011GL047310.

- Head, J. W., Marchant, D. R., Shean, D. R., Fassett, C. I., Wilson, L., 2005. Interrelated glacial, volcanic and hydrologic processes on the Tharsis Montes, Olympus Mons and Hecates Tholus, Mars, *Eos Transactions American Geophysical Union*, 86 (52). P23B-0191. ISSN 0096-3941.
- Hodges, C. A., Moore, H. J., 1979. The subglacial birth of Olympus Mons and its aureoles, *Journal of Geophysical Research*, 84, 8061–8074, doi 10.1029/JB084iB14p0806.
- Hodges, C. A., Moore, H. J., 1994. Atlas of volcanic features on Mars. U. S. Geol. Survey Professional Paper 1534, U. S. Govt. Printing Office, Washington DC, 194 pp.
- Christensen, P. R. et al., 2004. The Thermal Emission Imaging System (THEMIS) for the Mars 2001 Odyssey Mission, *Space Science Reviews*, 110, 85–130, doi: 10.1023/B:SPAC.0000021008.16305.94.
- Ivanov, M. A., 2001. Mars/Moon Cratering Rate Ratio Estimates, *Space Science Reviews*, 96, 87–104, doi: 10.1023/A:1011941121102.
- Jarvis, A., Reuter, H. I., Nelson, A., Guevara, E., 2008. Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database (<http://www.cgiar-csi.org/data/elevation/item/45-srtm-90m-digital-elevation-database-v41>).
- Jaumann, R., et al., 2007. The high-resolution stereo camera (HRSC) experiment on Mars Express: Instrument aspects and experiment conduct from interplanetary cruise through the nominal mission, *Planetary and Space Science*, 55, 928–952, doi: 10.1016/j.pss.2006.12.003.
- Keszthelyi, L. P., Jaeger, W. L., Dundas, C. M., Martínez-Alonso, S., McEwen, A. S., Milazzo, M. P., 2010. Hydrovolcanic features on Mars: Preliminary observations from the first Mars year of HiRISE imaging, *Icarus*, 205, 211–229, doi: 10.1016/j.icarus.2009.08.020.
- Keszthelyi, L., Jaeger, W., McEwen, A., Tornabene, L., Beyer, R.A., Dundas, C., Milazzo, M., 2008. High Resolution Imaging Science Experiment (HiRISE) images of volcanic terrains from the first 6 months of the Mars Reconnaissance Orbiter primary science phase, *Journal of Geophysical Research*, 113, E04005. doi:10.1029/2007JE002968.
- Kneissl, T., van Gasselt, S., Neukum, G., 2011. Map-projection-independent crater size-frequency determination in GIS environments – new software tool for ArcGIS, *Planetary and Space Science*, 59, 1243–1254, doi: 10.1016/j.pss.2010.03.015.
- Lanz, J. K., Saric, M. B., 2009. Cone fields in SW Elysium Planitia: Hydrothermal venting on Mars? *Journal of Geophysical Research*, 114. doi:10.1029/2008JE003209.
- Malin, M. C., et al., 2007. Context camera investigation on board the Mars Reconnaissance Orbiter, *Journal of Geophysical Research*, 112 (E05S04), doi: 10.1029/2006JE002808.
- McCaughey, J. F., Carr, M. H. et al. 1972. Preliminary Mariner-9 report on the geology of Mars, *Icarus*, 17, 289–327, doi: 10.1016/0019-1035(72)90003-6.
- McEwen, A. S., et al., 2007. Mars Reconnaissance Orbiter's High Resolution Imaging Science Experiment (HiRISE), *Journal of Geophysical Research*, 112 (E05S02), doi: 10.1029/2005JE002605.
- Meresse, S., Costard, F., Mangold, N., Masson, P., Neukum, G., the HRSC Co-I Team, 2008. Formation and evolution of the chaotic terrains by subsidence and magmatism: Hydraotes Chaos, Mars, *Icarus*, 194, 487–500, doi: 10.1016/j.icarus.2007.10.023.
- Michael, G. G., Neukum, G., 2010. Planetary surface dating from crater size–frequency distribution measurements: Partial resurfacing events and statistical age uncertainty. *Earth and Planetary Science Letters*, 294, 223–229, doi:10.1016/j.epsl.2009.12.041.
- Moratto, Z. M., Broxton, M. J., Beyer, R. A., Lundy, M., Husmann K., 2010. Ames Stereo Pipeline, NASA's Open Source Automated Stereogrammetry Software, 41st Lunar and Planetary Institute Science Conference, #2364 (abstract).

