Technologické, vědecké a ekonomické příležitosti pro Českou republiku v oblasti těžby ve vesmíru

Petr Boháček

Institut politologických studií, Fakulta sociálních věd Karlovy Univerzity

Výsledek projektu: 17b

VERZE V1

17b - studie tech-ved-eko tezba ve vesmiru - v1

This report is supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: "A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space."

Seznam použitých zkratek

ESA – Evropská kosmická agentura

NASA – Národní úřad pro letectví a vesmír

AV ČR – Akademie věd České republiky

ČVUT – České vysoké učení technické

ÚPT AV ČR – Ústav přístrojové techniky Akademie věd České republiky

ÚFCH JH AV ČR – Ústav fyzikální chemie J. Heyrovského, Akademie věd České republiky

ÚFP AV ČR – Ústav fyziky plazmatu Akademie věd České republiky

ÚF AV ČR – Ústav fyziky Akademie věd České republiky

AÚ AV ČR – Astronomický ústav Akademie věd České republiky

GÚ AV ČR – Geologický ústav Akademie věd České republiky

ÚCHP AV ČR – Ústav chemických procesů Akademie věd České republiky

FEL ČVUT – Fakulta elektrotechnická

KFE FIJF ČVUT – Katedra fyzikální elektroniky Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská České vysoké učení technické

ÚTEF ČVUT – Ústav technické a experimentální fyziky ČVUT

AÚ MFF UK – Astronomický ústav Matematicko-fyzikální fakulta Univerzity Karlovy

VUT – Vysoké učení technické v Brně

LIBS – spektroskopie laserem buzeného plazmatu

delta-v – první kosmická rychlost

E3P – European Exploration Envelope

TLR – technology readiness level

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Souhrnná tabulka vědecko-průmyslových příležitostí ČR v oblasti těžby ve vesmíru 6
Tabulka 2 - Souhrn dílčích zapojení ve formě rozvoje existujících aktivit ESA 29
Tabulka 3 - Kapacity na úrovni ambiciózních projektů v oblasti těžby 29

This report is supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: "A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space."

Obsah

Seznam použitých zkratek ***2***

Seznam tabulek ***2***

1. Souhrn ***4***

2. Úvod ***6***

3. Stav poznání v oblasti těžby ve vesmíru ***8***

4. Proces těžby ***10***

4.1. Prospekce *11*

4.2. Extrakce a zpracování *12*

4.2.1. Těžba vody jako zdroje kyslíku 13

4.2.2. Využití atmosféry Marsu 14

4.2.3. Redukce oxidů: vodíková redukce a karbotermální redukce 15

4.3. Překážky *17*

5. České kapacity a potenciál v oblasti těžby ve vesmíru ***18***

5.1. Dílčí zapojení: kryogenická infrastruktura a zpracovávání prvků *19*

5.2. Ambiciózní projekty: vlastní prospekční instrumenty a prospekční mise *20*

5.2.1. Spektrometrie 21

5.2.2. Lasery 22

5.2.3. Integrace, robotika a další kapacity 23

5.2.4. Příprava mise 23

6. Realizace příležitostí ***24***

6.1. Rozvoj aktivit v ESA *24*

6.2. Ekonomická rovina *26*

7. Závěr ***27***

This report is supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: "A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space."

1. Souhrn

Těžba ve vesmíru bude do budoucna hrát zásadní roli v dynamicky se rozvíjející cis-lunární ekonomice a expanzi lidské civilizace, a proto představuje z ekonomického, technologického a politického hlediska příležitosti k zajištění dlouhodobé prosperity a rozvoje České republiky. Z krátkodobého hlediska je těžba ve vesmíru nástrojem pro využití tradičních, udržení existujících a rozvoj nových kapacit české vědy a průmyslu v oblasti kosmických technologií.

Mezi hlavní překážky pro těžbu ve vesmíru patří jak omezené vědecké a technologické poznání, tak nedostatek krátkodobých tržních finančních motivací. Z hlediska prvního je hlavním určujícím rysem nedostatečně hluboké poznání složení a vlastností nebeských těles a pomalý rozvoj těžebních technologií díky omezené možnosti jejich testování v kosmickém prostředí. Z hlediska druhého se rozvoj nového sektoru se vzdálenou komerční návratností neobejde bez počátečního impulsu ve formě systematické a dlouhodobé podpory. Návratnost takové investice je mezigenerační a může být osudovým krokem pro budoucí stav společnosti.

V rámci Evropské kosmické agentury jako přirozeného prostoru pro rozvoj českých kosmických aktivit může Česká republika

a) rozvinout a rozšířit existující a testované metody pro extrakci a zpracovávání surovin ve vesmíru, konkrétně kyslíku na Měsíci,
b) vyvinout nové instrumenty na prospekci a zpracovávání surovin,
c) vybudovat vlastní prospekční CubeSat s řadou instrumentů pro využití na Měsíci, Marsu a asteroidech.

V oblasti zpracovávání surovin se mohou české vědecké kapacity zapojit do výzkumu nových metod redukce oxidů a zpracovávání jejich vedlejších produktů, zatímco český průmysl má potenciál dodat klíčové komponenty kryogenické infrastruktury pro kyslík, vodík a metan. České vědecké kapacity navíc mohou vyvíjet vlastní unikátní laserové instrumenty pro prospekci (lasery pro ablaci, osvícení či zpracovávání) a navigaci, a vytvořit si tak vlastní výzkumnou specializaci v oblasti těžby ve vesmíru.

Česká republika také disponuje klíčovými kapacitami pro provádění prospekce. V oblasti instrumentů nabízí hmotnostní, neutronové a multifunkční (ViS-NIR) spektrometry či navigační nástroje (LIDAR, obrazová autonomní navigace). Stejně tak je český kosmický průmysl schopen tyto instrumenty integrovat a vyvinout do funkčního CubeSatu, vyžadující palubní software, vlastní konstrukci, komunikaci a navigaci. Astronomické schopnosti v ČR pak doplňují potřebné zázemí pro identifikaci a charakterizaci vhodných těles a výpočet jejich trajektorií.

Vývoj prospekčních CubeSatů postupně nejdříve pro oběžnou dráhu, dále na Měsíc a později na blízké asteroidy a Mars je v existujícím vědecko-průmyslovém potenciálu České republiky. Vyžaduje ale politické odhodlání v rovině investic do programu ESA E3P, prosazení českých kapacit v rámci jednotlivých bloků (Period 2) a systematickou podporu výzkumných a průmyslových kapacit v oblasti těžby, bez kterých se tento sektor kvůli nedostatku incentiv nerozvine.

This report is supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: "A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space."

This report is supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: “A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space.”

Tabulka 1 - Souhrnná tabulka vědecko-průmyslových kapacit ČR v oblasti těžby ve vesmíru

Instrument/Kapacita	Instituce
Hmotností spektrometr	ÚFCH AVČR
Neutronový spektrometr	ÚTEF ČVUT
Multispektrální kamera UV-ViS-NIR	ÚFCH AVČR, GÚ AVČR
LIBS	ÚFP AVČR
LIDAR	FJFI ČVUT
Laserová baterka	ÚFP AVČR, HiLase
Lasery pro zpracovávání	HiLase
Integrace, testování a software	HULD, VZLÚ, S.A.B. Aerospace
Radar	VUT, ERA, ENSA
Autonomní navigace	FEL ČVUT
Testovací platforma	StratoSyst
Charakterizace těles	AÚ AVČR
Vypočet trajektorií	AÚ MFF UK
Zpracovávání surovin	ÚCHP AV ČR
Metody extrakce	ÚCHP AV ČR
Kryogenická infrastruktura	První brněnská strojírna, Cylinders Holding, Eneza, ÚPT AV ČR

2. Úvod

Zatímco potenciální možnosti využití vesmírných surovin jsou zřejmé již od dnů Apolla, stávají se realistické teprve v této době, kdy lidstvo stojí na pokraji rozvoje cis-lunární ekonomiky. Česká republika se rozšíření lidské existence do blízkého vesmíru může buď aktivně zúčastnit nebo pasivně přihlížet. České vědecké a průmyslové kapacity ale jednoznačně jsou na dostatečné úrovni, aby se ČR mohla aktivně zapojit do těžby ve vesmíru. Hlavním předpokladem pro uskutečnění takových ambic je ale politická vůle. Zdrojů politického vůle pro zapojení české vědy, výzkumu a průmyslu do těžby ve vesmíru je celá řada. Patří sem pragmatické důvody na rovině ekonomiky, geopolitiky a prestiže, ale také hodnotově orientované důvody jako je podpora vědy, inspirace společnosti, rozvoj lidstva a pozitivní vize přesahující naši existenci. Žádný z těchto důvodů ale sám o sobě není dostatečně silný bez konkrétní vize a jasně definovaných příležitosti. O jejich formulaci se pokusíme zde.

Tato vize vychází z několika klíčových tezí o stavu poznání těžby ve vesmíru, současné dynamice kosmického průmyslu a prostředí pro naplnění českého potenciálu v této oblasti. První teze je založena na omezeném poznání v oblasti prospekce nebeských těles a stále počátečním vývoji technologií pro extrakci surovin. Tyto dvě oblasti, a schopnosti je naplňovat, budou zásadním způsobem definovat rozvoj celé cis-lunární ekonomiky a dalších navazujících segmentů těžby ve vesmíru. V rané fázi jejich rozvoje ale musí být slabý *pull* faktor, tedy motivace aktérů investovat do

This report is supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: "A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space."

prospekce a základního vývoje technologií s vidinou zisku, doplněn silnějším *push* faktorem, tedy investicemi a podporou ze strany státu, aby se sektor těžby ve vesmíru začal vůbec dostatečně rozvíjet.

Na to navazuje druhá teze, která vychází z očividného nárůstu kapacit na straně soukromého sektoru, který je v pozici hlavního technologického hybatele a inovátora v oblasti kosmu. Úspěch soukromého sektoru v inovativních oblastech je ale stále založen na státní poptávce, dostupností technologií a zázemí ze strany vládních agentur a vytvoření prostředí pro rozvoj tohoto soukromého sektoru ze strany státu. To samé platí v oblasti rozvoje sektoru těžby ve vesmíru. Podobně by tak měla vnímat rozvoj průmyslu i Česká republika a nespoléhat na to, že se kosmický průmysl bude rozvíjet do budoucích perspektivních sektorů jako je těžba ve vesmíru sám, bez pobídky ze strany státu. V USA je touto pobídkou v současnosti zákon zajišťující práva na vytěžený materiál, což je sice sporné z hlediska mezinárodního práva, ale z hlediska národního představuje jednoznačnou podporu soukromým firmám.[1]

Výsledná třetí teze o způsobech naplnění českého potenciálu v oblasti těžby je založena na existujících aktivitách v rámci Evropské kosmické agentury (ESA). Zaprvé, Česká republika nemá šanci se zapojit do již probíhajících aktivit v oblasti těžby ESA jinak, než přijít s jejich inovativním rozšířením a navázat tak na existující inciativy novými směry výzkumu. Zadruhé, Česká republika by měla přijít s vlastní oblastí výzkumu a vývoje technologií na zpracovávání surovin ve vesmíru na základě svých kapacit, aby tyto aktivity mohly být podporovány v rámci plánů a koncepcí ESA v oblasti European Exploration Envelope (E3P). Zatřetí, dlouhodobě nejstabilnější, nejpotřebnější, široce využitelnou a z hlediska českých kapacit realistickou oblastí těžby ve vesmíru je sektor prospekce. Česká republika by měla jako svůj ambiciózní projekt investovat do rozvoje malých prospekčních CubeSatů a instrumentů s aplikovatelností na prospekci Měsíce, asteroidů a v budoucnu i Marsu. Přesně tyto tři možnosti zapojení České republiky do sektoru v oblasti těžby ve vesmíru níže artikulujeme.

Tato studie je výsledkem nejen našeho výzkumu příležitostí v oblasti těžby ve vesmíru, ale také výsledkem propojování různých českých vědecko-průmyslových kapacit a rozvojem spolupráce pracovišť s potenciálem pro synergický vznik schopností v této oblasti. Následný text je rozdělen do tří částí:

1. První část shrnuje základní stav poznání v oblasti těžby ve vesmíru s cílem vystihnout jeho hlavní dynamiku, příležitosti, ale i překážky.
2. Další část identifikuje kapacity české vědy a průmyslu v této oblasti v kontextu současného stavu.
3. Třetí část artikuluje konkrétní příležitosti pro ČR v oblasti těžby v rovině dílčího zapojení a tzv. ambiciózních projektů žádaných Národním kosmickým plánem 2020-2025.

