

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra měření



Diplomová práce

# **Návrh kosmické mise CubeSat**

*Ing. Michal Kuneš*

Vedoucí práce: doc. RNDr. René Hudec, CSc.

Studijní program: Kybernetika a robotika

Obor: Letecké a kosmické systémy

27. května 2016



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student:	<b>Ing. Michal Kuneš</b>
Studijní program:	<b>Kybernetika a robotika</b>
Obor:	<b>Letecké a kosmické systémy</b>
Název tématu česky:	<b>Návrh kosmické mise Cubesat</b>
Název tématu anglicky:	<b>Design of Cubesat Space Mission</b>

### Pokyny pro vypracování:

Definování konceptu Cubesat v roce 1999 znamenalo skutečnou revoluci v oblasti kosmonautiky. Tento přelom umožnil univerzitním týmům i rozvojovým zemím zapojit se do kosmických aktivit a navrhnout a postavit vlastní malou družici. V současné době se však družice typu CubeSat začínají stále více využívat i pro kosmický výzkum či testování nových technologií. Diplomová práce bude navazovat na výstupy získané v rámci individuálního projektu a toto téma dále prohlubovat, zároveň bude sloužit jako základ pro plánovanou disertační práci. Student v rámci své diplomové práce vypracuje komplexní návrh kosmické mise využívající družici typu CubeSat. Tento návrh bude vycházet z fází 0 až B projektového cyklu podle standardu ECSS-M-ST-10C a bude brát v úvahu možnosti a omezení pro vývoj české studentské družice. Výsledkem tedy bude studie, která bude obsahovat cíle mise, zhodnocení technické a ekonomické proveditelnosti, porovnání a výběr koncepce, stanovení limitů (hmotnostních, objemových a energetických) pro užitečné zatížení a jeho výběr, definování dalších subsystémů družice (stabilizace, komunikace a další) a posouzení rizik a kritických technologií.

### Seznam odborné literatury:

- [1] Small Satellites and Systems 2014 Proceedings. - volně ke stažení na <http://congrexprojects.com/2014-events/4S2014/proceedings>
- [2] 6th Cubesat symposium proceedings-online presentations - volně ke stažení na <https://www.cubesatsymposium.eu/index.php/6th-cubesat-symposium>
- [3] M. Paluszek: The Cubesat Book - volně ke stažení na <http://www.psatellite.com/CubeSat/documents/CubeSatBook.pdf>
- [4] Small Satellites: Past, Present, and Future by H. Helvajian (Author) and S. Janson (Author), ISBN-13: 978-1884989223, Publisher: AIAA (August 15, 2009).

Vedoucí diplomové práce:	doc. RNDr. René Hudec, CSc. (K 13137)
Datum zadání diplomové práce:	10. prosince 2015
Platnost zadání do <sup>1</sup> :	30. září 2017

L. S.

Doc. Ing. Jan Holub, Ph.D.  
vedoucí katedry

Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 5. 1. 2016

---

<sup>1</sup>Platnost zadání je omezena na dobu tří následujících semestrů.

## **Poděkování**

Na tomto místě bych velice rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce, panu doc. RNDr. René Hudcovi, CSc., za jeho cenné rady a pomoc při jejím zpracování.

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 27. května 2016

.....

## **Abstrakt**

Cílem této diplomové práce je navrhnout kosmickou misi CubeSat, která by mohla být realizována na Fakultě elektrotechnické na Českém vysokém učení technickém. Práce se skládá ze dvou částí, teoretické a praktické. První část poskytuje základní informace o kosmickém prostředí, nebeské mechanice, družicích, standardech pro družice typu CubeSat a další důležité informace, které ovlivňují kosmické mise a jejich návrh. Druhá část je zaměřena na návrh již konkrétní kosmické mise. Obsahuje cíle této mise, porovnání a výběr koncepce, definování jednotlivých subsystémů, výběr možného užitečného vybavení, stanovení hmotnostních, objemových a energetických limitů, posouzení rizik a kritických technologií a zhodnocení technické a ekonomické proveditelnosti.

## **Abstract**

The aim of this diploma thesis is to design of the CubeSat space mission, that could be realised at the Faculty of Electrical Engineering of the Czech Technical University in Prague. The thesis consists of two parts. The first part provides a basic information about space environment, orbital mechanics, satellites, standards for CubeSats and other important information, that affects space missions and their design. The second part is focused on the proposal of the space mission. It includes mission objectives, selection of concept, subsystems and payload, determination of mass, volume and energy limits, assessment of risk and critical technologies, and evaluation of technical and economic feasibility.

# Obsah

Obsah.....	5
Seznam obrázků .....	6
Seznam tabulek .....	7
Úvod.....	8
1. Vesmír .....	9
1.1. Vesmír a jeho hranice .....	9
1.2. Kosmické prostředí.....	10
1.3. Nebeská mechanika .....	17
2. CubeSat .....	20
2.1. Historie .....	21
2.2. Standardizace.....	21
2.3. Dosavadní a budoucí vývoj .....	23
2.4. CubeSaty v České.....	26
3. Návrh mise .....	32
3.1. Cíl mise.....	33
3.2. Koncepce .....	35
3.3. Oběžná dráha a životnost.....	36
3.4. Subsystémy .....	37
3.5. Stanovení limitů.....	41
3.6. Užitečné vybavení .....	44
3.7. Posouzení rizik a kritických technologií .....	44
3.8. Stanovení nákladů.....	46
3.9. Zhodnocení proveditelnosti .....	48
3.10. SWOT analýza .....	49
Závěr.....	51
Literatura .....	53
Přílohy .....	57

# Seznam obrázků

Obrázek 1: Nebezpečí kosmického prostředí pro družice podle jednotlivých oběžných drah	10
Obrázek 2: Rozdělení atmosféry do jednotlivých vrstev .....	11
Obrázek 3: Degradace konstrukce solárních panelů Mezinárodní kosmické stanice vlivem atomárního kyslíku po 1 roce ve vesmíru .....	12
Obrázek 4: Grafické znázornění nehomogenity gravitačního pole Země .....	13
Obrázek 5: Magnetické pole Země v různých ročních obdobích.....	14
Obrázek 6: Rozložení protonů (vlevo) a elektronů (vpravo) v radiačních páslech Země.....	16
Obrázek 7: Díra od mikrometeoroidu v solárním panelu Mezinárodní kosmické stanice.....	17
Obrázek 8: Elementy dráhy.....	18
Obrázek 9: Popis pohybu po elipse .....	19
Obrázek 10: Rozdělení kosmického systému.....	20
Obrázek 11: Univerzální vypouštěcí kontejner P-POD .....	23
Obrázek 12: Počet vypuštěných CubeSatů mezi roky 2000 a 2015.....	24
Obrázek 13: Rozdělení vypuštěných CubeSatů podle států, ve kterých byly vyvinuty.....	25
Obrázek 14: První funkční prototyp družice czCube .....	27
Obrázek 15: Mechanické řešení těla družice PilsenCUBE s výklopnými stěnami.....	28
Obrázek 16: Prototyp družice CzechTechSat.....	29
Obrázek 17: CubeSat Lucky-7 .....	30
Obrázek 18: Subsystémy (vlevo) a prototyp (vpravo) družice VZLUSAT-1 .....	31
Obrázek 19: Doporučený postup při návrhu kosmické mise .....	32
Obrázek 20: Rozdělení družice na jednotlivé subsystémy .....	37
Obrázek 21: Subsystémy CubeSatu ESTCube-1 .....	38

# Seznam tabulek

Tabulka 1: Rozdělení družic podle hmotností.....	21
Tabulka 2: Definice poslání a cílů mise .....	33
Tabulka 3: Hmotnostní limity .....	42
Tabulka 4: Objemové limity .....	43
Tabulka 5: Energetické limity .....	43
Tabulka 6: Tabulka pro určení rizik .....	45
Tabulka 7: Identifikovaná rizika .....	46
Tabulka 8: Náklady na testování a vypuštění družice skCube .....	47
Tabulka 9: SWOT analýza .....	50
Tabulka 10: Pohled na vypuštěné CubeSaty z různých hledisek .....	57



# Úvod

První umělou družicí Země se stal sovětský Sputnik vypuštěný 4. října 1957. Právě toto datum je pro kosmonautiku jedno z nejdůležitějších a označuje začátek takzvané kosmické éry lidstva. Lidstvo od té doby do vesmíru vypustilo již několik tisíc družic, sond, pilotovaných a nepilotovaných kosmických lodí a dalších umělých těles. Bez nadsázky se dá říci, že kosmonautika dokázala za těch téměř 60 let změnit náš svět i náš pohled na něj.

Družice od Sputniku prodělaly ohromný vývoj a v dnešní době by se bez nich lidé jen stěží obešli. Předpověď počasí, monitorování živelních katastrof, satelitní televize, telefonování na nedostupných místech, navigace, to je jen několik příkladů služeb, které nám moderní družice nabízejí. Družice však slouží i k vědeckým účelům, díky nim lidstvo poznalo a prozkoumalo okolní vesmír, ale také se více dozvědělo o své rodné planetě.

Návrh, vývoj, výroba, vypuštění a provoz družic jsou však finančně, technologicky i časově velice náročné. Stavbu vlastní družice si proto mohou dovolit jen kosmické agentury, velké mezinárodní společnosti nebo špičkové vědecké ústavy. Ještě před pár lety toto skutečně platilo, ale díky konceptu družic CubeSat je dnešní situace naštěstí zcela jiná. Vlastní družici si mohou postavit vysokoškolští studenti i vědecké týmy z rozvojových zemí. CubeSaty se tak staly opravdovou kosmickou revolucí.

Tato diplomová práce se zaměřuje právě na družice typu CubeSat a návrh kosmické mise, která by mohla být realizována na Fakultě elektrotechnické na Českém vysokém učení technickém. Diplomová práce má být prvním krokem, na který by mělo navazovat již rozpracování konkrétního návrhu družice a později také její stavba.

# 1. Vesmír

Vesmír je místo extrémů, které je velice odlišné od podmínek, které panují na Zemi. Družice však musí v těchto podmínkách nejen bezchybně fungovat, ale také plnit cíle své mise. První kapitola je proto zaměřena na vysvětlení základních faktorů, které ovlivňují stavbu družice a návrh kosmických misí.

## 1.1. Vesmír a jeho hranice

Slova vesmír a kosmos jsou v češtině užívána jako synonyma. Obě tato slova označují prostor, který se nachází mimo naši planetu Zemi. Slovo vesmír pochází z ruského *весь мир* (čte se jako *ves mir*), což je výraz pro celý svět, a do češtiny bylo přejato v době národního obrození. [1, p. 747] Slovo kosmos naopak pochází z řeckého *κόσμος* (čte se jako *kósmos*), které znamenalo řád, úpravu a později také a svět. [1, p. 315] Avšak i vesmír se dá dále dělit. Do vzdálenosti 2 miliony kilometrů od Země hovoříme o kosmickém prostoru, ve větší vzdálenosti již hovoříme o hlubokém prostoru. [2, p. 151]

Stanovení dolní hranice vesmíru není jednoduché a dodnes na tom nepanuje úplná shoda. Zkoumáním této hranice se zabýval maďarský vědec Theodor Von Karman. Letadla ke svému letu potřebují vztlak, s rostoucí výškou proto musí kompenzovat klesající hustotu atmosféry zvětšováním plochy svých křídel. Naopak družice potřebují co nejnižší hustotu atmosféry, protože čím hustší atmosféra je, tím více jsou jednotlivými molekulami vzduchu zpomalovány. Karman stanovil jako hraniční výšku pro letadla i družice 100 km, nad ní už letadla nejsou schopna vytvářet dostatečné množství vztlaku a pod ní nejsou naopak družice již schopné se na oběžné dráze udržet. Této výšce se tak na počest svého objevitele říká Karmanova hranice. Je však nutné dodat, že jde spíše jen o teoretickou hranici, protože ve skutečnosti se hustota atmosféry neustále mění a vliv na to má třeba sluneční cyklus nebo sluneční aktivita. [3] Americké letectvo, U.S. Air Force, ale za hranici vesmíru považuje již výšku 50 mil (asi 80 km). [4]

## 1.2. Kosmické prostředí

Kosmické prostředí má mnohá specifika, která kladou na techniku využívanou ve vesmíru značné nároky. Tyto nároky se liší podle zvolené oběžné dráhy, její výšky a sklonu. Na nízké oběžné dráze, kam jsou CubeSaty vypouštěny, jsou družice do jisté míry chráněny před energetickými částicemi magnetickým polem Země, avšak na druhou stranu pouze na nízké oběžné dráze se vyskytuje atomární kyslík, který je schopný degradovat povrchové materiály.