- Mouginis-Mark, P. J., Christensen, P. R. 2005. New observations of volcanic features on Mars from THEMIS instrument, *Journal of Geophysical Research*, 110 (E08007), doi: 10.1029/2005JE002421.
- Mouginis-Mark, P. J., Wilson, L., Zuber, M. T., 1992. The Physical Volcanology of Mars. In: Kieffer, H. H., Jakosky, B. M., Snyder, C. W., Matthews, M. S. (Eds.), *Mars*, Univ. of Arizona Press, Tucson, 424–452.
- Parfitt, E. A., Wilson, L., 2008. *Fundamentals of Physical Volcanology*, Blackwell, Oxford, 256 pp.
- Platz, T., Massironi, M., Byrne, P. K., Hiesinger, H., 2015. *Volcanism and Tectonism Across the Inner Solar System*. Geological Society, London, Special Publications, 401, 1–56, doi: 10.1144/SP401.22.
- Rampsey, M. L., Milam, K. A., McSween, H. Y., Moersch, J. E., Christensen, P. R., 2007. Identity and emplacement of domical structures in the western Arcadia Planitia, Mars. *Journal of Geophysical Research*, 112, E06011, doi: 10.1029/2006JE002750.
- Sautter, V. et al., 2014. Igneous mineralogy at Bradbury Rise: The first ChemCam campaign at Gale crater, *Journal of Geophysical Research: Planets*, 119, 30–46, doi: 10.1002/2013JE004472.
- Sheridan, M. F., Wohletz, K. H., 1983. Hydrovolcanism: basic considerations and review, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 17, 1–29, doi: 10.1016/0377-0273(83)90060-4.
- Skinner, J. A., Tanaka, K. L., 2007. Evidence for and implications of sedimentary diapirism and mud volcanism in the southern Utopia highland-lowland boundary plain, Mars, *Icarus*, 186, 41–59, doi: 10.1016/j.icarus.2006.08.013.
- Smith, D. E. et al., 2001. Mars Orbiter Laser Altimeter: Experiment summary after the first year of global mapping of Mars, *Journal of Geophysical Research*, 106 (E10), 23,689–23,722, doi: 10.1029/2000JE001364.
- Valentine, G. A., Gregg, T. K. P., 2008. Continental basaltic volcanoes - processes and problems, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 177, 857–873, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2008.01.050.
- Williams, D. A., Greeley, R., Werner, S. C., Michael, G., Crown, D. A., Neukum, G., Raitala, J., 2008. Tyrrhena Patera: Geologic history derived from Mars Express High Resolution Stereo Camera, *Journal of Geophysical Research*, 113, E11005, doi: 10.1029/2008JE003104.
- Williams, D. A., Greeley, R., Zuschneid, W., Werner, S. C., Neukum, G., Crown, D. A., Gregg, T. K. P., Gwinner, K., Raitala, J., 2007. Hadriaca Patera: Insights into its volcanic history from Mars Express High Resolution Stereo Camera, *Journal of Geophysical Research*, 112, E10004, doi: 10.1029/2007JE002924.
- Wood, C. A., 1980. Morphometric evolution of cinder cones, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 7, 387–413, doi: 10.1016/0377-0273(80)90040-2.
- Zimbelman, J. R., 2000. Volcanism on Mars, in: Sigurdsson, H. (Ed.), *Encyclopedia of Volcanoes*, Academic Press, San Diego, California, 771–783.
- Zuber, M. T., Smith, D. E., Solomon, S. C., Muhleman, D. O., Head, J. W., Garvin, J. B., Abshire, J. B., Bufton, J. L., 1992. The Mars Observer Laser Altimeter investigation, *Journal of Geophysical Research*, 97, 7781–7797, doi:10.1029/92JE00341.