[1] Více se k tématu vyjadřujeme v celé sekci výsledků 12 nebo konkrétněji ve studii 17a poukazující na politické a právní aspekty těžby.

This report is supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: "A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space."

3. Stav poznání v oblasti těžby ve vesmíru

Potenciál těžby ve vesmíru lze analyzovat pomocí třech základních faktorů:

a. poptávkou v cis-lunární ekonomice (co má smysl těžit z tržního hlediska)
b. dostupností konkrétních prvků na nebeských tělesech (kde se poptávané prvky nacházejí),
c. možnostmi jejich těžby včetně dodávky (jak tyto prvky získat).

Co se stane předmětem těžby ve vesmíru závisí na průsečíku výskytu konkrétních elementů na dostupných nebeských tělesech a aktuální poptávce. V současné situaci se na tomto průsečíku nachází zejména těžba surovin využitelných jako palivo. Mezi další hlavní způsoby využití vesmírných surovin patří systémy podpory života a konstrukce infrastruktury. Nicméně je nutné vnímat, že tyto potřeby se budou měnit na základě technologického vývoje, vyplývajících změn v nákladech na konkrétní segmenty kosmických aktivit a rozvoj nových kosmických oblastí, a tedy i poptávky.

Kvůli náročnosti výnosu objektů z gravitační studně planety Země z hlediska technologií, financí, ale také nosnosti raket, jsou současným středem zájmu těžby ve vesmíru zejména suroviny využitelné jako palivo. Vzhledem k tomu, že většina současných raketových nosičů využívá kryogenických pohonů, se většina aktivit zaměřuje zejména na zisk kyslíku, vodíku, potažmo metanu. Kryogenické pohony využívají také všechny tři komerční měsíční moduly vybrané NASA v rámci programu Artemis, tedy firmy Blue Origin a Dynatics vyžívající mix tekutého kyslíku a vodíku, a SpaceX tekutého kyslíku a metanu. Suverénně největší poptávka bude tak po tekutém kyslíku, který je základním oxidantem pro oba typy raketových pohonů a je ho také potřeba největší množství. V případě metanovo-kyslíkových (LOX-LCH4) pohonů je poměr kolem 1:4 a vodíkovo-kyslíkových (LOX-LH2) 1:6.

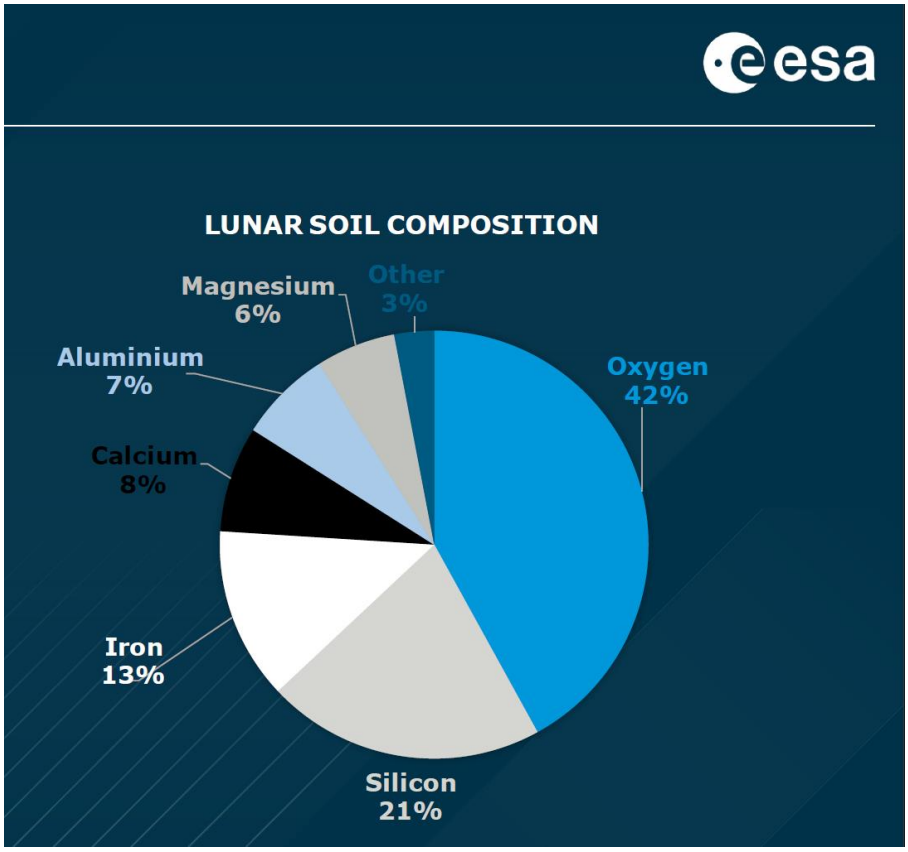
Pro dosažení potřebné hodnoty delta-v pro opuštění měsíčního povrchu pro dvoutunové těleso počítá studie Moon Direct minimálně 6 tun paliva.[2] Jiné studie NASA kalkulují s množstvím 8 tun tekutého kyslíku.[3] Na Marsu pak koncepty NASA počítají s produkcí 7 tun metanu a 22,7 tun tekutého kyslíku paliva pro dosažení delta-v návratovou družicí nesoucí čtyři kosmonauty.[4] Vodíkovo-kyslíkové palivo má sice větší výkonnost, ale nižší bod varu vodíku, což vytváří mnohem větší technické nároky. Vodíkovo-kyslíkové palivo je navíc v porovnání s palivem metanovo-kyslíkovým těžší. Důležité je, že pro efektivní fungování těžby kyslíku musí být produkce v řádech tun. Největším důvodem těžby paliva je uvolnění nosnosti raket zabraných z drtivé většiny palivem pro jiný náklad, umožňující například rozvoj kosmické infrastruktury.

[2] Zubrin, R. (2020). Moon Direct. The New Atlantis. Available at: https://www.thenewatlantis.com/publications/moon-direct

[3] Borowski, S.K. (1995). Human Lunar Mission Capabilities Using SSTO, ISRU and LOX-Augmented NTR Technologies - A Preliminary Assessment. NASA Lewis Research Center. Cleveland, Ohio. https://pdfs.semanticscholar.org/3ee7/1ea838051078bc429034569ef4eb751bee21.pdf

[4] Kleinhenz, J. E., & Paz, A. (2017). An ISRU propellant production system for a fully fueled Mars Ascent Vehicle. 10th Symposium on Space Resource Utilization. 10th Symposium on Space Resource Utilization. https://doi.org/10.2514/6.2017-0423

This report is supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: "A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space."



Obrázek 1: Složení měsíčního regolitu. ESA.

V tomto kontextu představuje největší potenciál nejen z hlediska dosažitelnosti, ale také výskytu prvků, Měsíc. Hlavním důvodem je, že kyslík tvoří téměř polovinu složení měsíčního regolitu (*viz obrázek 1*). Klíčovým zdrojem kyslíku v regolitu je tak voda, také zdroj vodíku, která je ukryta zejména v zastíněných měsíčních kráterech (viz obrázek 2), ale dle nových studií i v osvětlených částech Měsíce.[5]

Voda na Marsu je dlouhodobě prokázána viditelně na jeho pólech, v permafrostu, pod vrstvou prachu v severních regionech, či v hydratovaných minerálech.[6] Na Marsu je využitelnou surovinou nejen voda, ale také oxid uhličitý v atmosféře (podíl 95%) pro výrobu metanu skrze Sabatierův proces (k tomuto procesu je třeba i navíc vodík).

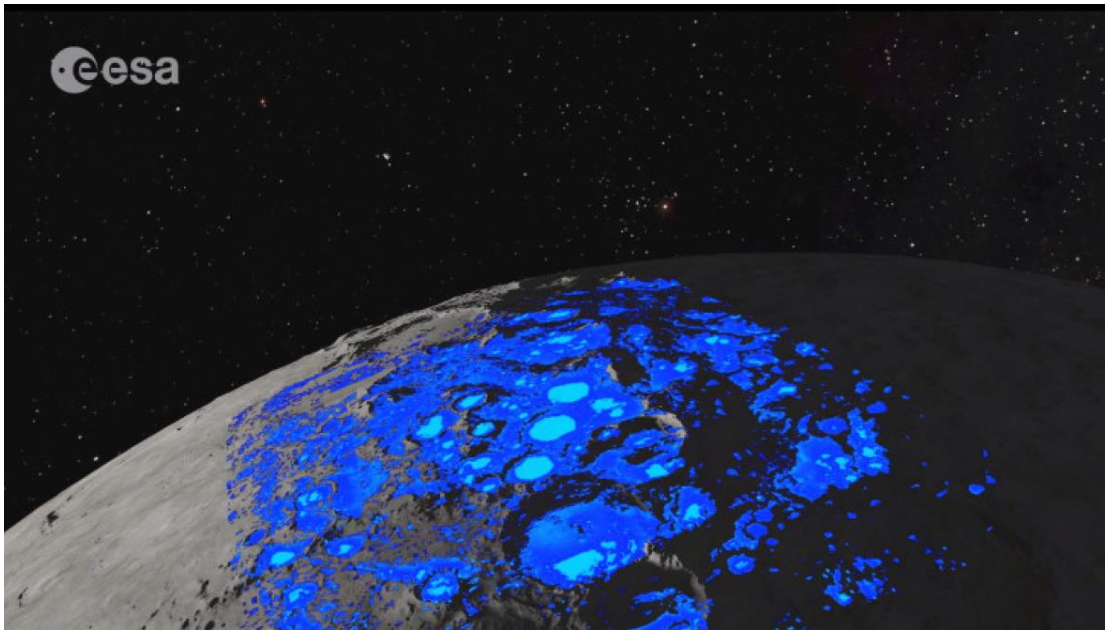
Voda ve formě ledu je také přítomna na asteroidech, ale dle odhadů jen C-typech asteroidů představujících 10 procent všech těles. Dalším zajímavým zdrojem vody je měsíc Phobos, kde se vyskytují molekuly vody pravděpodobně ve formě ledu.[7]

[5] NASA Press Release. (2020). NASA's SOFIA Discovers Water on Sunlit Surface of Moon. https://www.nasa.gov/press-release/nasa-s-sofia-discovers-water-on-sunlit-surface-of-moon/

[6] Wasilewski, T. G. (2018). Evaluation of drilling-based water extraction methods for Martian ISRU from mid-latitude ice resources. Planetary and Space Science, 158, 16–24. https://doi.org/10.1016/j.pss.2018.05.012

[7] Zacny, K., Metzger, P., Luczek, K., Mantovani, J., Mueller, R. P., & Spring, J. (2016, September 9). The World is Not Enough (WINE): Harvesting Local Resources for Eternal Exploration of Space. AIAA SPACE 2016. AIAA SPACE 2016. https://doi.org/10.2514/6.2016-5279

This report is supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: "A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space."



Obrázek 2: Vizualizace výskytu vodního ledu v permanentně zastíněných kráterech. ESA.