Space hazard	Spacecraft charging		Single-event effects			Total radiation dose		Surface degradation		Plasma interference with communications	
	Surface	Internal	Cosmic rays	Trapped radiation	Solar particle	Trapped radiation	Solar particle	Ion sputtering	O <sup>+</sup> erosion	Scintillation	Wave refraction
LEO <60°			Relevant	Important		Important	Relevant	Relevant	Important	Important	Important
LEO >60°	Relevant		Important	Important		Important	Relevant	Relevant	Important	Important	Important
MEO	Important	Important	Important	Important		Important	Important	Relevant		Important	Important
GPS	Important	Important	Important			Important	Important	Relevant		Important	Important
GTO	Important	Important	Important	Important		Important	Important	Relevant		Important	Important
GEO	Important	Important	Important			Important	Important	Relevant		Important	Important
HEO	Important	Important	Important	Important		Important	Important	Relevant		Important	Important
Inter-planetary			Important		Important		Important	Relevant		Relevant	Relevant

Important
  Relevant
  Not applicable

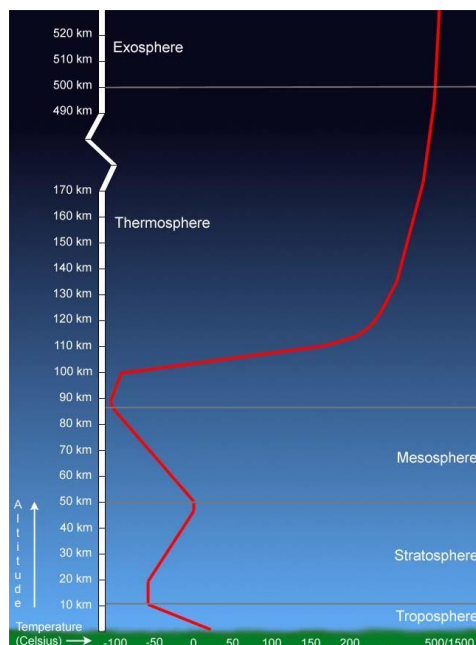
Obrázek 1: Nebezpečí kosmického prostředí pro družice podle jednotlivých oběžných drah<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Převzato z [35]

## Atmosféra

Na nižších oběžných drahách je atmosféra stále ještě poměrně hustá a jednotlivé molekuly narážejí do povrchu družice, tím ji zpomalují a snižují výšku její oběžné dráhy. Družice klesá do nižších vrstev atmosféry, kde je atmosféra ještě hustší a družice se dále zpomaluje. Jedinou možností, jak tomu zabránit, je družice s vlastním pohonem, ten ji dokáže urychlit a navýšit tak její oběžnou dráhu. Hustota atmosféry je ovlivněna slunečním cyklem a sluneční aktivitou. V případě vyšší aktivity se atmosféra více zahřeje, expanduje do okolního prostoru a ve stejné výšce má proto vyšší hustotu. Zemskou atmosféru lze na základě růstu či poklesu teploty s rostoucí výškou rozdělit do několika vrstev. Ale hranice mezi jednotlivými vrstvami nejsou ostré a lze se proto setkat s různým výškovým rozdělením. [5]

- Homosféra
  - Troposféra: od povrchu do 10 až 12 km
  - Stratosféra: od 10 až 12 km do 50 km
  - Mezosféra: od 50 km do 90 km
- Termosféra: od 90 km do 400 km
- Exosféra: od 400 km výše



Obrázek 2: Rozdělení atmosféry do jednotlivých vrstev<sup>2</sup>

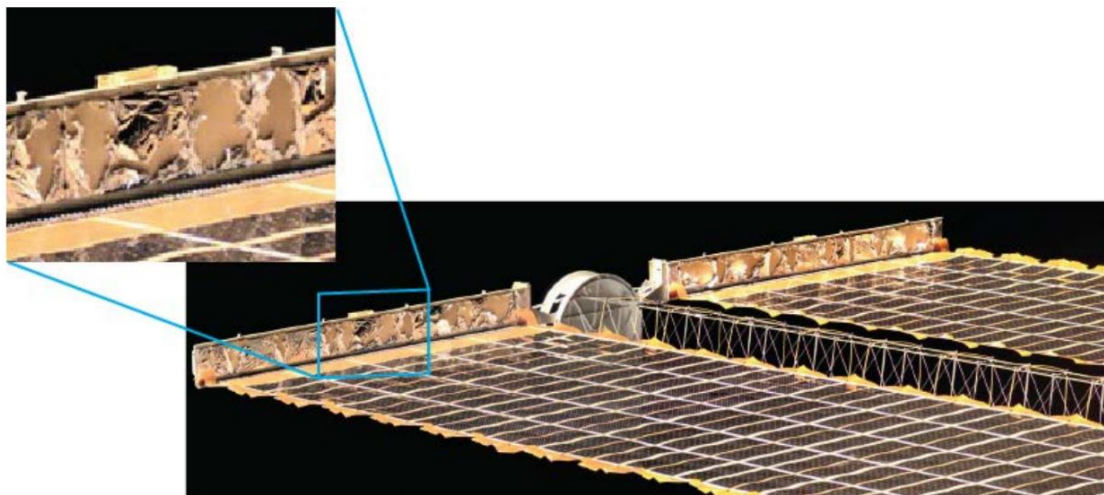
<sup>2</sup> Převzato z [5]

## Vakuum

Synonymem slova vakuum je vzduchoprázdno, ale toto označení není zcela přesné. Vakuum totiž neznačí prostor bez přítomnosti vzduchu. Rozumí se jím prostor, ve kterém je tlak plynu nižší než atmosférický tlak. V případě vesmíru hovoříme o ultravysokém vakuu ( $10^{-5}$  až  $10^{-10}$  Pa) na oběžné dráze Země nebo dokonce o extrémně vysokém vakuu (méně než  $10^{-10}$  Pa) v mezihvězdném prostoru. Mezi nepříznivé účinky vakua na kosmickou techniku patří hlavně odplyňování. To je stav, při kterém dochází k vypařování molekul z povrchových vrstev materiálu. Následkem toho může dojít ke kontaminaci optických nebo jiných přístrojů či degradaci maziv. Dalším důsledkem vakua může být takzvané studené svařování, kdy se dva kovové materiály spojí vzájemným třením nebo nárazem. [6] [7] [8]

## Atomární kyslík

Atomární kyslík je tvořen působením ultrafialového záření na molekuly kyslíku v horních vrstvách atmosféry. Nebezpečí atomárního kyslíku spočívá v tom, že degraduje povrchové materiály. Atomární kyslík oxiduje kovové materiály a silně reaguje i s materiály, které obsahují uhlík, dusík nebo síru. [7]



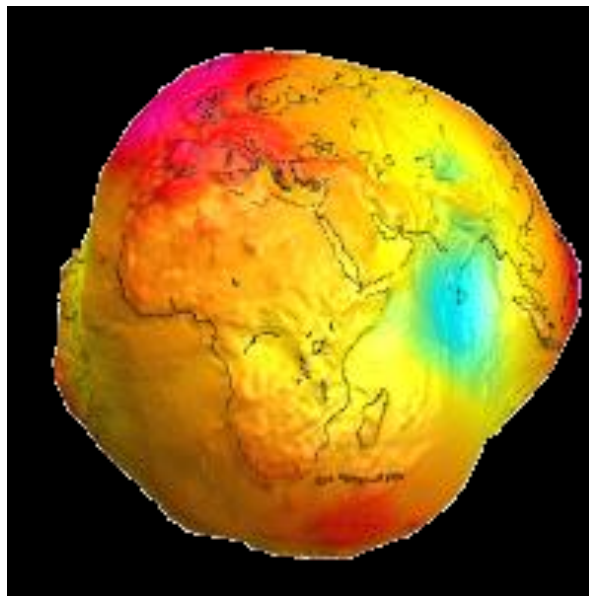
Obrázek 3: Degradace konstrukce solárních panelů Mezinárodní kosmické stanice vlivem atomárního kyslíku po 1 roce ve vesmíru<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> Převzato z [7]

## Gravitace

Slovo gravitace pochází z řeckého slova *gravis*, což znamená těžký. Gravitace spolu s elektromagnetickou silou, slabou interakcí a silnou interakcí patří mezi čtyři základní interakce. Ze všech těchto interakcí je tou nejslabší, avšak působí bez výjimky na všechny formy hmoty a má nekonečný dosah. I přes to, že gravitační síla klesá se čtvercem vzdálenosti, její význam oproti dalším interakcím se vzdáleností naopak vzrůstá. Gravitační síla je vždy přitažlivá a vzájemná. To znamená, že stejnou silou na sebe působí jakákoliv dvě tělesa, i když jsou jejich hmotnosti naprosto odlišné. Gravitační pole Země není homogenní, je to dáno jejím tvarem a také proměnlivým složením kůry. Nesprávně se uvádí, že ve vesmíru je stav beztlíže, správně se používá termín mikrogravitace. Stejně jako odplynění, tak i mikrogravitace může způsobit kontaminaci. Prach a další drobné částičky, které jsou na Zemi usazeny, se mohou vlivem mikrogravitace dostat na citlivé detektory. [5]



Obrázek 4: Grafické znázornění nehomogenity gravitačního pole Země<sup>4</sup>

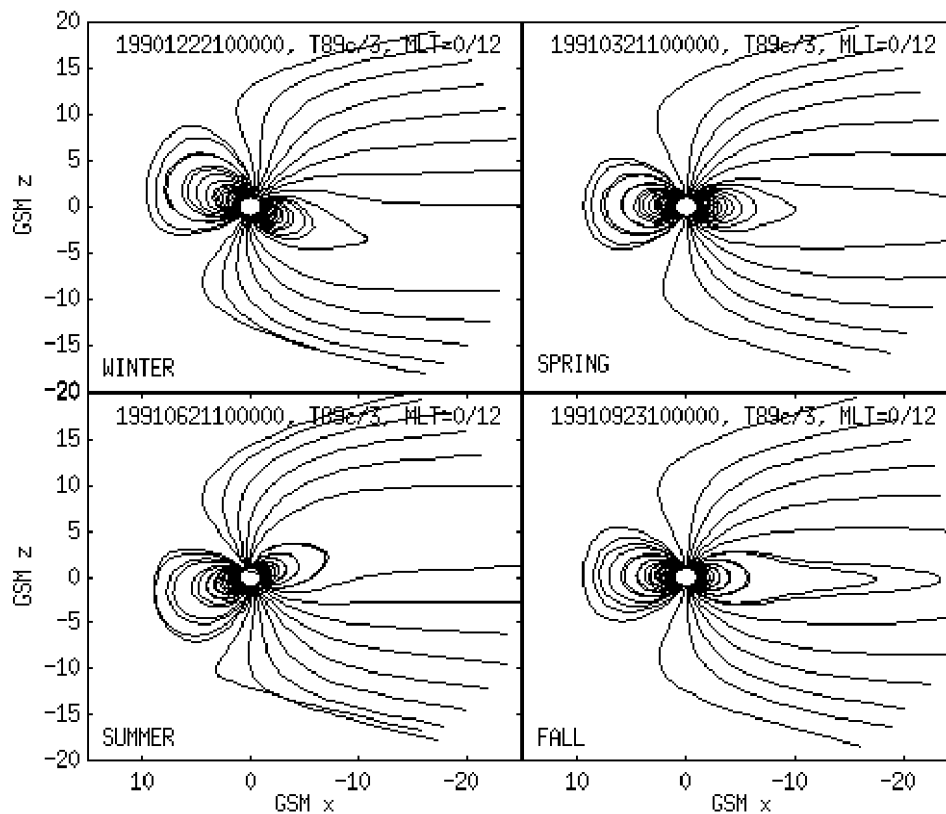
## Geomagnetické pole

Geomagnetické pole je označení pro magnetické pole Země. Toto pole může být buzeno uvnitř Země a v menší míře i v atmosféře. Vnitřní pole má původ v rotaci vnějšího tekutého jádra Země kolem vnitřního tuhého jádra a u povrchu má charakter dipólu se sklonem  $11^\circ$  k zemské

---

<sup>4</sup> Převzato z [5]

ose. Feromagnetické horniny v zemské kůře potom způsobují regionální a lokální odchylky. Ani toto pole ale není homogenní, v čase mění svůj směr i velikost a v dlouhodobém horizontu dochází dokonce k jeho přepólování. Vnější magnetické pole je tvořeno proudícími systémy v ionosféře a magnetosféře. Velikost magnetického pole na zemském povrchu je asi 25 až 65  $\mu\text{T}$ , to je 0,25 až 0,65 Gs. Existence tohoto pole je pro život na Zemi velice důležitá, protože ji chrání před slunečním větrem. Existence tohoto pole je však důležitá i pro družice, neboť jej mohou využívat ke své stabilizaci a orientaci. [5]



Obrázek 5: Magnetické pole Země v různých ročních obdobích<sup>5</sup>

## Elektromagnetické záření

Elektromagnetické záření, nebo také elektromagnetické vlnění, je kombinací elektrického pole a magnetického vlnění. Družice na oběžné dráze je vystavena elektromagnetickému záření ze tří hlavních zdrojů. Tím největším je přímé sluneční záření, které dopadá na její povrch. Sluneční záření je charakterizováno sluneční konstantou, která udává množství záření, které za

<sup>5</sup> Převzato z [5]

jednotku času dopadá na jednotku plochy ve střední vzdálenosti Země od Slunce. Její hodnota je  $1,4 \text{ Wm}^{-2}$ . Další dva zdroje elektromagnetického záření jsou tvořeny odraženým slunečním zářením od Země a infračerveným zářením samotné Země. [5]

### **Ionosféra a plazma**

Ionosféra je ionizovaná část atmosféry, která se nachází ve výškách od 60 do 2 000 km. Ionosféru lze rozdělit do několika výškových vrstev, D, E, F1 a F2. Vrstva F2 se nachází nejvýše a jako jediná v noci nevymizí. Ionosféra ovlivňuje šíření elektromagnetických signálů, které se od ní mohou odrážet. Horní část ionosféry potom přechází pozvolna do plazmaféry. Plazma je čtvrté skupenství hmoty a tvoří ji ionizovaný plyn, ten dokáže reagovat s povrchem kosmických lodí a shromažďovat na něm záporný náboj. [5] [7]

### **Teplota a teplotní cyklování**

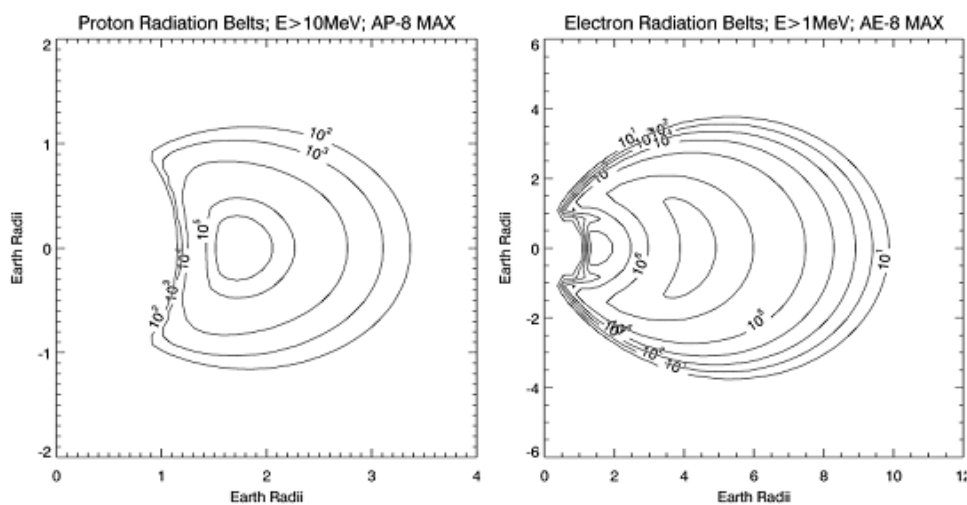
Družice na oběžné dráze Země čelí extrémním změnám teplot, ty jsou způsobeny pohybem mezi zemským stínem a přímým slunečním světlem. Teplota na oběžné dráze se může pohybovat asi od  $-120 \text{ }^{\circ}\text{C}$  až do  $120 \text{ }^{\circ}\text{C}$  v závislosti na tom, kde se družice nachází. To samozřejmě klade obrovské nároky na materiál, který tyto neustálé změny teplot musí vydržet. [7]

### **Energetické částice a záření**

Mezi energetické částice patří elektrony, protony, těžké ionty a neutrony. Tyto částice mohou mít různý původ, mohou pocházet z Van Allenových radiačních pásů, slunečního záření, galaktického záření, sekundárního záření nebo z palubních přístrojů. Van Allenovy radiační pásy jsou tvořeny elektrony a protony uvězněnými v magnetickém poli Země. Tyto radiační pásy můžeme rozdělit na vnitřní a vnější pás, vnitřní začíná ve výšce 100 km a vnější končí ve výšce asi 65 000 km. Energie protonů může být od 0,01 až do 400 MeV a energie elektronů od 0,4 do 4,5 MeV. Sluneční energetické částice se skládají z protonů, elektronů a těžkých iontů s energiemi od několika desítek keV až po GeV. Galaktické kosmické záření tvoří nabitě částice, které vstupují do sluneční soustavy z vnějšího prostředí. Velice nebezpečným zářením je takzvané sekundární záření, které vzniká interakcí výše uvedených složek záření s materiály kosmické lodi. Toto záření může být dokonce ještě nebezpečnější než záření, které jej vyvolalo.