## Curriculum vitae

Mgr. **Petr Brož**

25<sup>th</sup> of May, 1984

Place of birth: Czech Republic

Citizenship: Czech

Male

Petr.broz@ig.cas.cz



### Present position

4<sup>th</sup> year Ph.D. student at the Department of Petrology and Structural geology, Faculty of Science,

Charles University in Prague.

Researcher at the Institute of Geophysics, CAS, v. v. i.

### Education

Msc. Structural Geology, Charles University in Prague

(2008-2010). Thesis title '*Plains volcanism in Tharsis region on Mars: Ages and Rheology of Eruption Products*'

Bachelor's degree, Management of Natural Resources, Charles University in Prague

(2005-2008). Thesis title '*Mapování vulkanické aktivity na Marsu v oblasti Tharsis*'

### Abroad experiences

- July 2014 (2 weeks). Third Nordic-Hawaii Summer School, Water, Ice and the Origin of Life in the Universe, Iceland.
- Autumn 2013 (week). workshop "Planet Mars 4", 2013, Les Houches, France
- 03/2013 to 08/2013 (6 months) – fellowship at The Open University, Milton Keynes, United Kingdom
- Summer 2009 – one semester stay at Freie Universität Berlin via Erasmus program
- Summer 2009 (6 months) – fellowship in German Aerospace Center (DLR), Berlin, Germany
- Summer 2007 (1 month) – fellowship in German Aerospace Center (DLR), Berlin, Germany

### Field trips

- Glass mountain (CA), Caribue Lake (CA), USA, august 2012 – part of research team
- Three sisters (ORG), Crater Lake (ORG), Caribue lake (CA), USA, 2011 – part of research team

### Projects

- GAUK grant 580313 of the Charles University '*Pyroklastické kužele na Marsu: analogové experimenty a porovnání s pozemskými příklady*'

### ***Selected conference abstracts***

- Brož, P., Hauber, E., 2015. *Small-scale volcanoes on Mars: distribution and types*, EGU General Assembly, Viena, Austria.
- Brož, P., Hauber, E., Platz, T., Balme, M., 2015. *Evidence for Amazonian highly viscous lavas in the southern highlands on Mars*, Lunar Planet. Sci. Conf. XLVI, abstract #2708, The Woodlands, Texas, USA.
- Brož, P., Čadek, O., Hauber, E., Rossi, A.P., 2015. *The shapes of scoria cones on Mars: detailed investigation of their morphometry based on HiRISE and CTX DTMs*, Lunar Planet. Sci. Conf. XLVI, abstract #1753, The Woodlands, Texas, USA.
- Brož, P., Hauber, E., Rossi, A. P., 2014. *Volcanism inside Valles Marineris? A field of small pitted cones in Coprates Chasma*, European Planetary Science Congress, EPSC2014-508, Portugal.
- Brož, P., Hauber, E., Platz, T., Balme, M., 2014. *Small-scale Post-Noachian Volcanism in the Martian Highlands? Insights from Terra Sirenum*, 48th ESLAB Symposium, ESTEC, Nederland.
- Brož, P., Čadek, O., Hauber, E., Rossi, A.P., 2014. *Morphometry of Scoria Cones on Mars: Insights from Numerical Modeling of Ballistic Pathways*, 48th ESLAB Symposium, ESTEC, Nederland.
- Brož, P., Hauber, E., 2013., *What can small pyroclastic cones tell us about Mars?* HRSC meeting, Berlin, Germany.
- Brož, P., Závada, P., Machek, M., Roxerová, Z., 2013. *Basalt dyke swarm patterning in extensional rift systems: insight from scaled analogue modeling* Basalt 2013, Görlitz, Germany.
- Brož, P., Hauber, E., 2012. *Hydrovolcanic (Tuff?) Rings and Cones on Mars: Evidence for Phreatomagmatic Explosive Eruptions?*, European Planetary Science Congress, EPSC2012-91, Madrid, Spain.
- Brož, P., Hauber, E., 2011. *A unique volcanic field in Tharsis, Mars: Monogenetic cinder cones and associated lava flows*, EPSC-DPS Joint Meeting, Nantes, France.