Na rozvoji technologií na výrobu paliva ve vesmíru bude záviset také poptávka po dalších prvcích, jelikož hlavním přínosem dočerpávání raket na Měsíci či oběžné dráze je navýšení nákladových kapacit raket a diametrální větší možnosti pro rozvoj kosmické infrastruktury a tedy poptávky. Prvním takovým jednoduchým využitím pro rozvoj jakékoliv infrastruktury na Měsíci je použití regolitu na ochranu proti mikrometeoritům, radiaci či solárním výronům. Konkrétní využití ale mají zejména kovy, které jsou přítomny jak na Měsíci, tak na Marsu, a na asteroidech. Na těchto třech tělesech lze nalézt poměrně podobné prvky, mezi které patří z kovů železo, nikl, měď, titan, hliník a dále například hojně se vyskytující křemičitany. Asteroidy pak mají větší různorodost a dle složení se dělí na asteroidy metalické (M-typ), představující asi čtyři procenta populace, organické (C-typ) zastupující kolem deseti procent a kamenné (S-typ) tvořící 85% většinu všech zmapovaných asteroidů. Organické asteroidy mohou mít přínos ve smyslu vody jako zdroje paliva či křemíku a železa jako stavebních materiálů, zatímco metalické asteroidy nesou slib výskytu platiny a dalších cenných kovů.[8]

4. Proces těžby

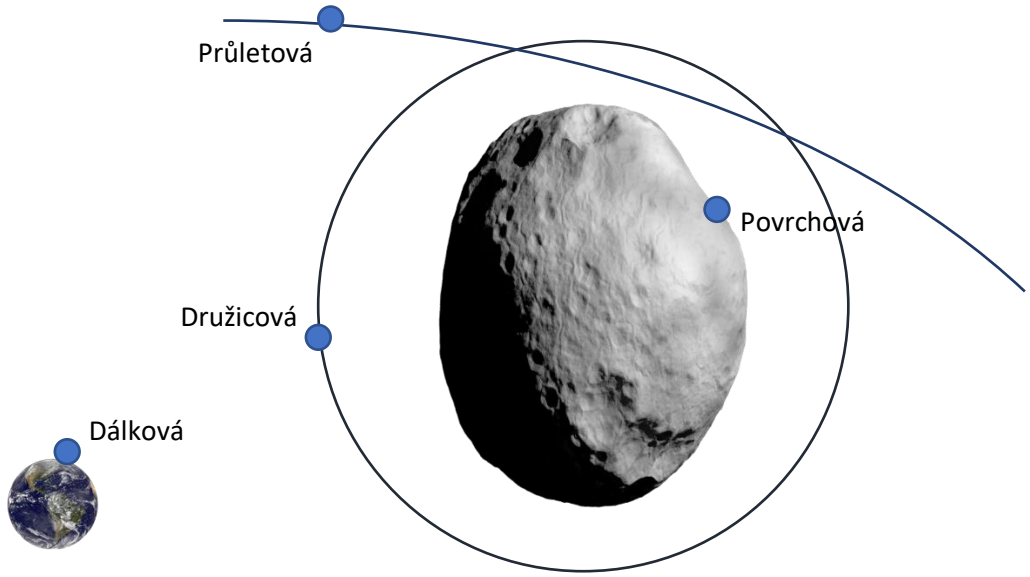
Samotné využívání nerostných surovin ve vesmíru zahrnuje několik komplexních kroků. Konkrétně prospekce, extrakce, zpracování, zhodnocení a využití. Jako mezikroky lze považovat konstrukci potřebné těžební infrastruktury (zejména energetiky), přesun těžených materiálů, čištění a rafinaci surovin a jejich zpracování do použitelného produktu. Prvotním a nejdůležitějším krokem je

[8] Krolikowski, A., & Elvis, M. (2019). Marking Policy for New Asteroid Activities: In Pursuit of Science, Settlement, Security, or Sales? Space Policy, 47, 7–17. https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2018.04.005

This report is supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: "A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space."

prospekce, jelikož definuje veškeré následující kroky. Od ní se odvádí volby metody extrakce či zisku surovin. Každá metoda navíc má jiné požadavky na podpůrnou infrastrukturu, přesun surovin, spotřebu energie či potřeby dalších materiálů pro zpracovávání a rafinaci produktů. Vzhledem k omezenému poznání jak v oblasti prospekce, tak extrakce surovin, nelze plnohodnotně zhodnotit potřeby a dynamiku všech ostatních zmíněných fází, jelikož jsou závislé na bližší konkretizaci a rozvoji technologií v prvních dvou fázích. Z tohoto důvodu se budeme věnovat jen zhodnocení stavu v oblastech prospekce a extrakce surovin, jako jediných dvou, kde lze nyní hledat příležitosti pro české vědecko-průmyslové kapacity.

4.1. Prospekce



Metody prospekce lze rozdělit od nejnáročnějších po nejjednodušší: od robotické povrchové, přes družicovou (obíhající cílový objekt), prolétající, až po dálkovou teleskopickou. Se zvyšující se technologickou náročností, se zvyšuje přirozeně i finanční náročnost, ale také se významně zvyšuje množství získaných znalostí otevírající další možnosti využití materiálů. Dálková prospekce poskytuje obecné parametry pro konkretizaci hledání dalšími zmíněnými způsoby, jelikož poskytuje značně omezené poznání, a to zejména protože neposkytuje pohled pod povrch ovlivněný mikrometeority a expozici slunečnímu záření a radiaci. I přesto je klíčová pro upřesnění jak instrumentů, tak místa pro následující konkrétnější a náročnější způsoby prospekce.

Dobrým příkladem postupné prospekce je hledání vody na Měsíci. Z prvotních pasivních observací se výskyt molekul vody v zastíněných kráterech Měsíce potvrdil až pozorováním impaktu sond LCROSS a Chandrayaan-1 na měsíční povrch.[9] Obě dvě ale odhadují jiné množství vody. LCROSS

[9] Colaprete, A., Schultz, P., Heldmann, J., Wooden, D., Shirley, M., Ennico, K., Hermalyn, B., Marshall, W., Ricco, A., Elphic, R. C., Goldstein, D., Summy, D., Bart, G. D., Asphaug, E., Korycansky, D., Landis, D., & Sollitt, L. (2010). Detection of Water in the LCROSS Ejecta Plume. Science, 330(6003), 463–468. https://doi.org/10.1126/science.1186986 a Li, S., Lucey, P. G., Milliken, R. E., Hayne, P. O., Fisher, E., Williams, J.-P., … Elphic, R. C. (2018). Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions. Proceedings of the National Academy of Sciences, 115(36), 8907–8912. https://doi.org/10.1073/pnas.1802345115

This report is supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: "A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space."

v rozmezí 2,9 – 55,6 % a Chandrayaan až 30 %. Jedná se tak o silně oscilující odhady. Na těchto odhadech staví následné prospekce. Sondy v rámci plánované mise Artemis 1, jako je Lunar IceCube či Lunar Flashlight, jsou navrženy s cílem hledat a zanalyzovat led pomocí specificky navržených instrumentů a trajektoriích letu, jež identifikovala předchozí prospekce. Na základě jejich dat lze následně připravit robotickou povrchovou sondu pro prospekci ve formě podpovrchových vrtů či prvotní otestování metod těžby. Podobným příkladem je také hledání surovin na asteroidech, které je kvůli náročnosti observace pomocí družic značně omezeno na pozemní optické pozorování a spektrografii odraženého slunečního světla.

Na rozdíl od dálkové pasivní prospekce nabízí robotická aktivní prospekce dostatečný způsob získání všech informací potřebných pro zhodnocení jak těžebního potenciálu, tak vhodných těžebních metod. Vedle chemického rozboru nebeského tělesa (kvalitativní a kvantitativní výskyt prvků) je stejně klíčový ten fyzický, který poskytne důležité informace o porozitě tělesa (výskyt podzemních lávových jeskyň či slepené porózní struktury asteroidů), charakteru okolí (výskyt balvanů, jemnost regolitu, pahorky či krátery), což definuje možnosti a způsoby těžby. Robotická prospekce je ale technologicky velmi náročnou kosmickou operací vyžadující měkké přistání, což na asteroidu v podstatě ani není možné díky nízké gravitaci, protože se sonda od povrchu rychle odrazí, odolnost proti extrémním teplotním výkyvům a radiaci, komplexní telekomunikaci a další robotické a autonomní úkony, jež zvládá jen hrstka kosmických agentur. Mezi uvažované mise patřil ARM – Asteroid Redirection Mission, která byla ale pro svou náročnost zrušena.[10]

Množství znalostí se liší dle různých nebeských těles, kde se na první místo řadí Měsíc, poté Mars a poté bohatá populace asteroidů. Ani na jednom tělese neoplýváme dostatečnými znalostmi, jak o kvalitativním a kvantitativním chemickém složení regolitu, tak o fyzických vlastnostech regionů pro jasnou definici potřebných metod jejich efektivní extrakce a využití.

4.2. Extrakce a zpracování

Druhým krokem těžebního procesu je samotná extrakce materiálu či již jeho konkrétní zpracování k využití. To může mít řadu forem od jednoduché mechanické kolekce regolitu, po jeho drcení na požadovanou jemnost, elektromagnetické separace různých prvků, chemického zpracování či komplexnější extrakci již konkrétních elementů. Limitem vědecko-technického poznání metod extrakce a zpracování je malé množství robotických misí umožňující jejich reálné testování na místě v reálných podmínkách. Metody těžby se také liší v požadavcích na další systémy jako je třeba zkapalnění surovin, zdroje energie, reaktivních elementů či kroků pro další zpracování. Většina metod je stále v experimentální fázi a týkají se těžby na Měsíci a Marsu. Způsoby extrakce surovin z asteroidů jsou stále ve značně teoretické rovině výzkumu, kvůli komplexitě robotického průzkumu asteroidů (velmi malé gravitace, nebezpečný hroudovitý povrch, náročná navigace) či malé znalosti výskytu prvků na konkrétních asteroidech. Studie věnující se proveditelnosti či výnosnosti těžby asteroidů jsou doposud založeny na neexistujících, neotestovaných či na čistě teoretických technologiích, proto

[10] Více na webu NASA: https://www.jpl.nasa.gov/missions/asteroid-redirect-robotic-mission-arrm/

This report is supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: "A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space."

nejsou v této studii brány v potaz.[11] V prvotní fázi ale budou založeny na stejných principech jako je těžba na Měsíci a Marsu.[12] Proto se zaměřujeme výhradně na tyto metody.

Vzhledem k tomu, že typ suroviny a způsob jejího získávání definuje všechny další aspekty a potřeby těžebního systému, tato studie se zaměřuje jen na metody těžby konkrétních prvků, které jsou v pokročilé fázi pro testování v kosmu TLR 5 a více (technology readiness level, TLR). Hlavním důvodem je, že pouze tyto metody lze považovat za perspektivní z hlediska hledání potenciálu pro zapojení ze strany českých vědecko-průmyslových subjektů. Na Měsíci či Marsu jsou technologicky nejrozvinutějšími způsoby těžby metody na zisk kyslíku (TLR5+), jako v současnosti nejzajímavějšího prvku pro těžbu ve vesmíru kvůli použití jako palivového oxidantu.[13] Kyslík se vyskytuje ve dvou hlavních formách, ve formě oxidů ve spojení s dalšími prvky, a to buď v pevném stavu v kombinaci s kovy a křemičitany nebo v plynném stavu v kombinaci s uhlíkem v atmosféře Marsu, anebo ve vazbě s vodíkem ve formě vodního ledu. Rozvinuté extrakční metody kyslíku lze tedy dělit dle jeho formy výskytu.

4.2.1. Těžba vody jako zdroje kyslíku

Jak bylo zmíněno výše, na Měsíci byl led v permanentně zastíněných kráterech potvrzen ve velmi nepřesně definovaném množství a kvalitě. Nejdiskutovanější způsob extrakce ledu je založen na zahřátí regolitu s výskytem ledu k dosažení vypařování vody a jeho zkapalnění. K tomu může dojít atmosférickým zahříváním uvnitř skleníku (viz Obrázek 3),[14] pomocí zavrtaných zahřívacích tyčí ve skleníku, či vyvrtáním ledového regolitu a jeho zahřáním v peci.[15] Vodní pára se pak usazuje na kondenzačním tělese chlazeném na rosný bod vody. Zahřívání pomocí zavrtaných tepelných tyčí je omezeno neznámou tepelnou vodivostí (závisející na konkrétním složení regolit) a únikem tepla porózní strukturou nebeských těles. Proto se jako vhodnější v řadě studií jeví zahřívání ve skleníku pomocí sluneční energie přesměrované zrcadly do dómu.[16] Obrovskou výhodou této metody je, že využívá pouze sluneční energie pro zahřívání, která je ale odhadována na vysokých 10 000 kW na m^2. Potřebná infrastruktura by musela být do určité míry mobilní a nese riziko jednoduchého zaprášení zrcadel.

Zatímco na Měsíci je velkou neznámou přesné množství vody v kráterech, na Marsu je v polárních regionech bohatých na led komplikací promíchání vodního ledu s ledem oxidu uhličitého. V nepolárních teplejších oblastech Marsu je vodní led kvůli nižšímu varnému bodu oxidu uhličitého

[11] Mezi takové patří technologie vyvíjené pro těžbu na Měsíci a Marsu, které do naprosto odlišného prostředí asteroidů nelze jednoduše extrapolovat. Jiné koncepty počítají se zachycením asteroidů do vaků k zahřívání, odtáhnutí celých asteroidů k těžební infrastruktuře, či jejich těžbu lasery bez existujících jak laserových tak zachycovacích technologií.