Energetické částice mají vliv zejména na elektroniku kosmických lodí, v případě pilotovaných misí ohrožují i samotné astronauty. Mezi vlivy energetických částic patří přímá ionizace (Single Event Effect, SEE), celková dávka záření (Total Ionizing Dose, TDI), poškození krystalické mřížky, zvýšené pozadí senzorů nebo nabíjení družic. Přímá ionizace je způsobená ionizační stopou vzniklou dopady iontů s vysokými energiemi na elektrické komponenty družic. Výsledkem může být poškození dat. Celková dávka záření je označení pro kumulativní účinky kosmického záření, to způsobuje tvorbu páru elektron-díra v dielektriku a hromadění náboje v izolantech. Výsledkem může být degradace funkčních vlastností nebo úplné selhání. [5] [6] [9]



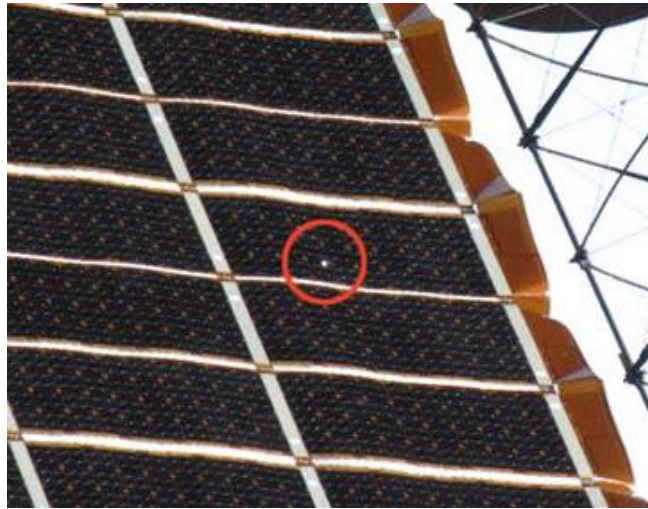
Obrázek 6: Rozložení protonů (vlevo) a elektronů (vpravo) v radiačních pásech Země<sup>6</sup>

## Kosmické smetí a meteoroidy

Hmota nacházející se v okolí Země může mít dva zdroje. Může se jednat o kosmické smetí vzniklé lidskou činností nebo o meteoroidy, komety a další tělesa sluneční soustavy. Tato tělesa mohou dosahovat rychlostí v desítkách kilometrů za sekundu a způsobit tak značné škody.

---

<sup>6</sup> Převzato z [5]



Obrázek 7: Díra od mikrometeoroidu v solárním panelu Mezinárodní kosmické stanice<sup>7</sup>

## 1.3. Nebeská mechanika

Nebeská mechanika se zabývá studiem pohybu těles na jejich dráze, může se jednat o oběžnou dráhu jednoho tělesa kolem druhého tělesa nebo dráhu přeletovou.

### Keplerovy zákony

Johannes Kepler, německý matematik a astronom, zkoumal pohyb planet v naší sluneční soustavě. Využil při tom astronomická měření dalšího slavného astronoma, Tychona Brahe, kterému Kepler dříve dělal asistenta. Keplerovy se nakonec podařilo přijít se třemi zákony, které popisují pohyb planet kolem Slunce. První dva zákony vydal v díle *Astronomia nova* (1609), poslední v díle *Harmonices mundi* (1618).

1. Keplerův zákon: „*Planety obíhají kolem Slunce po eliptických drahách, v jejichž jednom společném ohnisku je Slunce.*“

2. Keplerův zákon: „*Obsahy ploch opsaných průvodičem planety za stejný čas jsou stejně velké.*“ Průvodičem planety je myšlena spojnice mezi planetou a Sluncem a jeho délka se tak při pohybu planety kolem Slunce mění. Vzhledem k tomu, že za stejnou dobu opíše průvodič

---

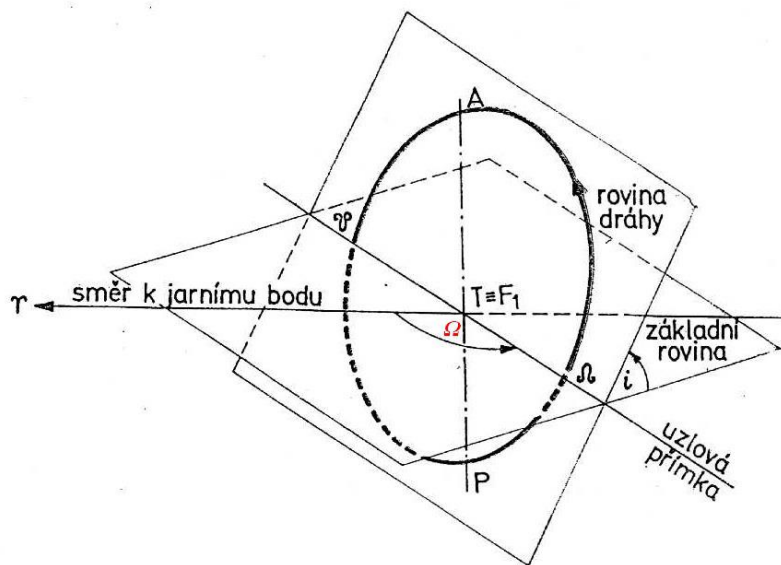
<sup>7</sup> Převzato z [34]

vždy stejnou plochu, musí mít planeta v bodě nejbližším ke Slunci nejvyšší rychlost a v bodě nejvzdálenějším od Slunce naopak nejnižší rychlost.

3. Keplerův zákon: „Poměr druhých mocnin oběžných dob dvou planet je stejný jako poměr třetích mocnin jejich hlavních poloos.“ To znamená, že oběžná doba planet blíže ke Slunci je kratší než oběžná doba planet dále od Slunce.

### Popis pohybu po elipse a elementy dráhy

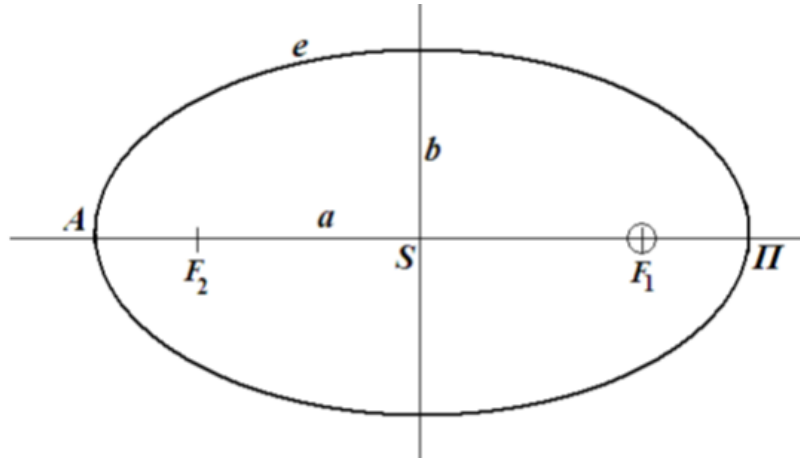
Keplerovy zákony lze však stejně dobře využít i k popisu pohybu družic kolem Země nebo sond kolem Marsu. Stačí v nich slovo Slunce nahradit slovem Země a slovo planeta nahradit slovem družice. Pro popis pohybu družic v trojrozměrném prostoru je potřeba znát celkem šest parametrů:  $a$  je velká poloosa udávající velikost dráhy,  $e$  je číselná výstřednost udávající tvar dráhy,  $i$  je sklon dráhy k základní rovině udávající ekliptiku nebo rovník,  $\Omega$  je délka výstupného uzlu,  $\omega$  je argument pericentra a  $M_0$  je střední anomálie. První dva parametry popisují tvar oběžné dráhy, další tři polohu oné oběžné dráhy v prostoru a poslední parametr pozici družice na oběžné dráze.



Obrázek 8: Elementy dráhy<sup>8</sup>

<sup>8</sup> Převzato z [37]

Dále je důležité si vysvětlit, jak je popsán tvar eliptické dráhy:  $F_1$  a  $F_2$  jsou ohniska,  $a$  je hlavní poloosa,  $b$  je vedlejší poloosa,  $A$  je apocentrum,  $\Pi$  je pericentrum,  $a$  je přímka apsid a  $e$  je výstřednost nebo excentricita.



Obrázek 9: Popis pohybu po elipse<sup>9</sup>

## Oběžné dráhy

Družice obíhají Zemi po oběžné dráze, ty můžeme rozdělit podle několika hledisek.

Podle výšky dělíme oběžné dráhy na:

- Nízká oběžná dráha (Low Earth Orbit, LEO) s výškou do 2 000 km
- Střední oběžná dráha (Medium Earth Orbit, MEO) s výškou od 2 000 do 35 786 km
- Geosynchronní dráha (Geosynchronous Orbit, GSO) s poloosou 42 164 km a periodou 1 hvězdný den
  - Specifickým příkladem je geostacionární dráha (Geostationary Earth Orbit, GEO) s výškou 35 786 km
- Vysoká oběžná dráha (High Earth Orbit, HEO) s výškou nad 35 786 km

Podle sklonu se může jednat o dráhy:

- Dráha s velkým sklonem
  - Polární oběžná dráha se sklonem blízkým  $90^\circ$
- Rovníková dráha se sklonem blízkým  $0^\circ$

---

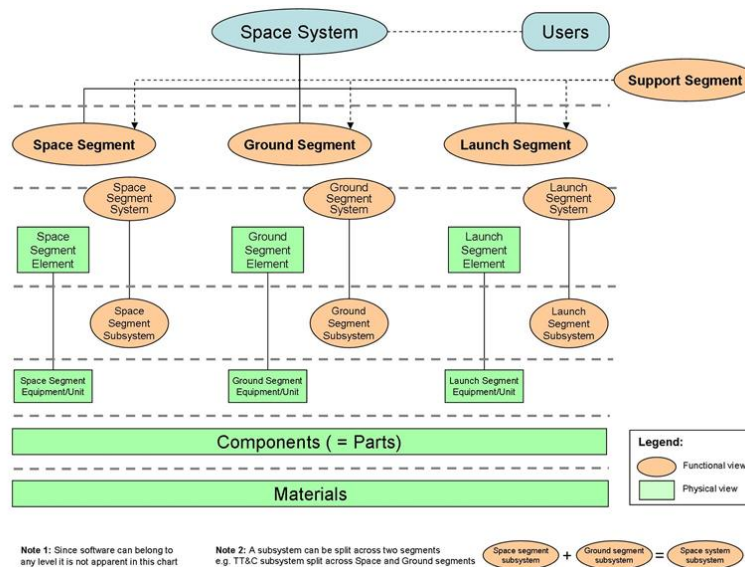
<sup>9</sup> Převzato z [37]

Podle excentricity rozdělujeme dráhy na:

- Kruhová dráha s excentricitou  $e=0$
- Eliptická dráha s excentricitou  $e>0$  a  $e<1$
- Parabolická dráha s excentricitou  $e=1$
- Hyperbolická dráha s excentricitou  $e>1$

## 2. CubeSat

Kosmický systém je možné podle ECSS (European Cooperation for Space Standardization) standardů rozdělit na kosmický segment, vypouštěcí segment a pozemní segment. Kosmický segment se dále dělí na družicovou platformu a přístrojové vybavení. Vypouštěcí segment obsahuje nosnou raketu a kosmodrom. A do pozemního segmentu se řadí řídicí středisko, komunikační síť, pozemní stanice, správa dat a podpůrné pozemní vybavení. Jednotlivé segmenty lze dále dělit na elementy, subsystemy, zařízení, komponenty až po konečný materiál. [10] Tato diplomová práce je zaměřena na družici, další text proto bude zaměřen již pouze na kosmický segment. Ten, jak již bylo uvedeno, se skládá z družicové platformy a přístrojového, nebo také užitečného, vybavení. Platforma obsahuje konstrukci a všechny subsystemy nezbytné pro fungování družice na oběžné dráze. Užitečné vybavení jsou potom vědecké či jiné přístroje.