## Seznam publikací / Selected publications

### Articles in peer-reviewed journals:

1. Hauber, E., **Brož**, P., Jagert, F., Jodłowski, P., Platz, T., 2011. *Very recent and wide spread basaltic volcanism on Mars*, Geophysical Research Letters, 38, L10201, doi:10.1029/2011GL047310.
2. **Brož**, P., Hauber, E., 2012. *A unique volcanic field in Tharsis, Mars: Pyroclastic cones as evidence for explosive eruptions*, Icarus, 218(1), 88–99, doi: 10.1016/j.icarus.2011.11.030.
3. **Brož**, P., Hauber, E., 2013. *Hydrovolcanic tuff rings and cones as indicators for phreatomagmatic explosive eruptions on Mars*, Journal of Geophysical Research: Planets, 118, 1656–1675, doi: 10.1002/jgre.20120.
4. **Brož**, P., Čadek, O., Hauber, E., Rossi, A. P., 2014. *Shape of scoria cones on Mars: insights from numerical modeling of ballistic pathways*, Earth and Planetary Science Letters, 406, 14–23, doi: 10.1016/j.epsl.2014.09.002.
5. **Brož**, P., Hauber, E., Platz, T., Balme, M., 2015. *Evidence for Amazonian highly viscous lavas in southern highlands on Mars*, Earth and Planetary Science Letters, 415, 200–212, doi: 10.1016/j.epsl.2015.01.033.
6. **Brož**, P., Čadek, O., Hauber, E., Rossi, A. P., (submitted). *Scoria cones on Mars: detailed investigation of morphometry based on HiRISE and CTX DEMs*, submitted to Journal of Geophysical Research: Planets.

### Entries in books

1. **Brož**, P., *Pyroclastic cone*, in H. Hargitai and A. Kereszturi, 2015. *Encyclopedia of Planetary Landforms*, ISBN 978-1-4614-3133-6.
2. Fodor, E., **Brož**, P., *Cinder cone*, in H. Hargitai and A. Kereszturi, 2015. *Encyclopedia of Planetary Landforms*, ISBN 978-1-4614-3133-6.
3. **Brož**, P., Neméth, K., *Tuff ring*, in H. Hargitai and A. Kereszturi, 2015. *Encyclopedia of Planetary Landforms*, ISBN 978-1-4614-3133-6.
4. Brand B. D., **Brož**, P., *Tuff cone*, in H. Hargitai and A. Kereszturi, 2015. *Encyclopedia of Planetary Landforms*, ISBN 978-1-4614-3133-6.
5. Brand B. D., Hargitai, H., **Brož**, P., *Hydrovolcanic Feature*, in H. Hargitai and A. Kereszturi, 2015. *Encyclopedia of Planetary Landforms*, ISBN 978-1-4614-3133-6.

### Popular-scientific articles

1. **Brož**, P., 2015. *‘Jak může prostředí ovlivnit sopky na Marsu? Odpověď nabízí sypané kužele’*, in bulletin of Aldebaran, volume 10.
2. **Brož**, P., Pauer, M., 2014. *‘Vulkanismus na Marsu’*, popularization article in magazine Astropis 3/2014, p. 20–23.
3. **Brož**, P., Šuták, M., Špillar, V., 2013. *‘Pohoří uprostřed oceánů’*, popularization article in magazine Přírodovědci.cz, volume II, p. 16–17.
4. **Brož**, P., 2010. *Let na Měsíc*, Slovart, ISBN 978-80-7391-209-3.