[12] Zacny, K., Metzger, P., Luczek, K., Mantovani, J., Mueller, R. P., & Spring, J. (2016, September 9). The World is Not Enough (WINE): Harvesting Local Resources for Eternal Exploration of Space. AIAA SPACE 2016. AIAA SPACE 2016. https://doi.org/10.2514/6.2016-5279

[13] Meurisse, A. (2019). Oxygen and Water from Regolith and Polar Volatiles on Mars Atmosphere. ESA Space Resources Workshop. Luxembourg

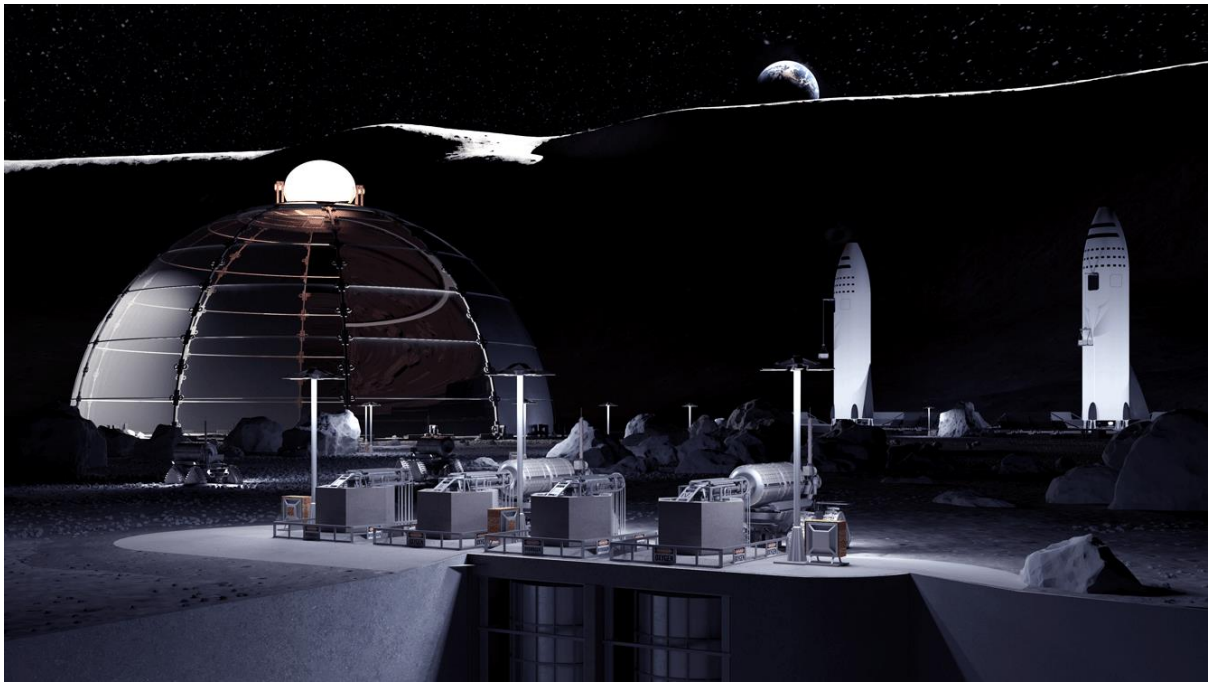
[14] Sowers, G. F., & Dreyer, C. B. (2019). Ice Mining in Lunar Permanently Shadowed Regions. New Space, 7(4), 235–244. https://doi.org/10.1089/space.2019.0002

[15] Wasilewski, T. G. (2018). Evaluation of drilling-based water extraction methods for Martian ISRU from mid-latitude ice resources. Planetary and Space Science, 158, 16–24. https://doi.org/10.1016/j.pss.2018.05.012 a Zacny, K., Indyk, S., Luczek, K., & Paz, A. (2016). Planetary Volatiles Extractor (PVEX) for In Situ Resource Utilization (ISRU) on the Moon. LPICo, 1960, 5021.

[16] Sowers, G. F., & Dreyer, C. B. (2019). Ice Mining in Lunar Permanently Shadowed Regions. New Space, 7(4), 235–244. https://doi.org/10.1089/space.2019.0002

This report is supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: "A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space."

čistší, vyskytuje se více jak metr pod povrchem, což vyžaduje vrtání pro jeho extrakci.[17] Ve všech případech vyžaduje získaná voda purifikaci pro následnou elektrolýzu, kde je rozdělena na vodík a kyslík pro využití jako palivo, systém podpory života či v dalších procesech na zpracování ostatních prvků. Elektrolýza je další energeticky náročný proces, který navíc vyžaduje kryogenickou infrastrukturu a čištění materiálu pro jeho zkapalnění a použití.



Obrázek 3 - Vizualizace těžby vody vypracována pro účely projektu grafickým studiem AD13.

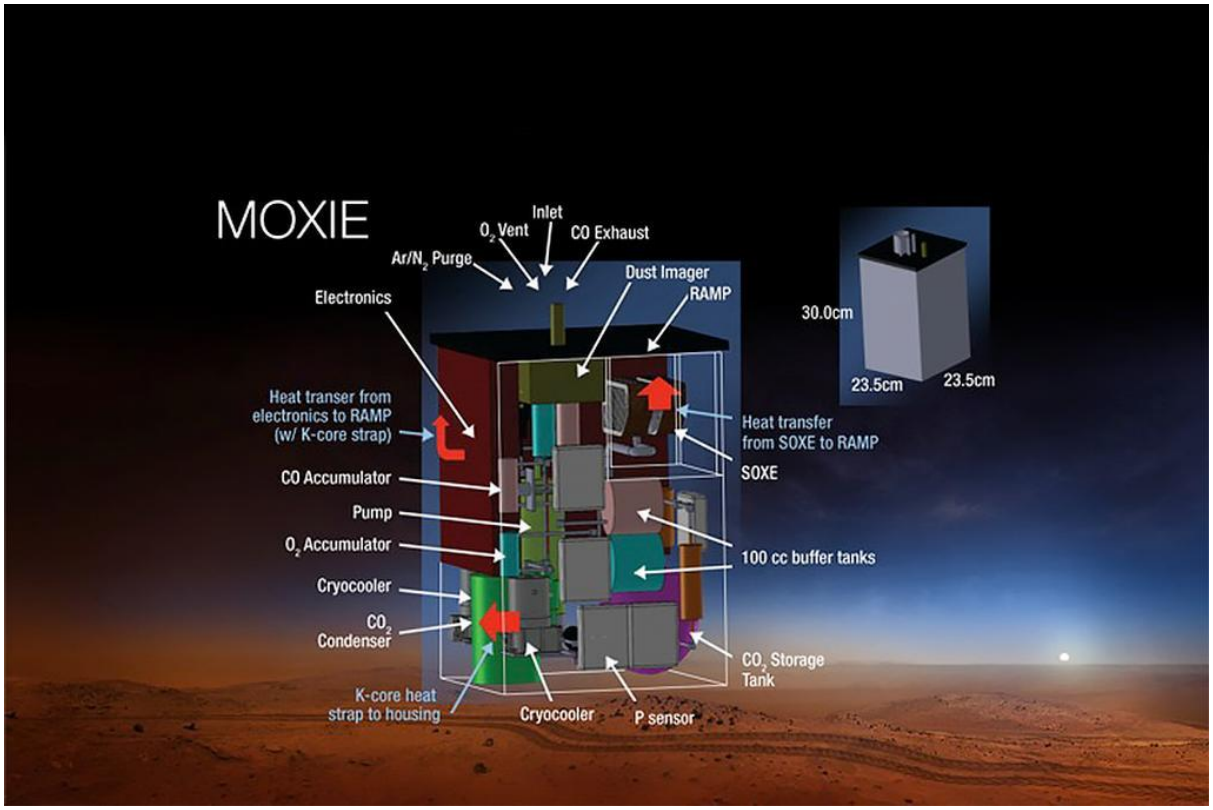
4.2.2. Využití atmosféry Marsu

Na Marsu kromě těžby vody z ledu je cílem těžby jeho samotná atmosféra. Elektrolýza oxidu uhličitého jako 95,3 % složky marťanské atmosféry je další cestou k zisku kyslíku. Jedná se o energeticky nenáročnou metodu vyžadující pouze zdroj energie pro zahřátí elektrolyzéru na 800 °C. Testování toho systému má za úkol zařízení MOXIE, které po přistání v roce 2021 vyjede na palubě rover *Perserverence* v kráteru Jezero na Marsu. Cílem je vyprodukovat téměř 3 kg kyslíku za 50 dní.[18] Oxid uhličitý z atmosféry v kombinaci s vytěženým vodíkem může být také využit v rámci Sabatierova procesu k zisku metanu jako dalšího kryogenického paliva. To má užití například pro plánované rakety SpaceX či pro další chemické reakce na zpracování surovin.

[17] Wasilewski, T. G. (2018). Evaluation of drilling-based water extraction methods for Martian ISRU from mid-latitude ice resources. Planetary and Space Science, 158, 16–24. https://doi.org/10.1016/j.pss.2018.05.012

[18] Hoffman, J. A., Rapp, D., & Hecht, M. (2015, August 28). The Mars Oxygen ISRU Experiment (MOXIE) on the Mars 2020 Rover. AIAA SPACE 2015 Conference and Exposition. AIAA SPACE 2015 Conference and Exposition. https://doi.org/10.2514/6.2015-4561

This report is supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: "A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space."



Obrázek 4: Koncept instrumentu MOXIE na výrobu kyslíku na Marsu. NASA.

4.2.3. Redukce oxidů: vodíková redukce a karbotermální redukce

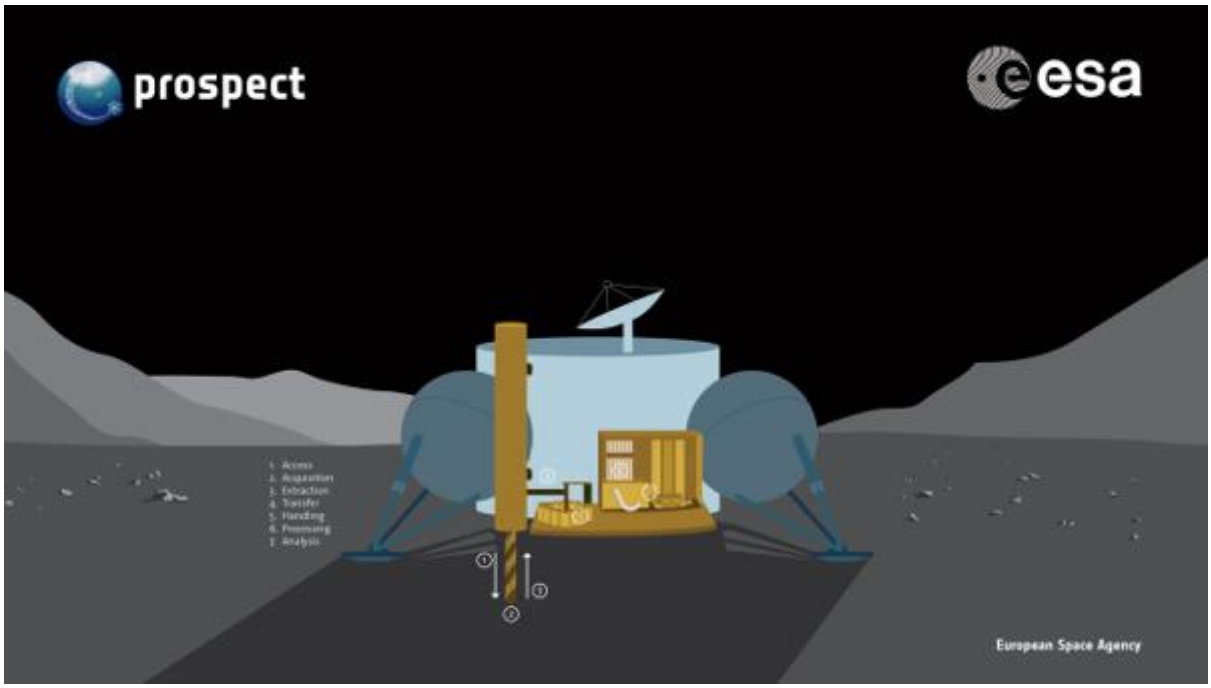
Kyslík se ale také vyskytuje ve formě různých oxidů, kde si k sobě kyslík váže nějaký kov (Fe, Al, Ti, Ni) či křemík (Si), a to zejména na Měsíci. Mezi dva nejpokročilejší způsoby zisku kyslíku na Měsíci v rámci programů Evropské kosmické agentury patří různé dva typy redukce: vodíková a karbotermální.