Obrázek 10: Rozdělení kosmického systému<sup>10</sup>

<sup>10</sup> Převzato z [10]

Podle hmotnosti je možné družice rozdělit na několik druhů, CubeSat je potom svou hmotností na pomezí pikodružic a nanodružic: [9]

*Tabulka 1: Rozdělení družic podle hmotnosti*

Velké družice	více než 1 000 kg
Střední družice	500 - 1 000 kg
Minidružice	100 - 500 kg
Mikrodružice	10 - 100 kg
Nanodružice	1 - 10 kg
Pikodružice	0,1 - 1 kg
Femtodružice	méně než 0,1 kg

## 2.1. Historie

Družice typu cubesat se zrodily v roce 1999 na amerických vysokých školách. Na počátku stál profesor Jorgi Puig-Suari z California Polytechnic State University a profesor Bob Twiggs ze Space Systems Development Laboratory na Stanford University, kteří pracovali na projektu, který si kladel za cíl poskytnout standard pro pikodružice, které by umožnily snížit náklady a čas potřebné na jejich vývoj a zároveň usnadnit jejich vypuštění. Jejich cílem totiž bylo umožnit studentům zapojit se do reálných kosmických projektů. Stavba klasické družice trvá velice dlouhou dobu, je technologicky velice náročná a její cena je také vysoká. Z tohoto důvodu studenti neměli příležitost se do jejich vývoje zapojit. Z jejich projektu se nakonec zrodil koncept družic typu CubeSat. Tyto družice byly s ohledem na jejich tvar pojmenovány CubeSat (jde o složeninu dvou anglických slov, cube znamená krychle a satellite znamená družice). Dnes se vývojem těchto družic zabývá již více než 100 středních a vysokých škol, výzkumných ústavů a soukromých společností po celém světě. [11] Vývoj CubeSatů je v dnešní době dokonce tak moc dostupný, že do vesmíru vyslala svou družici i jedna americká základní škola. [12]

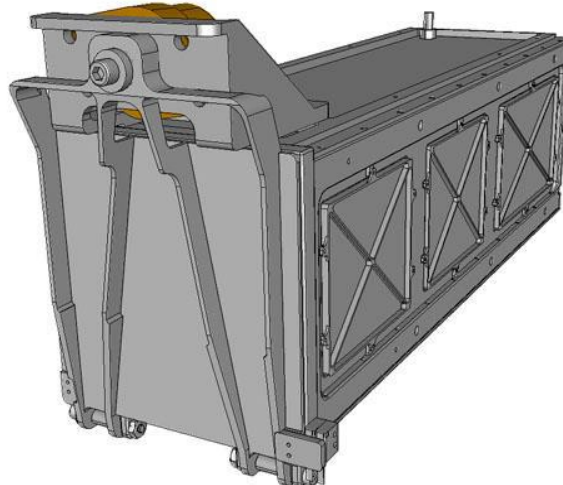
## 2.2. Standardizace

Ze začátku nebylo cílem vytvářet standardy, avšak díky své jednoduchosti se tento typ družic brzy stal velice oblíbeným a využívaným standardem. CubeSaty mají rozměry 10x10x10 cm a

hmotnost do 1,33 kg, původní koncept dokonce uváděl hmotnost jen 1,00 kg. Takovéto družice bývají označovány jako 1U (U je zkratka pro unit, jednotku). Tento koncept je ale velice flexibilní a umožňuje k sobě přidávat více takovýchto jednotek. Nejčastěji se jedná o družice 2U a 3U, 2U označuje CubeSat o rozměrech 20x10x10 cm a hmotnosti 2,66 kg, 3U CubeSat o rozměrech 30x10x10 cm a hmotnosti 4,00 kg. Je ale také možné se setkat s CubeSaty s označením 0,5U, 1,5U, 6U či dokonce 12U. Na druhou stranu se objevuje i snaha o ještě větší miniaturizaci. Koncept takzvané PocketQube počítá s družicí tvaru krychle o rozměrech 5x5x5 cm a hmotnosti 150 g, její objem je tak 8x menší než v případě 1U CubeSatu. [13]

U CubeSatů však není standardizovaná jen jejich velikost, ale i další parametry. Standardy se dělí do několika částí, na obecné požadavky, mechanické požadavky, elektrické požadavky nebo provozní požadavky. Tyto standardy uvádějí, že CubeSaty nesmí přispívat k tvorbě kosmického smetí, všechny jejich části proto musí být pevně připevněné a neoddělitelné. Není také dovoleno používat pyrotechnické systémy nebo silné magnetické pole. Standardizovány jsou ale i materiály, struktura může být jen z určitých hliníkových slitin a další materiály musí být odolné proti odplyňování. Z pohledu elektroniky je tím nejdůležitějším požadavkem to, že celý napájecí systém musí být od předání družice k vypuštění až po její uvolnění na oběžnou dráhu vypnutý. CubeSat je potom na oběžné dráze aktivován mechanicky po jeho uvolnění z vypouštěcího kontejneru. [11]

Většina nosných raket má vyšší nosnost než jejich aktuální užitečné zatížení, z tohoto důvodu bývá volná kapacita využívána k vypuštění sekundárního nákladu. V případě CubeSatů se často vypouští více družic najednou. Díky tomu, že mají CubeSaty stejnou plochu, tedy 10x10 cm, je možné využívat i standardizované kontejnery pro jejich vypuštění. Tím nejrozšířenějším je P-POD (Poly-PicoSatellite Orbital Deployer). Do P-POD se umístí až tři družice 1U. Díky standardizaci je však také možné do něj umístit i jednu družici 3U, jednu družici 1U spolu s jednou družicí 2U nebo dvě družice 1,5 U. Toto standardizované vypouštěcí zařízení je výhodné pro vývojáře CubeSatů i pro poskytovatele vypouštěcích služeb. Vývojáři si díky tomu mohou vybrat ze širokého spektra nosných raket a poskytovatelé naopak mohou dodávat své služby týmům z celého světa. P-POD je připevněn k hornímu stupni nosné rakety, na oběžné dráze dojde díky elektrickému signálu k otevření dvířek a pomocí jednoduchého pružinového mechanismu k vypuštění uložených družic. [11]



Obrázek 11: Univerzální vypouštěcí kontejner P-POD<sup>11</sup>

Díky standardizaci CubeSatů došlo k zásadnímu urychlení a zlevnění celého vývoje. Svou vlastní družici tak mohou vyvinout a vypustit vysokoškolská studenta i týmy z rozvojových zemí po celém světě. Mnoho států díky tomu vyvinulo a vypustilo svou první družici. Dalším rozdílem od klasických družic je odlišný přístup k riziku. U CubeSatů nejsou zpravidla využívány drahé certifikované komponenty, místo toho si týmy vyvíjejí své vlastní komponenty nebo pořizují ty běžné komerčně dostupné, takzvané COST (Commercial off-the-shelf) komponenty. To celý vývoj dále zlevňuje.

## 2.3. Dosavadní a budoucí vývoj

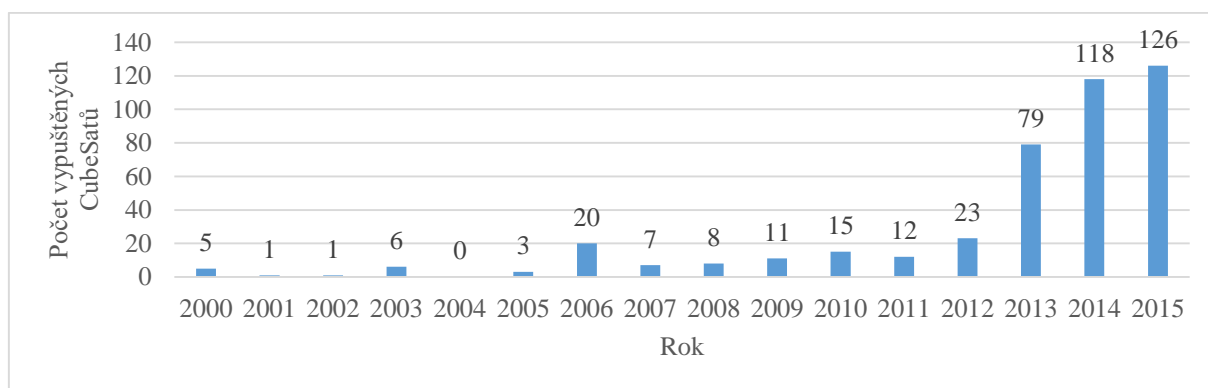
Do konce roku 2015 bylo vypuštěno celkem 435<sup>12</sup> CubeSatů. První CubeSaty, které však ještě nesplňovaly dnešní standardy, byly vypuštěny již v roce 2000. Počet CubeSatů se začal zásadně navyšovat až v roce 2013, kdy jich bylo vypuštěno 79. V roce 2014 to bylo už 118 a v roce 2015 dokonce 126. [14] Předpokládá se, že v dalších letech se tato čísla budou ještě dále zvyšovat.

---

<sup>11</sup> Převzato z [11]

<sup>12</sup> Jsou počítány i CubeSaty, které byly zničeny při startu a na oběžnou dráhu se tak nedostaly.



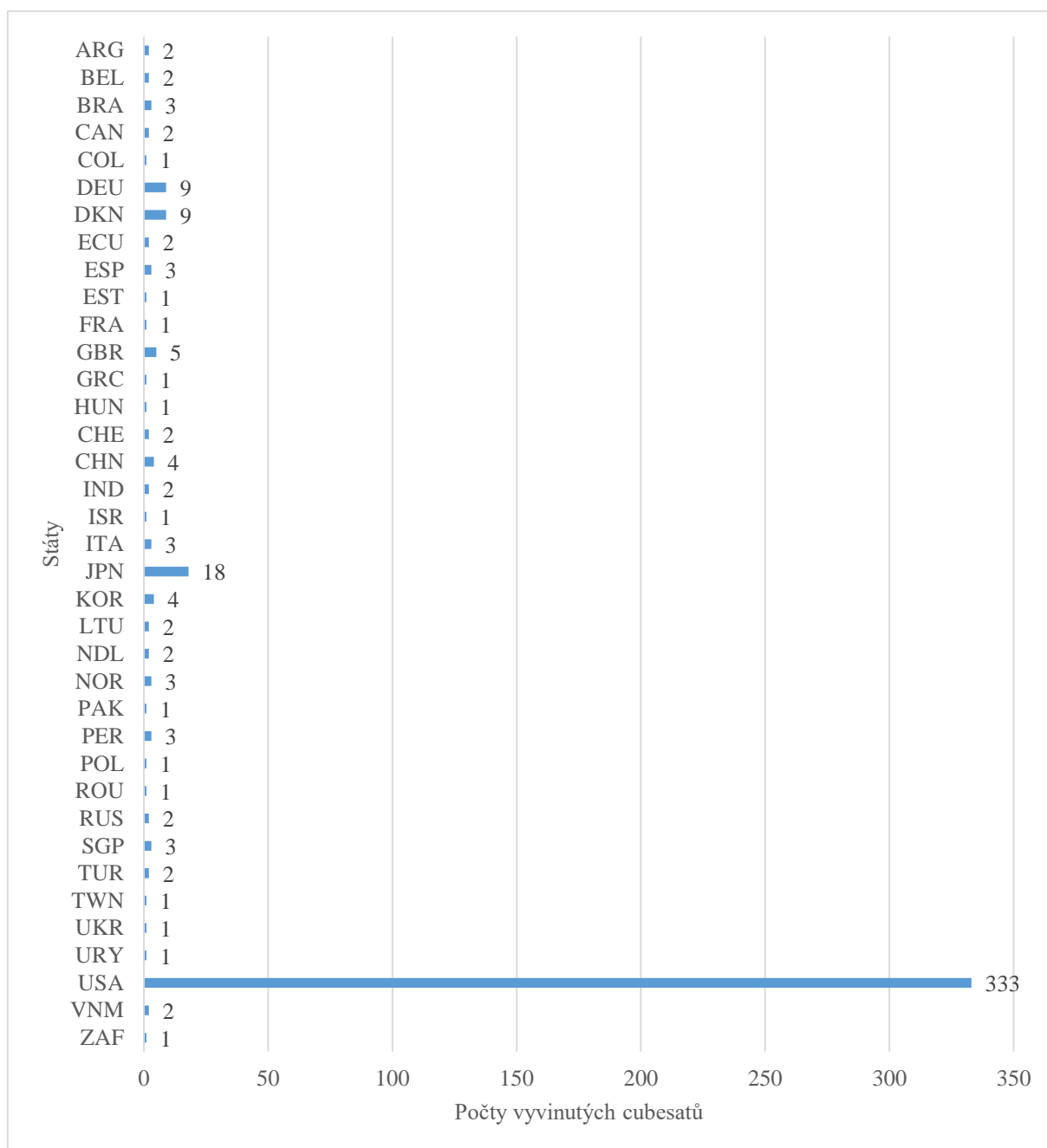


Obrázek 12: Počet vypuštěných CubeSatů mezi roky 2000 a 2015<sup>13</sup>

Vývoj CubeSatů probíhá po celém světě a na oběžnou dráhu se dostaly CubeSaty vyvinuté ve 37 zemích. Vedle klasických a vyspělých států, jako je USA, Japonsko nebo země západní Evropy, má ve vesmíru svůj CubeSat také Ekvádor, Estonsko, Kolumbie, Litva, Maďarsko, Pákistán, Peru, Polsko, Rumunsko, Uruguay nebo Vietnam. Více než tři čtvrtiny CubeSatů bylo ale vyvinuto ve Spojených státech amerických. [14] To je dáno úrovní tamních vysokých škol, ale také zapojování soukromých společností. Slovensko a Česká republika by mezi tyto státy měly přibýt v roce 2016. Mezi státy, které jsou schopné naopak CubeSat vypustit, patří USA, Rusko, Evropská kosmická agentura, Japonsko, Čína a Indie.

---

<sup>13</sup> Zdroj dat [14]



Obrázek 13: Rozdělení vypuštěných CubeSatů podle států, ve kterých byly vyvinuty<sup>14</sup>

V posledních letech došlo k výrazné změně ve vývoji CubeSatů. Dříve byly vnímány jako levná alternativa klasických družic pro vysoké školy a rozvojové země. Čím dál častěji se ale do jejich vývoje začínají zapojovat i kosmické agentury, špičkové vědecké ústavy a velké společnosti poskytující služby související s družicovými aplikacemi. Dříve byla většina vypuštěných CubeSatů velikosti 1U, dnes je to však již 3U a do budoucna se počítá více i s CubeSaty 6U

<sup>14</sup> Zdroj dat [14]

nebo dokonce 12U. Tento trend je výsledkem toho, že výše zmíněné organizace rozpoznaly v CubeSatech příležitost. S mnohem nižšími náklady totiž mohou nahradit část aktivit, které v současné době obstarávají klasické družice. S tím souvisí i další změna. Dříve byla drtivá většina CubeSatů univerzitních. Dnes už se ale staví mnohem více CubeSatů komerčních a postupně se zvyšují i počty civilních a armádních. Stejnou informaci lze získat i při pohledu na účel vypuštěných CubeSatů. Dříve to byly hlavně vzdělávací CubeSaty. Dnes se však vypouští mnohem více snímkovacích a technologických CubeSatů. Je však nutné poznamenat, že tyto výsledky ovlivňuje hlavně americká společnost Planet Labs, která vypustila již 60 CubeSatů o velikosti 3U určených na snímkování Země. Avšak i bez těchto CubeSatů je trend více než zřetelný. [14]

Všechny dosud vypuštěné CubeSaty směřovaly na nízkou oběžnou dráhu Země, čím dál častěji se však počítá i s CubeSaty, které zamíří dál. Dvojice 12U CubeSatů nazvaných Mars Cube One (lze je najít i pod označením MarCO) jsou plánovány jako součást americké mise k Marsu InSight. V průběhu přistávacího manévru by měly zajišťovat v reálném čase přenos dat mezi landerem a Zemí. [15] Dalším zajímavým projektem je evropský AIM (Asteroid Impact Mission), jehož cílem by měla být binární planetka 65803 Didymos. Součástí této mise budou i dva 3U CubeSaty, které budou tuto planetku zkoumat. [16] Do budoucna je však pro podobné mise nutné vyřešit celou řadu problémů. Ty nejaktuálnější se týkají energetického subsystému s větší výdrží akumulátorů a efektivnější výrobou energie dál od Slunce, pohonného systému pro změny trajektorií a oběžných drah, telemetrického systému pro komunikaci na větší vzdálenosti a zvýšení odolnosti proti kosmickému záření. Vědci také budou muset přijít s nápady na zajímavé a vědecky hodnotné experimenty a vyvinout potřebné užitečné vybavení. [17] Jiným, avšak neméně zajímavým 3U CubeSatem, je projekt QARMAN (QubeSat for Aerothermodynamic Research and Measurements on AblationN), který by měl být vypuštěn v rámci mise QB50. Cílem tohoto projektu je demonstrovat možnost setkávání na oběžné dráze bez pomoci pohonu, použití pasivního zařízení pro vstup do atmosféry, sbírání vědeckých dat během průchodu atmosférou a návrat zpět na Zemi. [18]

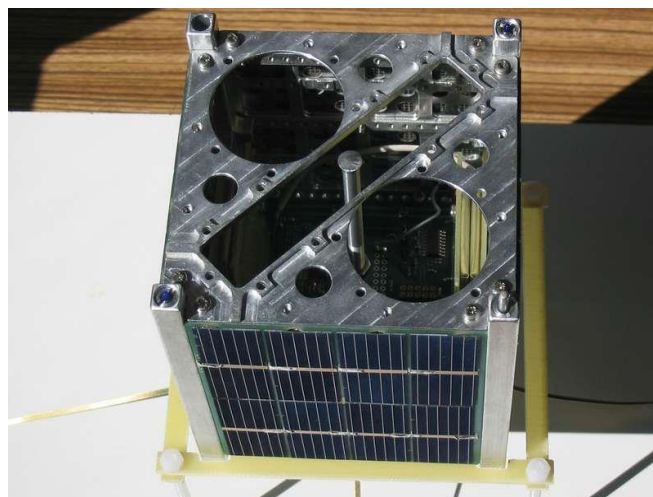
## 2.4. CubeSaty v České

Vývoj CubeSatů se naštěstí nevyhnul ani České republice. V dalším textu budou představeny všechny snahy o jejich stavbu.

## czCube

Prvním projektem zaměřeným na vývoj CubeSatu v České republice byl projekt czCube, které vedlo občanské sdružení czCube o.s. Tento projekt byl zahájen v roce 2004 v návaznosti na diskuzi na serveru [www.kosmo.cz](http://www.kosmo.cz). Během následujících 10 let však nebylo dosaženo stanovených cílů a projekt byl proto v roce 2014 oficiálně ukončen. Cílem, kterého se nepodařilo dosáhnout, bylo vyvinout a postavit malou amatérskou družici typu CubeSat. Motivací bylo ověření reálnosti stavby malých družic v českých podmínkách a získání zkušeností, které by mohly být využity v dalších projektech. Tým na vývoji pracoval bez jakékoliv externí finanční dotace a nebyl proto schopný dát dohromady dostatek zdrojů pro dokončení družice a její vypuštění. Dalším problémem byly chybějící zkušenosti a časové vytížení členů.

Konstrukce této družice měla být dostatečně robustní, aby přečkala vibrace během startu, družice měla být vybavena napájecím zdrojem s fotovoltaickými články, radiovou komunikací pro obousměrný přenos dat, digitální kamerou pro pořizování snímků, systémem orientace a aktivní stabilizace ve všech třech osách a také experimentálním pohonem, který by bylo možné využít pro výraznější změny dráhy a manévrování. V návrzích se hovořilo o solární plachtě či elektrodynamickém tetheru. Jediné, co se podařilo dokončit a stále zůstává v provozu, je pozemní stanice. [19]



Obrázek 14: První funkční prototyp družice czCube<sup>15</sup>

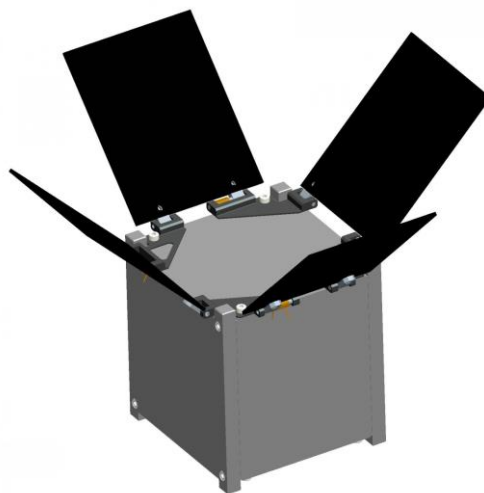
---

<sup>15</sup> Převzato z [19]

## PilsenCUBE

Projekt PilsenCUBE částečně navazuje na czCube. Dva pracovníci Fakulty elektrotechnické na Západočeské univerzitě v Plzni, kteří byli dříve zapojeni do vývoje czCube, přišli s nápadem na vývoj vlastní družice. V roce 2008 byl proto podán projektový návrh s názvem “Energeticky úsporná platforma pro experimentální výzkum na bázi pikosatelitů” a od roku 2009 do roku 2011 byl tento projekt s podporou Grantové agentury České republiky řešen. Celková dotace dosahovala 3 889 000 Kč. Avšak ani tuto družici se nepodařilo dokončit a vypustit. Problémem byly opět finance.

Cílem tohoto projektu bylo identifikovat hlavní nedostatky družic typu CubeSat a navrhnout lepší řešení. Tým se zaměřil hlavně na zajištění dostatku elektrické energie pro napájení družice, zabezpečení spolehlivosti elektronických systémů proti radiačnímu záření a zajištění dostatečně rychlé komunikace a přenosu dat pomocí palubní radiostanice. Bylo rozpracováno několik zajímavých technických řešení jako vyklápěcí stěny s vysokým stupněm paralelizace malých řezů fotovoltaických článků nebo využití superkapacitorů s uhlíkovými nanočásticemi jako doplňku rychle stárnoucích klasických akumulátorů. I přes to, že nebyl vývoj CubeSatu dokončen, se podařilo získat důležité znalosti a dovednosti. Tým se díky tomu mohl zapojit do vývoje CubeSatu VZLUSAT-1, pro který dodává experimentální systém autonomního určení prostorové orientace a vybudovanou pozemní komunikační stanici. [20]



*Obrázek 15: Mechanické řešení těla družice PilsenCUBE s výklapnými stěnami<sup>16</sup>*

---

<sup>16</sup> Převezato z [20]

## CzechTechSat

CzechTechSat je projekt CubeSatu řešeného na Fakultě elektrotechnické na Českém vysokém učení technickém v Praze. Jeden z doktorandů na této fakultě přišel na přelomu let 2010 a 2011 s nápadem na vývoj vlastní malé družice. První koncept počítal s CubeSatem o velikosti 2U, který by byl součástí projektu QB50. Nakonec však došlo k rozhodnutí vystoupit z projektu QB50 a zaměřit se na CubeSat 1U. Projekt vývoje byl financován pomocí Studentské grantové soutěže. Mezi léty 2012 a 2015 bylo tímto způsobem na vývoj získáno 887 000 Kč v rámci projektů “CzechTechSat - Platforma experimentálního studijního pikosatelitu” a “CzechTechSat - Implementační fáze univerzitního pikosatelitu”. Tyto finance však nestačily na dokončení vývoje a vypuštění a vývoj byl proto ukončen.

Na palubě družice se nachází integrovaný zálohovaný palubní počítač s barevnou kamerou, deska aktivní stabilizace a navigace a speciální napájecí zdroj založený na nejmodernějších komponentech a dobíjený pomocí fotovoltaických článků. Tým se při vývoji zaměřil zejména na ochranu elektronických komponent proti kosmickému záření. CzechTechSat má za sebou i dva testovací lety na stratosférickém balónu. První z nich se uskutečnil v roce 2014 a sloužil k testování komunikačního zařízení, při tom se podařilo dosáhnout výšky 33 km. [21]



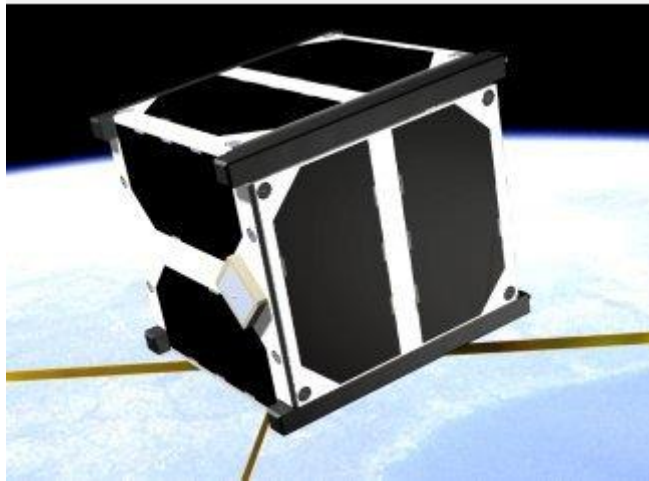
Obrázek 16: Prototyp družice CzechTechSat<sup>17</sup>

## Lucky-7

---

<sup>17</sup> Převezato z [21]

Projekt vývoje CubeSatu Lucky-7 navazuje na vývoj CubeSatu CzechTechSat. Vzhledem k tomu, že tým nebyl schopný shromáždit dostatek financí na jeho dokončení a také vypuštění, rozhodl se zanechat tohoto projektu a komerční cestou se pokusit o projekt nový. Lucky-7 je vyvíjen soukromou společností SkyFox Labs, kterou tvoří bývalí členové týmu vyvíjející CzechTechSat. Ti se snaží získat finance na jeho dokončení a vypuštění pomocí komercializace již vyvinutých komponent. [22]



Obrázek 17: CubeSat Lucky-7<sup>18</sup>

## VZLUSAT-1

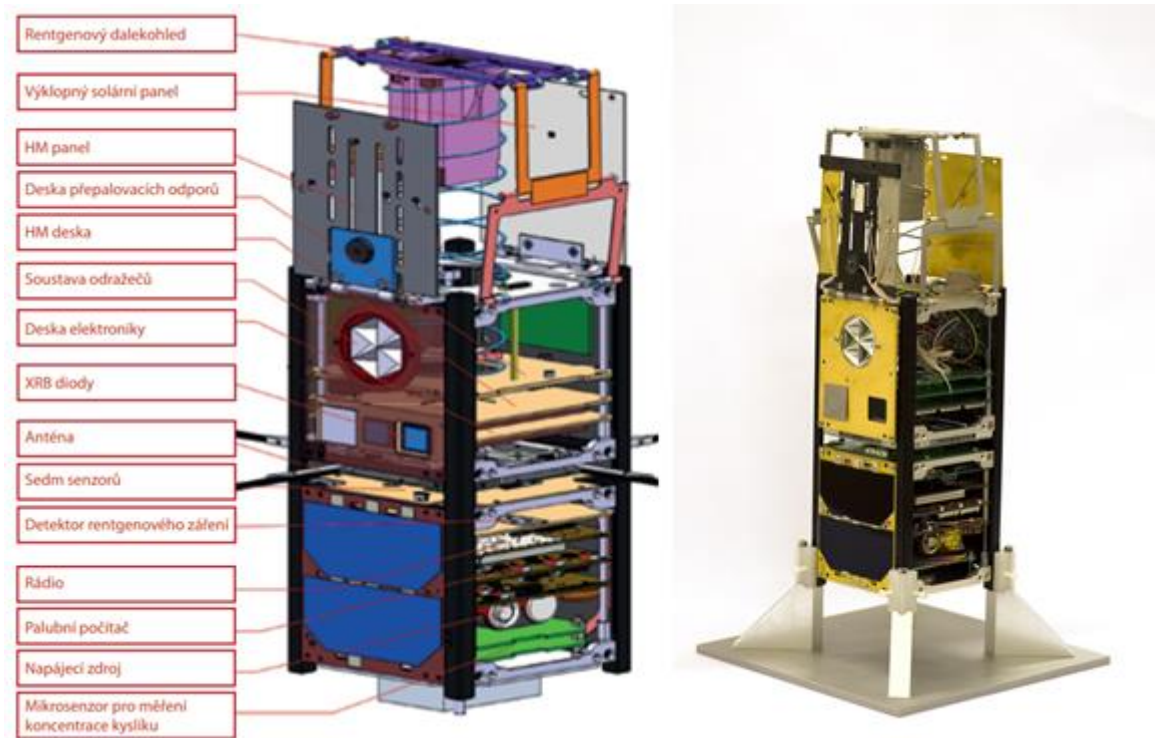
Posledním českým CubeSatem je VZLUSAT-1. Tento projekt je zaměřen na vývoj, výrobu, kvalifikaci a experimentální ověření technologií na oběžné dráze. Vedoucím konsorcia je Výzkumný a zkušební letecký ústav (VZLÚ). Dále je zapojeno České vysoké učení technické, Západočeská univerzita, společnosti Rigaku Innovative Technologies Europe, 5M, Innovative Sensor Technology a TTS. Myšlenka na vlastní družici se zrodila ve VZLÚ v roce 2011. Vývoj byl podpořen dvěma získanými projekty. Projekt “Experimentální ověření kosmických výrobků a technologií na nanosatelitu VZLUSAT-1” běží od roku 2013 do roku 2016 a byl podpořen 6 402 000 Kč ze státního rozpočtu, celkové uznané náklady jsou však 9 850 000 Kč. Projekt “Širokoúhlý systém pro rentgenové zobrazování s detektorem Timepix” běží od roku 2014 do roku 2017 a byl podpořen celkem 8 890 000 Kč ze státního rozpočtu, celkové uznané náklady jsou však 13 800 000 Kč. Oba dva projekty jsou řešeny v rámci programu ALFA Technologické agentury České republiky. VZLUSAT-1 by měl být v rámci projektu QB50 vypuštěn v roce

---

<sup>18</sup> Převzato z [36]

2016 na nízkou oběžnou dráhu s výškou 400 km. Díky zapojení do projektu QB50 má vypuštění zajištěné zdarma.