Vodíková redukce ilmenitu, $FeTiO_3$, jako jednoho z nejhojnějších měsíčních minerálů, je rozvinutá chemická metoda pro zisk kyslíku. Tu bude testovat platforma ProSPA v rámci instrumentu PROSPECT Evropské kosmické agentury, který má přistát na ruské misi Luna 27 v roce 2025 na jižním pólu Měsíce.[19] Její operační proces je založen na roztavení měsíčního regolitu, smíchání s vodíkem a následné kondenzaci molekul vody ke kolekci. Elektrolýza, jako sekundární proces, pak vodu dělí na kyslík a vodík, který je zpětně využit v procesu. Vedlejším produktem vody, potažmo kyslíku a vodíku, je oxid titaničitý (TiO_2). Negativy operace je poměrně velká sofistikovanost vycházející z potřeby

[19] Sargeant, H. M., Abernethy, F. A. J., Anand, M., Barber, S. J., Landsberg, P., Sheridan, S., Wright, I., & Morse, A. (2020). Feasibility studies for hydrogen reduction of ilmenite in a static system for use as an ISRU demonstration on the lunar surface. Planetary and Space Science, 180, 104759. https://doi.org/10.1016/j.pss.2019.104759

This report is supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: "A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space."

vysokotlakového skladování tekutého vodíku, malá efektivita zisku nové suroviny a potřeba výskytu konkrétního minerálu, ilmenitu.



Obrázek 5: Koncept mise Luna 27 s instrumentem ProSPA. ESA.

Oproti této metodě má karbotermální redukce řadu výhod, jelikož ji lze aplikovat na jakýkoli měsíční oxid, jak ve vazbě s kovy, tak křemičitany. Proces má také vysokou míru efektivity. Vedlejším produktem jsou buď vysoce použitelné kovy či křemík. Díky využití metanu s vyšším varným bodem na místo vodíku nevyžaduje náročnou kryogenickou a vysokotlakovou infrastrukturu. To ale kompenzuje potřeba dodávek buď metanu nebo existenci dalšího sekundárního procesu, kde lze pomocí Sabatierova procesu metan vytvořit z vody a marťanské atmosféry, na Měsíci ale musí být doplněn o dodávky uhlíku. Karbotermální redukce je také náročnější na potřebnou teplotu, která musí dosahovat dle složení regolitu mezi 1600 °C až 2000 °C, a soustava nemá dlouhou životnost.[20]

Vedle těchto dvou hlavních metod pro zisk kyslíku existují v rané fázi výzkumu další. Patří sem pyrolýza výparů metalických oxidů (potřeba velké teploty a neznalost škálovatelnosti procesu) či elektrolýza roztaveného regolitu (neznalost škálovatelnosti a rychlá koroze soustavy).

[20] Lavagna, M., Davighi, M., Grasso, M. (2007). Feasibility study for a Moon ISRU small plant Feasibility study for a Moon ISRU small plant demonstrator. International conference on Moon exploration and utilisation. https://sci.esa.int/documents/34200/36212/1567256476943-7-4-14_Lavagna_GRASSO_ISRU2.pdf

This report is supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: "A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space."

Obrázek 6: Výsledek karbotermální reakce simulantu regolitu. Po redukco kyslíku ze simulantu regolitu (vlevo) zbývá jen kov. ESA.

Tyto čtyři představené metody těžby surovin ve vesmíru představují různé výzvy. Liší se zejména v rozdílných požadavcích na podpůrnou infrastrukturu jako je potřebná energie dle typu tepelného zpracování, typ sekundární soustavy dle elementů pro redukci (produkce vody nebo metanu), složení regolitu dle výskytu materiálů či vedlejších produktů pro další zpracovávání (kovy vs. TiO_2).

4.3. Překážky

Mezi hlavní překážky, které byly již latentně zmíněny v popisu procesu, patří zejména:

- nedostatečná prospekce,
- nákladnost testování ve vesmíru,
- kryogenická infrastruktura,
- výroba, skladování a využívání energie.

Hlavní překážkou pro těžbu na Měsíci je stále nedostatek základního vědeckého poznání na úrovni prospekce ale také testování těžebních metod. Důkladná prospekce je klíčová pro přesnější specifikaci celého řetězce procesů možných těžebních metod, včetně požadavků na podpůrné systémy. Patří sem nedostatečná znalost kvantitativního, ale i kvalitativního složení regolitu v různých oblastech nebeských těles (případně na různých asteroidech) a tedy formy a výskyt kýžených prvků, ale také fyzických vlastností jako je granulita regolitu či dostupnost solární energie.

Nedostatek robotických testovacích misí je také překážkou pro výzkum a vývoj systému pro všechny fáze těžby. Pro těžbu na Měsíci či Marsu neexistuje dostatečně věrná simulace místních podmínek, která by umožnila rozvoj potřebných technologií pouze na zemi. Používané simulanty

This report is supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: "A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space."

regolitu jsou nedokonalé, jelikož jeho různé druhy mohou simulovat jen jednu konkrétní vlastnost regolitu, ne však jeho celkovou komplexitu současně. Simulace, které používají pouze jeden dominantní prvek vyskytující se v regolitu také nejsou stoprocentně spolehlivé, jelikož experimenty se nedají jednoduše škálovat. Potřeba přímého testování technologií v kosmu pak neodpovídá množství kosmických misí či schopnosti vynést tak velké množství nákladu a experimentů do vesmíru.

Závislost na kryogenických palivech vytváří vysoké požadavky na chlazení, tlakování a čištění vysoce vznětlivých plynů jako je kyslík, vodík a metan. Velkou překážkou jsou pak teplotní výkyvy v rámci 14 dlouhých měsíčních dnů a nocí kdy teplota osciluje mezi -130 °C a 120 °C. Zejména během dnů je nutné chladící a skladovací infrastrukturu chránit před sluncem. Nástroje na purifikaci, aktivní a pasivní chlazení a skladování jsou stále ve fázi raného vývoje (TRL 3-4).[21]

Další klíčovou překážkou je produkce energie. Odhady pro potřebné množství energie se liší. V rámci studie Air Liquide autoři odhadují potřebu využití 215 kW solární energie pro zisk vody ze zastíněných kráterů, dalších 150kW pro fungování elektrolyzéru s cílem zisku osmi tun tekutého kyslíku a tunu tekutého vodíku.[22] Jiné studie pro zisk vody ze zamrzlých kráterů ale počítají s energii ve výši 10 000 kW na m^2. Celková potřeba energie pro měsíční infrastrukturu je ale v řádu megawattů, a firma Maana Electric, který navrhuje jako jediné řešení výrobu solárních panelů na Měsíci, považuje energetiku po nákladech na start raket za největší technologické omezení těžby ve vesmíru.[23] V silně prašném prostředí jako je Měsíc, Mars či asteroidy je ale rizikem také postupné zastínění solárních panelů, které má navíc na různých místech různou dynamiku. Na asteroidech prach spíše odejde daleko do asteroidu, na Měsíci budou mít problém vodorovná zrcadla, ale především bude problémem nulová atmosféra, která by zrcadla čistila. Na Marsu je naopak atmosféra, prašnost je tedy běžná, proto jsou solární panely pravidelně zaprášené, nicméně díky pohybující se atmosféře jsou často i očištěné.

5. České kapacity a potenciál v oblasti těžby ve vesmíru

Následující část shrnuje vědecko-průmyslové kapacity České republiky v oblasti těžby ve vesmíru, které byly identifikovány v rámci výzkumného projektu. České kapacity jsou identifikovány na základě současného poznání a dynamiky v oblasti těžby ve vesmíru a vycházejících překážek. Výsledné kapacity jsou rozděleny do dvou částí na základě výše popsané dynamiky těžby ve vesmíru. Ta je v první řadě určena překážkami v oblasti extrakčních a zpracovatelských metod surovin a v řadě druhé velkou potřebou přesnější robotické prospekce nebeských těles jako prvotního kroku definujícího následné technologické požadavky na těžbu. První část se v tomto kontextu zaměřuje na dílčí kapacity českého průmyslu a vědy v oblasti jednotlivých technologických procesů. Druhá část se věnuje komplexnějšímu souboru kapacity v podobě prospekčních misí, které naplňují parametry

[21] AirLiquide. (2019). H2O to O2 and H2 production in Space for Life and Energy Support. ESA Space Resources Workshop. Luxembourg.

[22] Ibid.

[23] Uvádí často CEO Maana Electric Joost van Oorschot. Dohledatelné zde https://www.tradeandinvest.lu/news/using-space-power-technology-for-clean-energy-on-earth/

This report is supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: "A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space."

velkého ambiciózního projektu jako vize definované Národním kosmickým plánem 2020-2025 ve smyslu vlastní komplexní kosmické mise.[24]

5.1. Dílčí zapojení: kryogenická infrastruktura a zpracovávání prvků

Výzkum jednotlivých metod extrakce konkrétních materiálů se dějí v rámci již etablovaných výzkumných týmů a institucí. Příležitosti pro české subjekty tak leží zejména v oblastech, které nejsou jasně definovány a jsou ve fázi rozvoje. Takovou oblastí, která se týká zejména českých průmyslových kapacit, je kryogenická infrastruktura. Z hlediska zpracovávání konkrétních surovin ve vesmíru sem patří české vědecké kapacity v práci s prvky vyskytujícími se hojně ve vesmíru, tedy křemíkem a titanem, a to zejména pomocí české specializace v podobě laserových instrumentů.

Výše zmíněnou problematickou částí zpracovávání surovin ve vesmíru je nutnost chlazení, tlakování a skladování kryogenických prvků. Vzhledem k zaměření na kyslík, vodík a metan jako klíčové suroviny lze předpokládat, že kryogenická infrastruktura bude nezbytnou součástí těžby ve vesmíru. Nemusí se vždy však jednat o karbonové velkokapacitní nádrže pro raketové palivo, ale o malé sofistikované součástky celého kryogenického systému. V této oblasti se nabízí řada českých průmyslových kapacit.

Firma PBS (První brněnská strojírna) je producentem kryogenických kompresorů, turbín či heliových expanzních trubek. Další společností je Cylinders Holding se zaměřením na transport vodíku v modulárních celcích. Společnost Eneza se specializuje na kryogenické potrubí jako takové, průtokoměry a zásobníky. Z pole výzkumných kapacit kapacitami v oblasti kosmické kryogeniky lze vyjmenovat Ústav přístrojové techniky AV ČR se specializací na heliové kryostaty. Heliové kryostaty, ale i helium jako prvek, jsou používány jako chladící médium a mohou tak být součástí chlazení pro kondenzátory těžené vodní páry či další techniky. Nemusí jít nutně o samostatný rozvoj těchto technologií, ale spíše spolupráci s dalšími evropskými firmami, konkrétně pak např. s firmou Air Liquide, která je primární dodavatel kryogenické infrastruktury a paliva pro evropské raketové nosiče Ariane či satelitní systémy, sama rozvíjí také systémy pro těžbu ve vesmíru.

Velký potenciál v oblasti zpracovávání surovin pak představuje Oddělení laserové chemie na Ústavu chemických procesů AV ČR (ÚCHP). Unikátní zaměření tohoto pracoviště na zpracovávání oxidu titaničitého (TiO_2). TiO_2 je vedlejší produkt vodíkové redukce měsíčního regolitu, konkrétně pak ilmenitu. Tento proces je vlajkovou lodí ESA v oblasti testování technologií na těžbu.[25] Příležitost pro ČR jako členský stát ESA představuje rozvoj této již existující aktivity nad rámec současného výzkumného týmu kolem instrumentu PROSPECT. Ústav chemických procesů se konkrétně zaměřuje na vlastnosti křemíkových a titanových nanokompozitů,[26] dvou prvků potentních na Měsíci, které jsou vedlejším produktem karbotermální redukce. Dále pak lze zmínit výzkum zaměřující se na různé

[24] Ministerstvo dopravy. Národní kosmický plán 2020-2025.