Cílem družice je otestovat radiačně odolný kompozitový housing elektroniky se zvýšenou tepelnou vodivostí, solární panel na kompozitovém podkladu, pole dutých koutových odražečů na kompozitové bázi, senzory vnějšího prostředí, mechanismus výklopných panelů, měřící elektroniku a také širokouhlý systém pro rentgenové zobrazení typu “račí oko”. Jedná se o 2U CubeSat, avšak jedna z krychlí nese speciální mechanismus, který na oběžné dráze vysune obsah z nitra krychle do volného prostoru a vytvoří tak družici 3U. Pro urychlení vývoje nejsou všechny komponenty vyvíjeny od začátku, některé jsou zakoupeny od firem ISIS a GomSpace. [23]



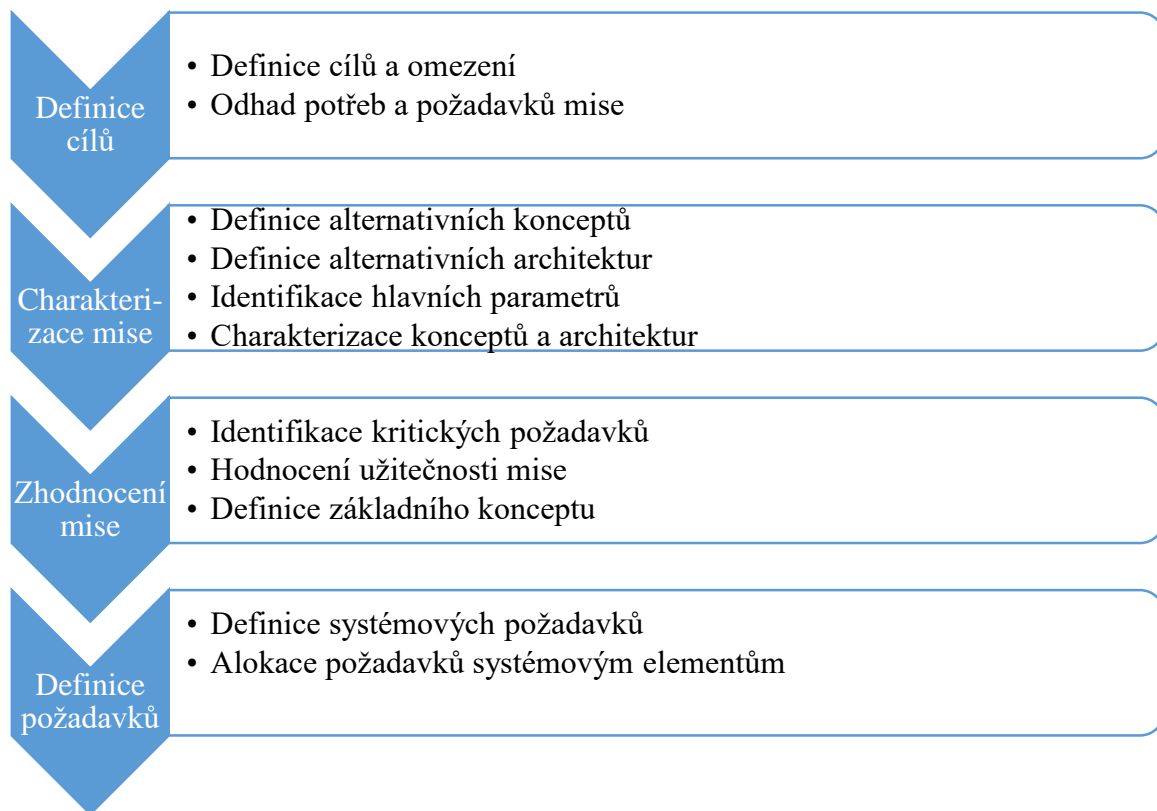
Obrázek 18: Subsystémy (vlevo) a prototyp (vpravo) družice VZLUSAT-1<sup>19</sup>

<sup>19</sup> Převzato z [23]



### 3. Návrh mise

Existuje několik přístupů k navrhování kosmických misí. Obecným prvkem všech těchto přístupů je to, že se začíná od definice cílů a postupuje se dále až k návrhu jednotlivých subsystému. Larson a Wertz [6] svůj přístup založili na 40 letech zkušeností s kosmickým výzkumem. Prvním krokem je definice cílů, následuje charakterizace mise, zhodnocení mise a posledním krokem je definice požadavků. Všechny tyto kroky se dají dále dělit, výsledkem je tak 11 různých aktivit. Tento přístup je však vhodný hlavně pro návrh složitějších misí a navíc misí, které jsou již v pokročilejším stádiu. Návrh kosmické mise CubeSat se tak tímto přístupem bude jen inspirovat a nebude jej přesně kopírovat.



Obrázek 19: Doporučený postup při návrhu kosmické mise<sup>20</sup>

<sup>20</sup> Přeloženo z [6]

## 3.1. Cíl mise

Prvním krokem při návrhu mise bude stanovení poslání, primárního cíle a dále cílů sekundárních.

*Tabulka 2: Definice poslání a cílů mise*

Poslání	Doplnit teoretické vzdělání na ČVUT o možnost praktického zapojení studentů do skutečné kosmické mise
Primární cíl	Vyvinout spolehlivou a flexibilní družicovou platformu se všemi důležitými subsystemy
Sekundární cíle	Zajistit spolehlivý energetický subsystem
	Zajistit spolehlivý komunikační subsystem
	Zajistit spolehlivý palubní počítač
	Navrhnout platformu co nejvíce flexibilní

### Poslání

Z rešerše je patrné, že Česká republika ve stavbě CubeSatů zaostává za vyspělými a dokonce i za některými rozvojovými státy. V těchto zemích je stavba CubeSatů běžnou součástí vysokoškolského studia. Studenti si díky tomu mohou prakticky vyzkoušet a osvojit, co obnáší návrh, vývoj, výroba a provoz skutečné družice.

V České republice byly dva pokusy o univerzitní CubeSat, PilsenCUBE a CzechTechSat, avšak žádný z nich se nepodařilo dovést do zdárného konce. Vývoj PilsenCUBE na Západočeské univerzitě byl ukončen a z celého projektu je nyní využívána pouze pozemní stanice. Projekt CzechTechSat byl v rámci Českého vysokého učení technického také ukončen a jeho nástupce, Lucky-7, je vyvíjen soukromou společností.

Na několika českých vysokých školách jsou vedeny bakalářské, diplomové nebo disertační práce zaměřené na návrh subsystemů pro CubeSaty, avšak jde pouze o samostatné projekty bez komplexnějšího plánu na vývoj celé družice. V České republice proto není v současné době vyvíjen žádný univerzitní CubeSat. Přitom vývoj CubeSatů a zapojení studentů do tohoto vývoje by bylo pro každou vysokou školu velice přínosné.

Posláním CubeSatu, uvažovaného v této práci, je proto rozšířit teoretické studium na ČVUT o příležitost pro praktické zapojení studentů do kosmické mise. Ti díky tomu získají

nenahraditelné zkušenosti a znalosti. Výhodné to ale bude i pro samotnou vysokou školu, vedle technických a vědeckých poznatků jí to přinese i prestiž.

### **Primární cíl**

Z analýzy 288 vypuštěných CubeSatů vyplývá, že 14,2% z nich se vinou selhání nosné rakety na svou oběžnou dráhu vůbec nedostalo, s 21,5% se nepodařilo na oběžné dráze navázat spojení, 10,4% přestalo fungovat brzy po svém uvolnění na oběžnou dráhu, 25,7% částečně splnilo své cíle a pouze 17,7% splnilo všechny své cíle. [24] To tedy znamená, že pouze necelá polovina z vypuštěných CubeSatů dosáhlo částečného nebo úplného splnění svých cílů. Toto číslo se ještě dále snižuje u týmů, které vypouštějí svůj první CubeSat.

Primárním cílem navrhovaného CubeSatu by proto mělo být především vyvinout a vyrobit spolehlivou a robustní platformu. Při tom by měl být kladen důraz zejména na ty nejdůležitější subsystemy, na energetický, na komunikační a na palubní počítač. Bez těchto subsystemů se družice neobejde a bude z ní jen nefunkční součást kosmického smetí. Další subsystemy jsou také důležité, avšak při jejich poruše je CubeSat většinou schopný alespoň částečně fungovat.

Zamýšlený CubeSat by proto měl být hlavně technologickým demonstrátorem samotné platformy. Pokud se podaří vyvinout skutečně spolehlivou platformu, bude ji možné využít i pro jiné CubeSaty. Tato platforma by proto měla být i flexibilní, aby umožňovala jen s drobnými úpravami umístění různých užitečných vybavení a plnění i dalších misí. K tomu je důležitá zejména aktivní stabilizace s přesnou orientací a robustní obousměrná komunikace.

### **Sekundární cíle**

Sekundárních cílů je hned několik a všechny navazují na primární cíl. Mezi sekundární cíle patří zajištění spolehlivého energetického subsystemu, zajištění spolehlivého komunikačního subsystemu, zajištění spolehlivého palubního počítače a návrh co nejvíce flexibilní platformy.

Jak již bylo uvedeno dříve, mezi nejdůležitější subsystemy CubeSatu patří energetický subsystem, komunikační subsystem a palubní počítač. Všechny tyto subsystemy musí na oběžné dráze fungovat. Bez energetického subsystemu nebude mít družice energii a nebude tedy schopna žádné aktivity, bez komunikačního subsystemu nebude schopna přijímat ani odesílat žádná data a stejně tak se neobejde ani bez palubního počítače. Všechny tyto

subsystémy by proto měly být co nejvíce spolehlivé. V kosmonautice se většinou spolehlivost řeší redundancí a i v tomto případě by redundance měla být využita.

Pro to, aby mohla být platforma využívána s malými změnami pro různá užitečná vybavení, by měla být co nejvíce flexibilní. Měla by disponovat aktivní stabilizací a přesnou orientací, to je důležité zejména pro kameru a další přístroje a senzory, pro které je nezbytné družici natočit určitým směrem. Pro zvýšení flexibility je důležitá i robustní komunikace, která CubeSatu umožní odesílat naměřená data. A v neposlední řadě k vyšší flexibilitě přispívá i zajištění dostatečného množství energie. Některé přístroje nebo subsystémy totiž mohou mít velkou spotřebu.

## 3.2. Koncepce

### Velikost

Standards poskytují velice přesný popis a návod celé koncepce. Je možné zvolit různé velikosti, od 0,5U až po stále častěji využívané 6U. Existují však i další návrhy jako PocketQube nebo CubeSat, který se skládá z ještě více jednotek. Vzhledem k tomu, co bylo uvedeno v předchozí kapitole, se jako nejlepší řešení jeví koncepce 1U. Jedná se o základní CubeSat, který je na vysokých školách také nejhojněji využíván. Tato velikost dovolí otestovat všechny důležité subsystémy a oproti větším CubeSatům jsou výhodou nižší náklady na vývoj a hlavně vypuštění.

### Nákup nebo vývoj

V dnešní době funguje mnoho internetových obchodů, ve kterých je možné si zakoupit nejrůznější komerční subsystémy a komponenty pro stavbu CubeSatů. Prakticky je možné si z nich poskládat celý CubeSat a ještě si od těchto dodavatelů nechat zajistit vypuštění. Další možností je si vše vyvinout a vyrobit vlastními silami. Na konečné rozhodnutí má vliv celá řada faktorů, čas určený na vývoj, rozpočet, přístup k riziku nebo cíle daného projektu. Z pohledu času je mnohem rychlejší si danou komponentu koupit. Porovnáme-li náklady, vývoj bývá ve většině případů levnější. U rizika to není úplně jednoznačné. Nákup otestovaných a letem ověřených subsystémů je méně rizikový než vývoj obdobného subsystému. Avšak v případě vývoje subsystému, který se od toho komerčně nabízeného liší právě tím, že má některé důležité

komponenty redundantní nebo má jiným způsobem zvýšenou spolehlivost, je situace odlišná. A samozřejmě záleží i na cílech daného týmu. Některá organizace může mít zájem na otestování pouze konkrétního subsystému či užitečného vybavení, z tohoto důvodu zvolí jednodušší, rychlejší a méně rizikovou cestu a vše ostatní si pořídí nákupem.

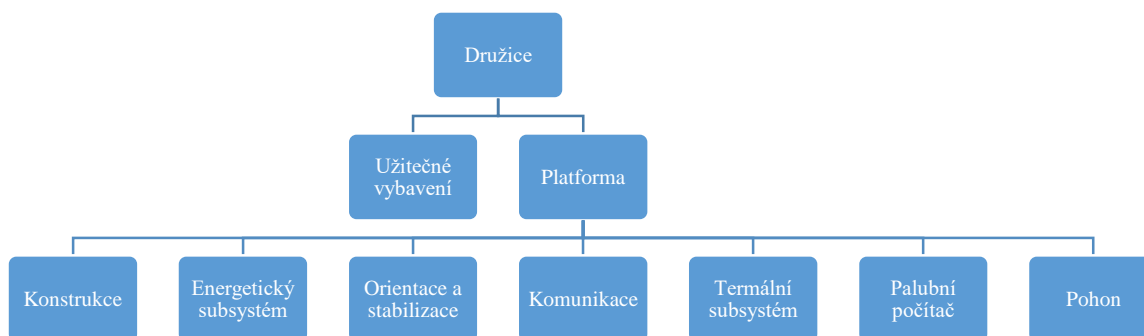
Jelikož je cílem do zamýšleného CubeSatu zapojit co nejvíce studentů a v ideálním případě na tento projekt navázat vývojem dalších družic, jako lepší varianta se nabízí vývoj co největšího množství subsystémů a komponent a nákup jen těch, u kterého tento vývoj není možný. Při tom je možné spolupracovat i s ostatními fakultami na ČVUT, vysokými školami a dalšími organizacemi v České republice i zahraničí.

### **3.3. Oběžná dráha a životnost**

CubeSaty jsou v současné době vypouštěny na nízkou oběžnou dráhu, ta, jak již bylo uvedeno dříve, se nachází ve výšce do 2 000 km. Pokud se její sklon blíží  $90^\circ$ , hovoříme již o dráze polární. Ta má oproti nízké oběžné dráze několik specifik. Obíhá Zemi nad oběma póly a tím dokáže pokrýt celý její povrch. Na druhou stranu nad oběma póly se dostávají energetické částice blíže k zemskému povrchu a družice, které na polární dráze jsou, proto dostávají vyšší dávky záření, to může mít negativní vliv na její životnost. Životnost družice ovlivňuje i výška oběžné dráhy. Čím výše se družice nachází, tím delší dobu bude trvat, než shoří v atmosféře. Ve výšce kolem 300 km dokáží družice fungovat týdny, ve výšce kolem 400 km jsou to již měsíce a ve vyšších výškách roky. Vliv na životnost družice mají i použité komponenty, zejména fotovoltaické články, ty postupně degradují. Udává se, že jejich životnost je zhruba 2 roky. Mise klasických družic mohou trvat i přes 10 let, ale u CubeSatů to jsou většinou měsíce. CubeSatů se na oběžnou dráhu vypouští čím dál tím více a velká část z nich nakonec po vypuštění ani není aktivní. Snahou je proto CubeSaty vypouštět spíše na nižší oběžnou dráhu, aby byla jejich životnost kratší. Konečný typ oběžné dráhy ovlivňuje také užitečné vybavení a příležitosti pro vypuštění. Vypuštění na polární dráhu bývá obecně dražší než vypuštění na nízkou oběžnou dráhu. Z těchto důvodů v současné době není možné o oběžné dráze rozhodnout.

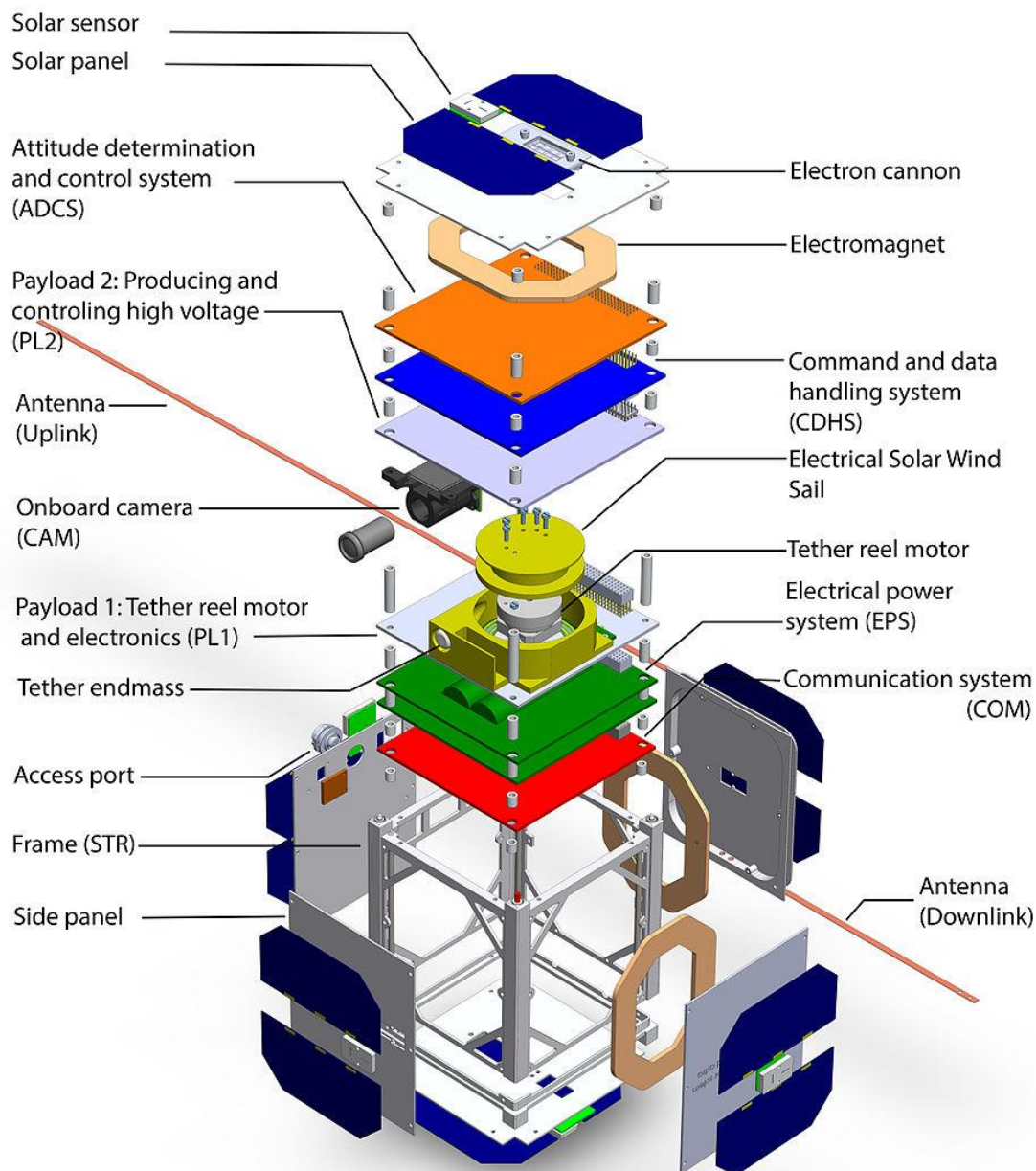
## 3.4. Subsystémy

Kosmický segment, v tomto případě družici, je možné rozdělit na platformu, která se skládá z jednotlivých subsystémů, a užitečné vybavení. Mezi základní subsystémy patří konstrukce, energetický subsystém, orientace a stabilizace, komunikační subsystém, termální subsystém, palubní počítač a pohon.



Obrázek 20: Rozdělení družice na jednotlivé subsystémy

Základní 1U CubeSat je krychle o hraně 10 cm a hmotností do 1,33 kg. Do těchto limitů musí být vměstnány všechny důležité subsystémy, ale také samotné užitečné vybavení. Je důležité si uvědomit, že CubeSat s váhou 1 kg v podstatě obsahuje stejné základní subsystémy jako družice, která váží několik tun. Řada subsystémů je zjednodušená a některé nemusejí být přítomné vůbec, avšak ty klíčové subsystémy, bez kterých by žádná družice nemohla na oběžné dráze fungovat, přítomné být musí. To je umožněno hlavně díky miniaturizaci. Komponenty, které byly ještě před pár lety těžké a neforemné, jsou nyní drobné a váží jen několik málo gramů. Subsystémy jsou také často velice zjednodušené oproti obdobným subsystémům na větších družicích. Využívány jsou především MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) senzory, které jsou malé a velice lehké. V dalším textu budou jednotlivé subsystémy popsány.



The structure of cubesat ESTCube-1

Obrázek 21: Subsystémy CubeSatu ESTCube-1<sup>21</sup>

## Konstrukce

Konstrukce tvoří základ družice, právě ona dává CubeSatům jejich specifický tvar a také název. Konstrukce nese solární články, antény i všechny moduly. Protože se teploty na straně

<sup>21</sup> Převzato z [38]

přivrácené a odvrácené od Slunce mohou značně lišit, měla by být tepelně vodivá. Konstrukce slouží také k ukostření, z tohoto důvodu by měla být i elektricky vodivá. Protože je CubeSat limitován maximální hmotností 1,33 kg, měla by být co nejlehčí, zároveň však musí být dostatečně tuhá, aby odolala vibracím při startu. Pro konstrukci se proto používají hliníkové slitiny, standardy však dovolují použití jen několika konkrétních slitin. Jde o slitiny 7075, 6061, 5005 a 5052. Hliník na bočních hranách navíc musí být eloxovaný, aby se zabránilo studenému svařování k dalším CubeSatům nebo vypouštěcímu kontejneru. Vnější rozměry konstrukce jsou 113,5 x 100,0 x 100,0 mm. Vývoj konstrukce není tak složitý, na internetu lze navíc nalézt poměrně dost informací a plánů, z tohoto důvodu je výhodnější ji vyvinout od začátku. Cílem by mělo být zejména dosažení co nejnižší hmotnosti.

## **Orientace a stabilizace**

Subsystem orientace a stabilizace má za úkol stabilizovat družici a umožnit její orientaci požadovaným směrem a to i přes to, že na ni na oběžné dráze působí řada rušivých sil. Tyto síly je možné podle původu rozdělit na vnitřní a vnější. Vnitřní síly představují různé mechanické součásti, ty vnější gravitační gradient, aerodynamický odpor, tlak záření nebo nehomogenitu magnetické pole. Tento systém má také za úkol utlumit prvotní rotaci, kterou družice dostane po svém uvolnění z vypouštěcího kontejneru. Stabilizace může být aktivní a pasivní. Další dělení je na jednoosou, která využívá rotaci, a tříosou.

Mezi využívané senzory pro určování polohy a orientace patří magnetometr, gyroskop, akcelerometr, sluneční senzor, detektor horizontu Země, sledovače hvězd nebo globální družicový polohový systém. Všechny tyto senzory se u CubeSatů již používají a volba vždy záleží na konkrétní aplikaci. Nejčastěji je využíván magnetometr, který je však potřeba velice přesně kalibrovat. Další senzory se využívají jako doplňkové a fúzí dat ze všech těchto senzorů lze dosáhnout mnohem přesnějších výsledků. Pro utlumení prvotní rotace a orientaci družice jsou využívány elektromagnetické cívky. Ty díky průchodu elektrického proudu generují magnetické pole, které je schopné v magnetickém poli Země družici stabilizovat nebo ji natočit do požadovaného směru.

Jedním ze sekundárních cílů je zajištění aktivní stabilizace a přesné orientace. K tomu stačí využít ověřené technologie, trojici elektromagnetických cívek poskládaných kolmo k sobě a magnetometr doplněný o další senzory.



## **Komunikace**

Komunikační subsystém slouží k přijímání a odesílání dat. Směrem k družici proudí pokyny a směrem od družice telemetrická data, fotografie či výsledky experimentů. V rámci sekundárních cílů je uvedeno, že by měl být tento subsystém co nejspolehlivější, z tohoto důvodu je důležitá redundance. Pro komunikaci jsou důležité i antény. Ty musí být až do doby, kdy CubeSat opustí vypouštění kontejner, schované uvnitř družice. Nejčastěji jsou uvnitř svinuty jako metr a rozvinou se až po přepálení silonu, nebo jiného materiálu, který jim brání v rozvinutí. Rozvinutí antén je potřeba detailně vyzkoušet, protože při jeho selhání nebude možné s družicí žádným způsobem komunikovat. Pro přijímání a odesílání dat bude potřeba společně s CubeSatem vyvinout také pozemní stanici. Další možností je využít již vytvořených stanic. Svou stanici vytvořil tým okolo czCube i PilsenCube.

## **Palubní počítač**

Řízení a správu dat obstarává palubní počítač, který je tak vlastně mozkem celé družice. Má na starosti komunikaci s ostatními subsystémy, ukládání dat do interní paměti a rozdělování úloh dalším subsystémům. Jedná se o jeden z nejdůležitějších subsystémů, proto by měl být také redundantní. Součástí palubního počítače je i operační systém, ten lze vyvinout nebo nakoupit.

## **Energetický subsystém**

Hlavním účelem energetického subsystému je poskytnout dostatek elektrické energie zbylým subsystémům tak, aby byla družice schopna fungovat a plnit své cíle po celou délku mise. Energetický subsystém CubeSatů je tvořen fotovoltaickými články umístěnými na stěnách. Ty mohou být pevné nebo výklopné. Součástí energetického subsystému je i akumulátor, který pomáhá uchovávat energii pro období pobytu v zemském stínu a pro energetické špičky. Stejně jako komunikační subsystém a palubní počítač, tak i energetický subsystém by měl být zdvojený.

## **Termální subsystém**

Na oběžné dráze je několik zdrojů tepla, můžeme je rozdělit na vnější a vnitřní. Vnější zahrnují hlavně sluneční záření, sluneční záření odražené od Země, záření Země, tření o zbytky atmosféry nebo nárazy kosmického smetí a dalších drobných těles. Vnitřní záření představují

tepelná ztráty. Na Zemi se teplo přenáší třemi mechanismy, prouděním, vedením a zářením. Uvnitř hermeticky uzavřené družice můžeme pozorovat také tyto tři mechanismy, avšak s vnějším prostředím si může družice vyměňovat teplo pouze zářením.

Termální subsystém je zodpovědný za udržení optimální vnitřní teploty. Na tu jsou nejháklivější hlavně akumulátory, které nesmějí být delší dobu v chladu. Termální ochranu je možné řešit pasivně a aktivně. U CubeSatů je snahou pro svou spolehlivost využívat pasivní termální ochranu. Mezi aktivní ochranu mohou patřit vyhřívače, avšak ty jsou spíše záložním řešením, pokud by došlo k poklesu vnitřní teploty pod stanovenou mez.

## **Pohon**

Většina CubeSatů nedisponuje žádným pohonem. Klasické pohony jsou totiž pro CubeSaty moc velké a navíc pro většinu z misí není pohon potřebný. Avšak s postupným rozvojem těchto družic a plány na mise dále do vesmíru se různé technologické demonstrátory pohonu začínají objevovat. Mezi známé koncepty patří solární plachta, elektrodynamický tether, tryska se stlačeným plynem, ale začínají se objevovat i elektrické pohony, například iontové. Jak již bylo uvedeno dříve, pohon je jedním z faktorů, který dnešní CubeSaty limituje, z tohoto důvodu se nabízí myšlenka vybavit CubeSat experimentálním pohonem, zejména tím elektrickým.

## **3.5. Stanovení limitů**

V následujícím textu budou stanoveny hmotnostní, objemové a energetické limity. Autor čerpal údaje z webů několika prodejců subsystémů a komponent pro CubeSaty, zejména z GomSpace ([www.gomspace.com](http://www.gomspace.com)), ISIS Space ([www.isispace.nl](http://www.isispace.nl)), Clyde Space ([www.clyde.space](http://www.clyde.space)) a Pumkpin ([www.cubesatshop.com](http://www.cubesatshop.com)). Získání těchto údajů však nebylo jednoduché, neboť prodejci často neuváděli cenu a energetickou spotřebu. Navíc se jednotlivé subsystémy a komponenty prodejce od prodejce liší v závislosti na tom, jaké komponenty obsahují a jakých dosahují parametrů. Následující tabulky proto uvádějí údaje vzniklé na základě porovnání nabídky všech čtyř společností. Tam, kde nebylo možné zjistit přesný údaj, byl tento údaj odhadnut. Vždy je počítáno i s určitou rezervou.

## Hmotnostní limity

Příslušný standard uvádí, že 1U CubeSat může vážit nanejvýš 1330 g, ale v ojedinělých případech může být tato hmotnost i překročena. Nejvyšší hmotnost ze všech subsystémů má konstrukce a energetický subsystém s 200 g, dále následuje orientace a stabilizace, komunikační systém a palubní počítač se 150 g. Zbýlých 60 g vychází na termální subsystém a ostatní drobné komponenty. Celkově se tak jedná o 910 g, to je asi 68% z maximální povolené hmotnosti.

Tabulka 3: Hmotnostní limity

<b>Subsystém</b>	<b>Hmotnost</b>	
Konstrukce	200 g	15%
Termální subsystém	10 g	1%
Orientace a stabilizace	150 g	11%
Energetický subsystém	200 g	15%
Komunikační subsystém	150 g	11%
Palubní počítač	150 g	11%
Ostatní	50 g	4%
Celkem	910 g	68%
Zbývá	420 g	32%

## Objemové limity

1U CubeSat může mít maximální objem 1 000 cm<sup>3</sup> a na rozdíl od hmotnosti jej není možné žádným způsobem překročit. Z rešerše je patrné, že největší objem mají subsystém orientace a stabilizace a energetický subsystém s 200 cm<sup>3</sup>, komunikační subsystém a palubní počítač potom zabírají objem asi 150 cm<sup>3</sup>. To je dohromady 700 cm<sup>3</sup>, 70% z povoleného limitu.

Tabulka 4: Objemové limity

Subsystém	Objem	
Orientace a stabilizace	200 cm <sup>3</sup>	20%
Energetický subsystém	200 cm <sup>3</sup>	20%
Komunikační subsystém	150 cm <sup>3</sup>	15%
Palubní počítač	150 cm <sup>3</sup>	15%
Ostatní	0 cm <sup>3</sup>	0%
Celkem	700 cm <sup>3</sup>	70%
Zbývá	300 cm <sup>3</sup>	30%

### Energetické limity

Posledními zkoumanými limity jsou ty energetické. Solární fotovoltaické články dokáží CubeSatu dodat asi 2 000 až 2 5000 mW v závislosti na zvolené oběžné dráze a jejich účinnosti. V tabulce je počítáno s dolním limitem a průměrnými hodnotami spotřeby. Nejvyšší spotřebu má palubní počítač s 400 mW, následuje jej komunikační subsystém s 300 mW a dále orientace a stabilizace s 200 mW. Tyto údaje je však nutné brát jako přibližné, protože většina výrobců žádné údaje neuváděla.