[25] ESA: Prospect missions. https://exploration.esa.int/web/moon/-/59102-about-prospect

[26] Jandová, V., Fajgar, R., Kupčík, J., Pola, J., Soukup, K., Mikysek, P., Křenek, T., Kovářík, T., Stich, T., & Docheva, D. (2020). Corrosion behavior of titanium silicide surface with hydrogen peroxide: Formation of sub-µm TiOx- based spheres, nanocomposite TiOx/SiOx phases, and mesoporous TiOx/SiOx network. Applied Surface Science, 529, 147133. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147133

This report is supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: "A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space."

zpracovávání TiO_2 pro řadu využití jako ochrana nanokabelů,[27] tvorba TiO_2 monolitů například v kombinaci s oxidem uhličitý[28] potentním na Marsu, a jejich zpracovávání lasery. Potenciál představuje využívání laserové ablace v rámci Oddělení laserové chemie, konkrétně laserem buzené karbotermální reakce kosmických surovin křemíku[29] či TiO_2[30].

Právě kombinace využití konkrétních prvků vyskytujících se ve vesmíru či prvků produkovaných různými zpracovatelskými metodami, včetně zapojení laserů jako nástroje pro jejich zhodnocení, nabízí unikátní příležitost pro výzkum z hlediska českých vědeckých kapacit. Pro ideální nastartování řízené identifikace kapacit ČR pro těžbu ve vesmíru by bylo vhodné zorganizovat konferenci i za přítomnosti zástupců Ministerstva dopravy, neboť se jeví, že těchto kapacit bude daleko více, ale je potřeba zvolit cestu, kterou se máme vydat. Konference by byla vhodnou platformou pro tuto diskusi a klíčové rozhodnutí.

5.2. Ambiciózní projekty: vlastní prospekční instrumenty a prospekční mise

Jako hlavní příležitost pro Českou republiku v oblasti těžby ve vesmíru shledáváme v prospekčním CubeSatu a jednotlivých prospekčních instrumentů s postupným vývojem a využitím od oběžné dráhy, po Měsíc až po blízkozemní planetky. Logika takové mise vychází z očekávané dlouhodobé poptávky po aktivní prospekci, propojitelnosti prospekčních misí pro Měsíc a asteroidy, využití finančně nenáročného výnosu prospekčních CubeSatů jako vedlejšího nákladu (*piggy back*) a spojením již existujících či tradičních českých kosmických kapacit. Takový ambiciózní projekt se skládá z dlouhodobého rozvoje prospekčních instrumentů pomocí jejich testování ve stratosféře, na oběžné dráze, na Měsíci a dále pak na blízkozemních planetkách.

Nutnost prospekce je nejdůležitější krok v celém procesu těžby ve vesmíru, zejména aktivní prospekce, která má potvrdit detailní chemické a fyzické vlastnosti tělesa, kvalitativní a kvantitativní výskyt prvků a povahu prostředí. Vzhledem nedostatečné znalosti jak Měsíce, jenž bude hlavním bodem zájmu těžby v nejbližších letech, tak asteroidů či Marsu lze pouze očekávat nárůst poptávky po detailních prospekčních metodách a instrumentech.

Základní logikou propojitelnosti je fakt, že potřebný detailní průzkum měsíčního povrchu nelze efektivně naplnit kvůli rozloze Měsíce sondami pohybujícími se po povrchu, ale létajícími sondami se schopností pokrýt Měsíc ve větší míře. Gravitační síla Měsíce vyžaduje pro globální dosah takové sondy na Měsíci delta-v o hodnotě 6,1 km/s rozdělených do čtyř zážehů.[31] Hodnota dosažení Měsíce i Marsu

[27] Dřínek, V., Dytrych, P., Fajgar, R., Jandová, V., Kupčík, J., Klementová, M., (2018). TiO2 Protected Silicon Nanowires for Water Splitting. EMN Prague Meeting 2018. https://asep.lib.cas.cz/arl-cav/cs/detail-cav_un_epca-0496727-TiO2-Protected-Silicon-Nanowires-for-Water-Splitting/

[28] Cerhová, M., Sajfrtová, M., Matějová, L., Dřínek, V., Daniš, S., Jandová, V., (2016). The Effect of Solvents Amount on Size of Titanium Dioxide Crystals Produced by Supercrititical Carbon Dioxide Modified by Water. European Meeting on Supercritical Fluids. https://asep.lib.cas.cz/arl-cav/cs/detail-cav_un_epca-0470334-The-Effect-of-Solvents-Amount-on-Size-of-Titanium-Dioxide-Crystals-Produced-by-Supercrititical-Carbo

[29] Pokorná, D., Urbanová, M., Šubrt, J., Bastl, Z., & Pola, J. (2008). IR laser-induced carbothermal reduction of silicon monoxide. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 83(2), 180–184. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2008.08.004

[30] Jandová, V., Pokorná, D., Kupčík, J., Dytrych, P., Cuřínová, P., Fajgar, R., & Pola, J. (2017). Infrared laser radiation-produced TiO-doped Si/SiOx/SiO2 nanocomposite—Entry to TiO-containing materials. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 332, 376–383. https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2016.09.019

[31] Zubrin, R. (2020). Moon Direct. The New Atlantis. Available at: https://www.thenewatlantis.com/publications/moon-direct

This report is supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: "A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space."

z oběžné dráhy je delta-v mezi 6 a 6,3 km/s. Průměrná hodnota delta-v pro všechny zmapované asteroidy je 6.65 km/s.[32] Zatímco studie z Harvardské univerzity mapující dosažitelnost blízkozemních asteroidů bohatých na hodnotné kovy považuje za vhodné delta-v hodnot 5,7 km/s. Z důvodu nepříliš velkého rozdílu mezi delta-v pro Měsíc a asteroidy je na místě přemýšlet o modelu družice, která bude využitelná jak pro globální prospekci Měsíce, Marsu tak i asteroidů. Ve vesmírných misích není příliš běžné, že lze některé sondy využít vícekrát. V případě prospekčních sond tomu je ale tak je. S vyšším počtem sond bude přirozeně klesat cena jejich výroby, což je přesně ten prostor pro vstup soukromého sektoru, který je potřeba pro rozvoj prospekčního trhu přes rozvojem samotného těžebního trhu.

ČR nemá kapacitu pořídit si vlastní raketový nosič nebo financovat vlastní kosmickou misi. Má ale jiné alternativy v kontextu prospekčních misí. Jako testovací platforma s řadou kvalit drahého výnosu na oběžnou dráhu může být využita stratosférická platforma StratoSyst s dostatečně velkou nákladovou, ale i příkonovou schopností pro testování jednotlivých instrumentů. Pro samotnou misi jak na oběžné dráze, tak na Měsíci či na asteroidu, se lze místo dedikovaného raketového výnosu svézt na větších misích. Příkladem je plánovaná mise NASA Artemis 1, která nese řadu takových prospekčních CubeSatů s různými vlastními trajektoriemi okolo Měsíce. Ta zahrnuje a) Lunar IceCube o velikosti 6U s inovativní energeticky nízko náročnou trajektorií, která s iontovými motory zahrnuje jak oblety kolem planety Země, tak v různé vzdálenosti průlety nad póly Měsíce, což umožní dělat různé typy prospekcí, b) 6U Lunar Flashlight a LunaH-Map s opakovanými polárními trajektoriemi, c) NEA Scout s cílem blízkozemní planetky 1991 VG. Z hlediska prospekce asteroidů je možnost využít takzvaného *piggy backu,* neboli vynést prospekční CubeSat s nějakou větší misí. Takový přístup je prozkoumáván již pro řadu prospekčních misí.[33]

Prospekční mise jako příležitost pro českou vědu a průmysl také vychází zejména z existujících kapacit ji naplnit. Mezi ně patří schopnosti sestavit a operovat řadu klíčových instrumentů potřebných pro prospekci, navigaci a integraci takových CubeSatů, včetně identifikace jak vhodných těles, tak vhodných příležitostí pro jejich vyslání. Významným zdrojem kapacit pro prospekci Měsíce i asteroidů je zapojení ČR do mise HERA, ale také tematicky zaměřených aktivit Ústavu fyzikální chemie J. Heyrovského (ÚFCH) a Ústavu fyziky plazmatu (ÚFP) Akademie věd ČR. Tyto kapacity lze využít nyní především pro prospekci na Měsíci, ale jsou také propojitelné s konceptem průzkumu Marsu a asteroidů. Mezi instrumenty použitelné v rámci prospekční mise patří různé spektrografické, laserové ale i radarové a softwarové nástroje.

5.2.1.Spektrometrie

Hlavním instrumentem v kapacitách ČR je Multifunkční UV-ViS-NIR spektrometer VESNA v rozsahu 200-2500 nm z Ústavu fyzikální chemie J. Heyrovského, který v prvotní fázi poslouží pro pozorování spekter meteoritů z oběžné dráhy a v další fázi vývoje jako instrument pro prospekci

[32] Veškerá data jsou k dispozici na Near-Earth Asteroid Delta-V for Spacecraft Rendezvous: https://echo.jpl.nasa.gov/~lance/delta_v/delta_v.rendezvous.html

[33] Machuca, P., Sánchez, J. P., & Greenland, S. (2019). Asteroid flyby opportunities using semi-autonomous CubeSats: Mission design and science opportunities. Planetary and Space Science, 165, 179–193. https://doi.org/10.1016/j.pss.2018.11.002

This report is supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: "A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space."

asteroidů. Tyto kapacity doplňuje podobný již existujícím instrumentem, a to multifunkční ViS-NIR spektrometr zařízení ASPECT v rámci CubeSatu MILANI (dříve APEX), který je součástí mise HERA. Ten je tvořen týmem kolem Tomáše Kohouta z Univerzity Helsinky a Ústavu geologie (ÚG) AV ČR, který má na starosti kalibraci instrumentu, software na zpracovávání dat a testování. Rozsah spektrometru 500-2500 nm s potenciálním rozšířením až na 4000 nm je kalibrován na identifikaci minerálů pro zpracování jako jsou křemičitany, železo či voda. Podobný multifunkční spektrometr s názvem BIRCHES používá plánovaný 6U CubeSat Lunar IceCube na prospekci vody v zastíněných měsíční kráterech.

Dalším spektrometrem v kapacitách ČR je světově unikántí hmotnostní spektrometr pro analýzu prachu HANKA ÚFCH AV ČR. Hmotnostní spektrometry jsou běžně aplikované na prospekci nebeských těles. Příkladem využití hmotnostních spektrometru jsou mise HERA či OSIRIS-Rex, které detekují složení asteroidů dle analýzy mikročástic pohybujících se díky nízké gravitaci v jejich okolí. Tyto instrumenty hrají roli v řadě dalších kosmických aplikacích. Součástí navrhovaného vývoje hmotnostního spektrometru HANKA je jeho testování na meteorickém prachu na oběžné dráze s předpokládanou cenou 800,000 eur. V neposlední řadě sem patří neutronový spektrometr, který je hlavním instrumentem pro detekci vody na Měsíci v CubeSatu LunaH-map mise Artemis 1. Přesně takový instrument rozvíjí pro měsíční misi iSpace na měření výskytu vody do jednoho metru v regolitu Ústav technické a experimentální fyziky (ÚTEF) ČVUT.[34]

5.2.2.Lasery

V oblasti prospekce má potenciál být unikátním instrumentem spektroskopie laserem buzeného plazmatu, které se věnuje ÚFP AV ČR, konkrétně pracoviště PALS ve spolupráci s ÚFCH AV ČR. Tato metoda umožňuje zejména kvalitativní chemický rozbor prvků na základě emitovaných spekter plazmatu vytvořeného laserem a je využívána například robotickým průzkumným vozidlem Curiosity. Specifickým přínosem českého pracoviště je i schopnost nejen kvalitativní, ale i kvantitativní chemické analýzy, tedy množství identifikovaných prvků. Zatímco současná aplikace metody spektroskopie laserem buzeného plazmatu (LIBS) je omezená na vzdálenost v rámci jednotek centimetrů, nabízí tato metoda i uplatnění na vzdálenosti v jednotkách kilometrů. Takový nástroj pak může být unikátním instrumentem pro dálkovou prospekci na rozsáhlých tělesech během průletu jako je Mars či Měsíc, anebo při průletu kolem blízkozemních planetek. Takový laser nemusí být výkonný až na úroveň efektivní ablace, ale pouze jako podpůrný aktivní prvek s cílem iluminace povrchu v zastíněných měsíčních kráterech s cílem následné spektroskopie. Podobný koncept plánuje provést 6U CubeSat Lunar Flashlight v rámci mise Artemis 1.[35] Potenciál zde může mít také využití laserových zařízení k ablaci povrchu s cílem vypaření vody a její kondenzace a kolekce například na asteroidech.[36] Zatímco tato metoda je stále ve fázi raného vývoje, je nutné zde zmínit kapacity dalšího pracoviště

[34] Robert Filgas, R., Pospíšil, S., Slavíček, T., Calzada-Diaz, A., (2020). Neutron detector for surface mapping of lunar water. 71st International Astronautical Congress.

[35] NASA. Lunar Flashlight mission. https://www.jpl.nasa.gov/missions/lunar-flashlight/

[36] Hein, A. M., Matheson, R., & Fries, D. (2020). A techno-economic analysis of asteroid mining. Acta Astronautica, 168, 104–115. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.05.009

This report is supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: "A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space."

Ústavu fyziky plazmatu, HiLase, které se ucházelo o tendr ESA pro studii na úrovni proof-of-concept pro vývoj kosmického laseru s potenciálem ablace materiálu.

Lasery nemají pouze roli jako instrumenty pro prospekci. Česká republika má tradici ve výrobě a instalaci laserových altimetrů a LIDARů v řadě kosmických misích (MARS 1996, Rusko a Mars Polar Lander 1999, NASA) v rámci pracoviště vedeného profesorem Ivanem Procházkou. Kromě regulérních altimetrů toto pracoviště navrhlo i LIDAR právě pro prospekční mise na asteroidy s detekcí povrchu do výšky 5 km s precisností pod 10 cm. Takový instrument je zásadní pro jakékoliv operace blízké povrchu z hlediska hrudovitosti a skalních útvarů asteroidů.

5.2.3. Integrace, robotika a další kapacity

Z hlediska integrace má ČR značné kapacity. Firma HULD (dříve Space Systems Czech) zajišťuje celkovou strukturu sondy, operační software, testování a operační zázemí poskytuje pro prospekční misi HERA firma HULD. Pravděpodobně nejschopnější firma českého vesmírného průmyslu S.A.B. Aerospace a stejně tak VZLÚ mají za sebou komplexní integrace a kosmické mise a celkově disponují kapacitami samostatnou českou kosmickou misi na prospekci zrealizovat. V oblasti navigace robotických misí má za sebou řadu výzkumných projektů zaměřující se na zpracovávání dat pro autonomní vizuální navigaci, sběr vzorků, vyhodnocování fyzických vlastností okolí a kompletní autonomní provoz robotických sond na Měsíci, Marsu či asteroidech Fakulta elektrotechnická (FEL) ČVUT.[37] Další dílčí kapacity ČR pro prospekční misi jsou v oblasti monostatických radarů či magnetometrů pro analýzu fyzických vlastností těles, zejména jejich vnitřní struktury (porozita či výskyt lávových komor). Zde opět figuruje zapojení ČR do mise HERA, konkrétně v digitálním radarovém designu pro monostatický radar CubeSatu Juventas ze strany Filipa Záplaty, Vysokého učení technického v Brně.[38] Schopnosti kompletně nebo částečně sestavit takový instrument by vzhledem k tradičním kapacitám v oblasti radarů a firem jako je ERA či ELDIS nemuselo být obtížné.

5.2.4. Příprava mise

Pro přípravu prospekčních misí bude důležitá předběžná charakterizace cílových těles. Ta může vycházet ze světových kapacit Astronomického ústavu (AÚ) AV ČR, který může plnit v oblasti průzkumu asteroidů stejnou roli jako plní v rámci mise HERA. Jedná se o observaci cílové planetky a maximální upřesňování jejich základních fyzikálních vlastností pro úspěšnou navigaci, orientaci a provedení celé mise. Tyto kapacity mají další klíčový potenciál v identifikaci vhodných těles pro průzkum na základě jejich relativní blízkosti zemi. Mise na průzkum asteroidů musí být založena na identifikaci množství asteroidů, které budou v době mise prolétat v takové blízkostí Země, resp. budou hlediska orbitální mechaniky ve Sluneční soustavě snáze dostupné. Jinými slovy jde o vyhodnocení trajektorie asteroidů na základě výpočtu delta-v pro dosažení jeho dráhy. ČR v této kalkulaci může počítat s delta-v komerčně dostupných raketových nosičů, raketových nosičů vyvinutých v rámci ESA anebo využít místa již existujících velkých misích. Nalezení průsečíku ideálního množství planetek, jejich fyzických a chemických vlastností vhodných pro průzkum a těžbu a delta-v dostupných

[37] ČVUT FEL . (2019) Zpráva o kosmických aktivitách ČVUT FEL. https://www.fel.cvut.cz/cz/vv/kosmicke-aktivity.html

[38] Herique, A., Plettemeier, D., Goldberg, H., & Kofman, W. (2020). JuRa: the Juventas Radar on Hera to fathom Didymoon. Copernicus GmbH. https://doi.org/10.5194/epsc2020-595

This report is supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: "A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space."

samostatných raketových nosičů či již plánovaných misí je otázkou práce astronomů, ale také fyzikálních a matematických výpočtů.

Referenčním bodem je plánovaná mise ESA 12U CubeSatu M-Argo, pro kterou bylo identifikováno 148 potenciálních planetek, ze kterých se na základě další observace teprve vyberou finální čtyři kandidáti.[39] Proces výběru je dlouhodobý a klíčový pro design celé mise, jejích instrumentů a cílů. Vzorem může být projekt Near-Earth Object Human Space Flight Accessible Targets Study (NHATS), který s využitím vysokovýkonných počítačů vypočítal pro tisíce blízkozemních asteroidů nejnižší hodnoty delta-v potřebných k jejich dosažení dle jejich přiblížení k Zemi v průběhu dalších 30 let.

Cíl identifikace, spektrální analýzy a popisu planetek je plnohodnotně schopen naplnit Astronomický ústav Akademie věd ČR a Ústavu fyzikální chemie J. Heyrovského. Pro Astronomický ústav Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy může být dosažitelným úkolem zajištění kalkulace potřebného delta-v dle trajektorie tisíců asteroidů v propojení s kapacitami raketových nosičů. Astronomický ústav MFF UK může k takovým komplexním výpočtům využít svůj projekt Asteroids@Home, který několik let počítá dráhy tisíců asteroidů distribuovanou metodou.

6. Realizace příležitostí

Realizace identifikovaných příležitostí závisí na třech faktorech. Prvním je stav poznání v oblasti těžby ve vesmíru, který byl shrnut výše. Zbylé dva faktory, kterým se tato část věnuje, je dynamika prostředí pro naplnění českého potenciálu v oblasti těžby v rámci ESA, a ekonomické aspekty využívání kosmických surovin. V rámci ESA se může Česká republika zapojit rozvojem existujících aktivit ESA, vytvořením vlastní nové výzkumné oblasti/metody pro těžbu ve vesmír, a prosazením vlastního ambiciózního projektu. Na ekonomické rovině je to posílení *push* faktoru pro rozvoj jak vědy, tak průmyslu v této oblasti.

6.1. Rozvoj aktivit v ESA

Stejně jako pro veškeré kosmické aktivity ČR tak i pro těžbu ve vesmíru je hlavní platformou pro její realizaci Evropská kosmická agentura. V rámci ESA existuje celá řada příležitostí pro zapojení subjektů z členských států do oblasti těžby ve vesmíru. Identifikujeme tak tří možné způsoby zapojení a) rozšíření již existujících metod extrakce v programech ESA, b) rozvoj vlastní oblasti pro zpracovávání surovin, c) formování ambiciózního projektu prospekčních misí. V těchto oblastech se mohou české subjekty zapojit do evropské vědecké spolupráce, která samozřejmě závisí na deklarované finanční podpoře pro sektor těžby ve vesmíru daného členského státu ESA. I když existují aktéři, kteří se věnují oblastem využitelných v různých částech prospekce vesmírných surovin, jejich zájmy určují výzkumné příležitosti, které musí Česká republika vytvořit, pokud chce takový potenciál budovat a využívat. Možnost se do takových aktivit zapojit ale vyžaduje velmi proaktivní akademickou činnost v dané

[39] Mereta, A., Izzo, D., (2018).Target selection for a small low-thrust mission to near-Earth asteroids. Advanced Concepts Team, European Space Research and Technology Center, Noordwijk,
The Netherlands. https://arxiv.org/pdf/1802.02418.pdf

This report is supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: "A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space."

oblasti zahrnující vlastní výzkum, experimenty a publikace deklarující základní znalosti, zájem, kapacity, ale také vlastní vědecký přínos do této oblasti.

V rámci ESA těžba spadá pod Exploration Envelope Programme (E3P). Pro vyjmenované dílčí příležitosti je tak oblastí jejich zapojení právě program E3P, jehož součástí je a) mise PROSPECT a instrument ProSPA, b) studie zaměřující se na karbotermální redukci a c) rozvoj kryogenické soustavy pro těžbu a elektrolýzu vody ve spolupráci s firmou Air Liquide. Příležitostí ale není zapojení se přímo do těchto existujících aktivit, které již mají definované výzkumné týmy, dodavatelské řetězce a dlouhodobě definovaný plán aktivit a rozpočtu. Hlavní příležitostí těchto třech existujících aktivitách E3P na těžbu je jejich rozvoj do dalších fází dle Strategie pro vesmírné suroviny ESA.[40] Znamená to nejen zapojení se do definovaných aktivit v pracovním plánem E3P ale i politické prosazení aktivit, kterými může ČR přispět. To předpokládá předložení inovativního navázání a rozšíření těchto aktivit, které budou realizovatelné ze strany ČR. Ústav chemických procesů AV ČR by měl mít možnost nabídnout studie využití produktů redukce oxidů z měsíčního regolitu. Zde máme konkrétně na mysli zpracovávání a využívání TiO_2 jako vedlejšího produktu vodíkové redukce ilmenitu pro zisk kyslíku. To představuje konkrétní rozšíření existující aktivity E3P na těžbu programu PROSPECT. Obdobné uvažovaní platí i v metodě karbotermální redukce, kde vedle kyslíku jsou dalšími produkty jak kovy, tak křemičitany. Podobně má možnost Česká republika hledat příležitosti pro zapojení průmyslu v oblasti kryogeniky ve spolupráci s AirLiquide.

Dalším formátem pro zapojení se do aktivit v oblasti využití kosmických surovin je rozvoj vlastní metody, technologie či instrumentu pro těžbu ve vesmíru. Český republika s tradičním zaměřením na laserové technologie tak může využít potenciál laserů pro

a) zpracovávání jednotlivých prvků z výzkumného hlediska v rámci Oddělení laserové chemie na Ústavu chemických procesů AV ČR,
b) parametrizaci unikátního českého laserového instrumentu pro spektroskopii laserem buzeného plazmatu (LIBS) v rámci Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, doplněnou o rozvoj analýzy získaných dat ze strany Ústavem fyzikální chemie J. Heyrovského,
c) průmyslově zaměřené obrábění surovin lasery v rámci pracovišti HiLase Ústavu fyziky AV ČR.

Rozvoj unikátních laserových instrumentů pro těžbu ve vesmíru pak má potenciál být samostatnou českou větví v rámci strategie ESA pro využití surovin v kosmu. Česká republika pro takovou aktivitu má nejlepší parametry ze všech členských států ESA.

Vedle rozvoje vlastních instrumentů pak je nutno zmínit i možnost zapojení již existujících instrumentů do plánovaných misí ESA. Přesně takovou příležitostí v minulosti byla mise M-Argo, která v rozsahu 12U s laserovým altimetrem a multispektrální kamerou představovala přímo typ prospekční mise, na kterou by ČR měla aspirovat. Další podobnou příležitostí na otestování řady instrumentů, včetně multifunkčního či hmotnostního spektrometru (jako je český instrument HANKA) je mise Comet

[40] ESA Space Resources Strategy. https://exploration.esa.int/web/moon/-/61369-esa-space-resources-strategy

This report is supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: "A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space."

Intercept, která po rozhodnutí o primárním dodavateli bude příležitostí pro vývoj příslušných instrumentů. Stejným způsobem by mohl být zapojen i český LIDAR pro průzkum asteroidů.

Vedle těchto dílčích aktivit by ale měla ČR být schopna přijít s vlastními ambiciózními projekty. Vedle zmiňovaného konceptu prospekčních CubeSatových misí využitelných jak pro Měsíc, Mars tak asteroidy, je možností zaměření se na konkrétní vlastní inovativní technologie. Významný potenciál mají laserové instrumenty užitné k prospekci nebeských těles. Kdyby se z této oblasti stala národní nika, Česká republika by nebyla v roli země, která se snaží najít možnosti zapojení či rozvinutí již existujících výzkumných a vývojových aktivit, ale v roli iniciátora a inovátora na technologiích, ve kterých již nyní exceluje při jiných aplikacích. V kontextu historického odkazu laserových instrumentů ve vesmíru a existence špičkových laserových pracovišť v ČR by takový projekt zaměřený na prospekční nástroje dával smysl. V případě HiLase nebo Ústavu fyziky plazmatu takový problém ale není a vývoj laserů v jejich dikci pro prospekci je jen otázkou politické vůle. Pokud by taková vůle byla, může být ČR zajímavá nejen z pohledu ESA, ale také pro program Artemis NASA.

Jakékoliv zapojení do projektů v rámci EP3 či aspirace na vedení vlastních projektů na těžbu je ale závislé na signifikantním navýšení českého příspěvku v ESA, jelikož současný český příspěvek v rámci EP3 v hodnotě 1,2 milionu eur na dalších pět let takové aktivity neumožňuje. V kontextu celkového rozpočtu ESA v sektoru *human and robotic exploration* v hodnotě 1,953 miliard na pět let je český příspěvek zanedbatelným číslem. Ve všech variantách je rozvoj českých vědecko-průmyslových aktivit v oblasti těžby ve vesmíru primárně otázkou politické vůle ČR. Ta je základem pro rozvoj jakýchkoliv iniciativ v této výzkumné fázi, ve které sektor těžby ve vesmíru bude stále ještě několik let.

6.2. Ekonomická rovina

Politická vůle je logicky významně závislá na ekonomické racionalitě. Musí se ale vypořádat s dvěma fakty. Zaprvé, nelze realisticky popsat ekonomickou návratnost investic do těžby ve vesmíru nad rámec silně zpochybnitelných predikčních studií s obrovským rozptylem návratnosti (kyslík nebo vodík pro raketové palivo vs. těžba titanového asteroidu). Zadruhé, rozvoj cis-lunární ekonomiky jako obrovské techno-ekonomické příležitosti pro Českou republiku je kvůli nedostatečnému rozvoji jak prospekce, tak těžebních technologií pro jednoduchou ekonomickou racionalizaci, nutně závislý na aktivní a cílené pomoci a poptávce ze strany státu. To nemusí nutně znamenat pouze vytvoření finančních incentiv, ale celé řady nástrojů k nasměrování vědeckého a průmyslového potenciálu do oblasti těžby ve vesmíru. Přesně kvůli této dynamice NASA přišla s nástrojem, jak soukromé firmy pobídnout k oblasti těžby a nabízí za vzorky od 50 do 500 gramů měsíčního regolitu zaplatit od 15 do 20 tisíc dolarů.[41] Podobný přístup byl zdroj největší inovace v kosmických technologií v podobně rozvoje znovupoužitelných raket SpaceX pod programem COTS. A zatímco v rozvinutých oblastech kosmické ekonomiky je závislost na jakékoliv formě státní podpory spíše negativní praxí a udržitelný

[41] NASA Procurement notice. Purchase of Lunar Regolith and/or Rock Materials from Contractor. https://beta.sam.gov/opp/77726177617a45d0a196e23a587d7c14/view a také na Patel, V.N., (2020). NASA will pay for moon rocks excavated by private companies. MIT Technology Review. https://www.technologyreview.com/2020/09/10/1008310/nasa-pay-moon-rocks-lunar-samples-excavated-private-companies/

This report is supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: "A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space."

průmysl musí být zejména samostatný, inovace a rozvoj do nových segmentů se bez státní pomoci nestane, minimálně ne v České republice. Důvodem je nedostatečné silný *pull* faktor, tedy stále neexistující ekonomická poptávka a garantované zhodnocení investic pro soukromého investora. Pro stát je ale hlavním ekonomickým argumentem stále nekonkrétní několikanásobná návratnost do kosmických technologií, která je v otázce těžby rozšířena o aktuální revoluční rozvoj cis-lunární ekonomiky s nastupujícím programem Artemis a jiných plánovaných misí. Být součástí tohoto nového ekonomického segmentu bude pro každou společnost v budoucnu stěžejním zdrojem rozkvětu.

Ekonomický potenciál těžby ve vesmíru může být hodnocen z různých úhlů. Ekonomický potenciál může být výpočtem shrnujícím hodnoty vytěženého materiálu, prodaných služeb (dočerpání paliva), nově vytvořeného trhu, nových pracovních míst, nových segmentů kosmických aktivit, ušetřeného nákladového prostoru díky menšímu množství neseného paliva či množství nově vyneseného materiálu. Studie zaměřující se na konkrétní prvky (vodu, palivo) pak porovnávají návratnost investice do těžby dle rozdílu mezi cenou vytěženého kg prvku se současnou průměrnou cenou vynesení 1 kg na oběžnou dráhu. Vzhledem k výše popsanému stavu poznání v oblasti těžby nepracují s reálným stavem technologií. Studie, které se snaží vypočítat návratnost těžby asteroidů za účelem prodeje cenných kovů na pozemském trhu jsou postaveny na exponenciálním rozvoji technologií, stabilitě terestriálních trhů a těžbě a existenci funkčních metod extrakce a zpracování.[42]

Komprehenzivní studie PwC,[43] která se snaží popsat celkový ekonomický přínos, uvádí hodnotu v rozmezí 73-170 miliard eur v období od 2018-2045 s přínosem mezi 845 tisíc až 1,8 milionu plných ročních pracovních úvazků. Zatímco technologický přínos do ostatních oblastí je odhadován mezi 2,5 miliardy eur, ten celkový tržní je odhadován na 54 miliard eur. Dle ušetřené ceny za výnos nákladu (USD/kg) se uvádí 86 až 254 miliard eur 2027-2045 (68 miliard za palivo, 1 miliarda za systémy podpory života, 16 miliard za stavební materiál). Vznik nové průmyslové poptávky, která bude muset být uspokojena přinese 74 miliard eur a 845 000 tisíc pracovních míst. Tato poptávka bude mít také druhotný ekonomický efekt a do ostatních sektorů ekonomiky se přeleje až 54 miliard eur, včetně 2,5 miliard eur vytvořených přenosem nových technologií. Studie ale upozorňuje i na faktory, které mohou několikrát znásobit ekonomický dopad. Patří mezi ně proliferace znovupoužitelných raketových nosičů či inovace snižující dostupnost oběžné dráhy, dynamický rozvoj nových segmentů cis-lunární ekonomiky jako je údržba satelitů či turistika či větší dostupnost malých kosmických misí zvyšující poptávku.

7. Závěr

Zapojení České republiky do těžby ve vesmíru je otázkou politické vůle. Vědecko-průmyslové kapacity ČR jsou na dostatečné úrovni, aby se prokázaly jako přínosné a inovativní v rámci evropských, ale i mezinárodních snah využít nerostné suroviny ve vesmír. Takový potenciál ale nelze naplnit jednorázovým rozhodnutím nýbrž dlouhodobou a systematickou snahou tento sektor v ČR rozvíjet.

[42] Hein, A. M., Matheson, R., & Fries, D. (2020). A techno-economic analysis of asteroid mining. Acta Astronautica, 168, 104–115. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.05.009

[43] Scatteia, L., Perrot, Y., (2018). Study to assess the future potential market and value chain of Space Resources Utilisation (SRU). PriceWaterhouseCoopers.

This report is supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: "A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space."

K tomu je ale potřeba prvotního kroku, který vytvoří základní hybnost směrem k této vizi. Předložené příležitosti jsou tímto prvotním krokem, který může uvést věci v chod a mít tak generační dopad na směřování České republiky.

Identifikované příležitosti vycházejí ze stavu poznání v oblasti těžby ve vesmíru, povahy rozvoje kosmického sektoru a prostředí pro realizaci českého potenciálu v této oblasti. Definujícími vlastnostmi těžby ve vesmíru je zaprvé aktuální zaměřením na nahrazení paliva těžbou kyslíku, vodíku či případně metanu a zadruhé potřeba detailní prospekce kosmických těles. Povahou tohoto ekonomicky a technologicky perspektivního sektoru je nutnost dlouhodobé a strategické podpory jejího rozvoje. Prostředím pro jejich realizaci jsou a) rozšíření výzkumu, vývoje a realizace existujících metod v oblasti zisku kyslíku, b) vývoj a výzkum vlastních unikátních metod a instrumentů a c) vlastní vytvoření prospekčních CubeSatu, včetně plánování jejich prospekčních misí. Potenciál, který ČR v těžbě ve vesmíru má, zahrnuje kapacity pro dílčí zapojení v rámci existujících projektů (tabulka 1) ale také ambiciózní projekt v podobě prospekčních CubeSatových misí (tabulka 2).

This report is supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: “A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space.”

Tabulka 2 - Souhrn dílčích zapojení ve formě rozvoje existujících aktivit ESA

Metoda	Aktivita ESA E3P	Instituce	České kapacity	Entity
Vodíková redukce	ProSPA – PROSPECT	Open University	Zpracování a využití TiO_2	ÚCHP AV ČR
Karbotermální redukce		Politecnica Di Milano, University of Glasgow, ESTEC	Technologie zpracovávání křemičitanů a kovů. Zpracovávání laserovými nástroji	Oddělení laserové chemie ÚCHP AV ČR
Kryogenika elektrolýzy	Elektrolýza vody na výrobu tekutého vodíku a kyslíku	Air Liquide	Prvky kryogenické soustavy: kompresory, turbíny, heliové expanzí trubky a heliové kroystaty, průtokoměry.	První brněnská strojírna, Cylinders Holding, Eneza, ÚPT AV ČR

Tabulka 3 - Kapacity na úrovni ambiciózních projektů v oblasti těžby

Instrument/Kapacita	Role	Instituce
Hmotností spektrometr	Prospekce prachu na nebeských tělesech pro prospekci	ÚFCH AVČR
Neutronový spektrometr	Detekce vody na Měsíci	ÚTEF ČVUT
Multispektrální kamera UV-ViS-NIR	Detekce prvků na kosmických tělesech	ÚFCH AVČR, GÚ AVČR
LIBS	Laser pro tvorbu plazmatu k podpovrchovému měření chemických vlastností (kvalitativní i kvantitativní analýza)	ÚFP AVČR
LIDAR	Fyzické zmapování povrchu a citlivostí pod 10 cm	FJFI ČVUT
Laserová baterka	Osvětlení zastíněných oblastí pro chemickou analýzu spektrometrií	ÚFP AVČR, HiLase
Lasery pro zpracovávání	Využití pulzních či CW laserů pro zpracovávání kosmických surovin	HiLase
Integrace, testování a software	Kompletní zpracování palubního počítače, konstrukce, energie a základních kapacit CubeSatu	HULD, VZLÚ, S.A.B. Aerospace
Radar	Prospekce vnitřní struktury objektů a fyzických vlastností místa	VUT, ERA, ENSA
Autonomní navigace	Vykonávání autonomních operací robotických prospekčních misí na základě zpracovávání obrazových dat	FEL ČVUT

This report is supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: "A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space."

Testovací platforma	Nízkonákladové testování instrumentů do 10 kg a 4kW	StratoSyst
Charakterizace těles	Charakterizace asteroidů dle složení (typ), rotace, tvaru a trajektorie.	AÚ AVČR
Vypočet trajektorií	Kalkulace průletových příležitostí pro průzkum asteroidů dle dosažitelného delta-v	AÚ MFF UK

This report is supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: "A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space."