Tabulka 5: Energetické limity

Subsystém	Spotřeba	
Orientace a stabilizace	200 mW	10%
Komunikační subsystém	300 mW	15%
Palubní počítač	400 mW	20%
Ostatní	0 mW	0%
Celkem	900 mW	45%
Zbývá	1100 mW	55%

Tyto údaje je nyní možné porovnat s platformou společnosti GomSpace [25]. Platforma obsahuje všechny důležité subsystémy a pro užitečné zatížení zbývá 605 g hmotnosti, 400 cm<sup>3</sup> objemu a 1,33 W energie. Údaje se tedy velice podobají údajům v předchozích tabulkách.

## 3.6. Užitečné vybavení

Dalším krokem je výběr užitečného vybavení. V předchozím textu bylo vysvětleno, že hlavním cílem CubeSatu je vyvinout a otestovat platformu. Tomu by měla být věnována maximální pozornost. Užitečné vybavení je tady až na dalším místě. V předchozím textu bylo navíc naznačeno, že by součástí této mise mohl být experiment zaměřený na testování inovativního pohonu. Pokud by tomu opravdu tak bylo, nebylo by jednoduché do CubeSatu vměstnat ještě další užitečné vybavení. Jako takové klasické užitečné vybavení pro CubeSaty se nabízí kamera, která je součástí velkého množství misí. Kamera je poměrně malá a lehká a navíc jsou pořízené fotografie dobrým způsobem, jak misi propagovat na veřejnosti.

Pokud by nebyl součástí experimentální pohon, bylo by možné uvažovat o nějakém jiném experimentu. Na Českém vysokém učení technickém se dlouhodobě pracuje s fluxgate magnetometry, ty jsou součástí kosmických misí již řadu let. Fluxgate magnetometr byl i na palubě poslední české družice MIMOSA. Nabízí se tedy možnost pokračovat ve vývoji tohoto druhu magnetometrů a vybavit jím zamýšlený CubeSat. Další možností je spolupráce s některým z ústavů Akademie věd.

## 3.7. Posouzení rizik a kritických technologií

### Analýza rizik

Téměř žádný projekt není bez rizika a o těch kosmických to platí dvojnásob. Následujícím bodem proto bude analýza rizik. K tomu slouží tabulka, na jejíž horizontální ose je vyjádřena závažnost a na vertikální ose pravděpodobnost. Závažností se myslí dopad, pokud se dané riziko vyplní. Čím vyšší pravděpodobnost a závažnost daný rizikový faktor má, tím větší pozornost je nutné mu věnovat.

Tabulka 6: Tabulka pro určení rizik

Pravděpodobnost	E	Nízká	Střední	Vysoká	Velmi vysoká	Velmi vysoká
	D	Nízká	Nízká	Střední	Vysoká	Velmi vysoká
	C	Velmi nízká	Nízká	Nízká	Střední	Vysoká
	B	Velmi nízká	Velmi nízká	Nízká	Nízká	Střední
	A	Velmi nízká	Velmi nízká	Velmi nízká	Velmi nízká	Nízká
		1	2	3	4	5
		Závažnost				

Vzhledem k tomu, že projekt vývoje CubeSatu ještě nezačal, omezuje se analýza rizik pouze na identifikaci rizikových faktorů, které mohou mít vliv na to, že vývoj vůbec nezačne. Podařily se identifikovat čtyři hlavní rizika: nenalezení finančních zdrojů, nenalezení podpory ve vedení ČVUT pro stavbu CubeSatu, nenalezení dostatečného množství studentů se zájmem se do tohoto projektu zapojit a nenalezení partnerských organizací, které by mohly na tomto projektu spolupracovat. Nejvíce rizikovým faktorem je nenalezení finančních zdrojů. Právě tento faktor se ukázal jako klíčový i v případě vývoje jiných českých CubeSatů.

Tabulka nabízí také návrh preventivních opatření, která je možné učinit, aby se minimalizovala pravděpodobnost nebo závažnost jednotlivých rizikových faktorů. V případě finančních zdrojů je potřeba začít zkoumat a rozvíjet všechny dostupné možnosti a kontakty, také je důležité nespolehat jen na jeden zdroj financí, ale usilovat o více zdrojů. Podobná preventivní opatření jsou nastíněna i pro další rizikové faktory.

Tabulka 7: Identifikovaná rizika

	<b>Riziko</b>	<b>Navržená preventivní opatření</b>
D5	Nenalezení finančních zdrojů	Využít všech dostupných možností a kontaktů, nespoléhat se pouze na jeden zdroj financování
C4	Nenalezení podpory ve vedení ČVUT	Snažit se poukázat na dobré příklady ze zahraničí, snažit se nalézt podporovatele této myšlenky
B4	Nenalezení dostatečného množství dobrovolníků	Hledat i mimo ČVUT
B3	Nenalezení partnerských organizací	Využít všech kontaktů, hledat i v zahraničí

### **Analýza kritických technologií**

Mezi ty nejdůležitější a zároveň nejvíce kritické technologie patří energetický subsystém, komunikační subsystém a dále palubní počítač. Všechny tyto subsystémy jsou nezbytné pro fungování družice a právě těmto subsystémům by měla být věnována nejvyšší pozornost, zejména s ohledem na jejich odolnost vůči kosmickému prostředí.

## **3.8. Stanovení nákladů**

Pro rozhodnutí, jestli je stavba CubeSatu ekonomicky proveditelná, je nejprve nutné stanovit náklady na jeho vývoj, testování a také vypuštění.

Náklady na vývoj se v takto počáteční fázi celého projektu stanovují velice obtížně. Nejlepší proto bude vycházet z obdobných univerzitních CubeSatů ze zahraničí. Celkové náklady na vývoj estonské družice EstCube-1 byly téměř 100 000 EUR, z toho připadalo 70 000 EUR na vypuštění a 30 000 EUR na vývoj. [26] Náklady na vývoj polské univerzitní družice PW-Sat dosáhly asi 63 205 USD. Přepočteno současným kurzem, náklady na vývoj těchto CubeSatů byly 810 000 CZK v případě estonského a 1 540 000 CZK v případě polského. Celkové

uznatelné náklady na vývoj CubeSatu VZLUSAT-1 dosáhly 23 650 000 CZK. Náklady placené ze státního rozpočtu na vývoj slovenské družice skCube a příslušného pozemního vybavení dosáhly 207 900 EUR, to je asi 5 620 000 CZK. [27] Z těchto čísel je patrné, že vývoj univerzitních CubeSatů má nižší náklady než vývoj CubeSatů v rámci jiných organizací. To je dáno zejména mzdou, kdy studenti na vývoji pracují v rámci své bakalářské nebo diplomové práce, kdežto v rámci jiných organizací jsou zaměstnanci za tuto práci placeni.

Náklady na testování a vypuštění není jednoduché získat, protože si je poskytovatelé těchto služeb velice pečlivě střeží. Tým vyvíjející slovenskou družici skCube na tyto služby získal veřejné finance a tato smlouva je snadno dohledatelná na internetu. [28] Z této smlouvy je patrné, že celkové náklady na vypuštění a testování jsou 120 000 EUR, tedy asi 3 250 000 CZK. Z toho 45 000 EUR připadá na zabezpečení zamluvení místa na palubě nosné rakety, 20 500 EUR na letový kontejner, 20 000 EUR na management přípravy vypuštění družice, 10 000 EUR na měření elektromagnetické kompatibility. Další náklady jsou již zhruba poloviční. Obecně se uvádí, že cena za vypuštění 1U CubeSatu je asi 100 000 USD, avšak vždy záleží na konkrétní oběžné dráze a na dalších službách, které si daný tým pořizuje. Nejnižší nabízená cena je 80 000 USD od společnosti Rocket Lab. [29] Americká společnost NanoRacks nabízí vypuštění CubeSatů přímo z Mezinárodní kosmické stanice, cena za vypuštění 1U začíná na 85 000 USD. [30]

*Tabulka 8: Náklady na testování a vypuštění družice skCube<sup>22</sup>*

<b>Služba</b>	<b>Cena</b>
Kvalifikační a akceptační testy	3000 EUR
Testovací letový kontejner	5000 EUR
Letový kontejner	20500 EUR
Zabezpečení zamluvení místa na palubě nosné rakety	45000 EUR
Management přípravy vypuštění družice	20000 EUR
Zabezpečení povolení FCA a NOAA licencí	4500 EUR
Měření elektromagnetické kompatibility komponent družice	10000 EUR
Doprava družice na kosmodrom	1000 EUR
Intergrace družice na palubě nosné rakety	5000 EUR
Vypuštění družice	6000 EUR
Celkem	120000 EUR

<sup>22</sup> Zdroj dat [28]



Vypuštění je však možné zajistit při troše štěstí i zadarmo, stejně jako v případě projektu QB50 nebo prvního startu nosné rakety Vega. V současné době však žádné další informace o podobné příležitosti nejsou známy. Počítáme-li cenu za vývoj zhruba 1 000 000 až 2 000 000 CZK a cenu za vypuštění a testy 2 000 000 až 3 000 000 CZK, celkové náklady potom jsou zhruba 3 000 000 až 5 000 000 CZK. Skutečné náklady závisí na volbě jednotlivých subsystémů a způsobu jejich pořízení a dále na zvolené oběžné dráze a poskytovateli vypuštění.

## **3.9. Zhodnocení proveditelnosti**

Dalším bodem je zhodnocení proveditelnosti, nejprve bude zhodnocena s ohledem na technickou stránku projektu a poté s ohledem na ekonomickou stránku projektu.

### **Technologická proveditelnost**

České projekty zaměřené na vývoj CubeSatů ukázaly, že technická stránka projektů je menším problémem než ekonomická stránka. České týmy byly schopné vyvinout celou řadu subsystémů na vysoké úrovni a v případě VZLUSAT-1 a Lucky-7 se podařilo vyvinout i celou družici. Ostatní tři projekty, czCube, PilsenCube a CzechTechSat, skončily kvůli tomu, že se pro ně nepodařilo zajistit dostatek financí. ČVUT má navíc zkušenosti již s vývojem jednoho CubeSatu a celou řadou dalších kosmických projektů, vždy je navíc možné spolupracovat s nějakou jinou organizací. Ze všech těchto důvodů je patrné, že technologicky stavba družice proveditelná je.

### **Ekonomická proveditelnost**

Dalším krokem je zhodnocení zdrojů pro financování. Vývoj každého z pěti českých CubeSatů byl financován z jiného zdroje, takže možnosti jsou poměrně široké. Vývoj czCube byl financován ze soukromých zdrojů vývojového týmu, PilsenCube z projektu pod Grantovou agenturou, VZLUSAT-1 ze dvou projektů pod Technologickou agenturou, CzechTechSat ze Studentské grantové soutěže ČVUT a Lucky-7 je financován soukromou společností.

Všechny projekty financované z veřejných zdrojů však počítaly pouze s financováním vývoje a ne již se samotným vypuštěním. V případě VZLUSAT-1 je vypuštění zdarma v rámci

projektu QB50, v případě Lucky-7 by mělo být vypuštění hrazené ze zisku soukromé společnosti. Neúspěšné projekty ukázaly, že je klíčové již od počátku s pokrytím nákladů na vypuštění počítat, v opačném případě může dojít k ukončení celého projektu. V současné době probíhá vývoj nových prostředků pro vypouštění družic s ještě nižšími náklady na start. Jedná se třeba o znovupoužitelnou nosnou raketu Falcon 9 společnosti SpaceX, suborbitální letoun Lynx společnosti XCOR Aerospace nebo malé nosné rakety označované jako micro-launcher. Do budoucna jde proto počítat se snížením těchto nákladů.

Jako nejreálnější se jeví varianta vícezdrojového financování, kdy by byla část rozpočtu pokryta univerzitou a další část projektem v rámci některého z grantových programů. Využití financí z Evropské kosmické agentury není možné, přechodné období, kdy bylo možné během prvních 6 let členství využít část financí z povinného příspěvku na projekty v prioritních oblastech, již pominulo. I když se o tom již řadu let hovoří, Česká republika v současné době stále nemá žádný národní kosmický program, ze kterého by bylo možné podobné projekty financovat. Takže ani tudy cesta nevede.

Co se týká ekonomické proveditelnosti, zajištění financí na vývoj je v českých podmínkách reálné a již ověřené. Se zajištěním financí na vypuštění je to již horší a klasické grantové programy ani grantová soutěž ČVUT pro to nejsou příliš vhodné. Bude proto nutné vyvinout snahu a hledat nějaké nesystémové řešení jako vyčlenění speciálních financí z rozpočtu ČVUT, pokusit se získat tyto finance od vlády, crowdfunding, dary nebo spolupráce se soukromým sektorem.

### **3.10. SWOT analýza**

SWOT analýza slouží k hodnocení silných a slabých stránek a dále příležitostí a hrozeb. Silné a slabé stránky se vztahují k vnitřnímu prostředí, kdežto příležitosti a hrozby naopak analyzují prostředí vnější.

Ze SWOT analýzy vyplývá, že ČVUT může čerpat ze svých zkušeností, dobrého jména nebo studentů a akademických pracovníků. Naopak špatnou zprávou jsou chybějící zkušenosti s vývojem družic, omezený rozpočet a vybavení nebo nedostupnost kvalitní literatury. Jako budoucí příležitosti se jeví využití platformy i pro další projekty, získání jedinečných zkušeností, kapacit a poznatků nebo možné zapojení do navazujících projektů. Hrozby jsou podobné jako rizika. ČVUT má tedy poměrně dobré zázemí pro to, aby mohla CubeSat

vyvinout, největším problémem jsou finance, ty omezují vývoj, ale také se podepisují na omezeném vybavení a nedostatku kvalitní literatury.

Tabulka 9: SWOT analýza

Silné stránky	Slabé stránky
Zkušenosti s kosmickými projekty Dobré jméno Spolupráce s dalšími organizacemi Mnoho nadšených a aktivních studentů Zkušení akademičtí pracovníci Silné zaměření na výzkum a vývoj	Chybějící zkušenosti s vývojem družic Omezený rozpočet Chybějící specializovaná katedra Omezené vybavení Nedostupnost kvalitní literatury
Příležitosti	Hrozby
Využití platformy i pro další projekty Získání jedinečných zkušeností a kapacit Zapojení do dalších navazujících aktivit Získání vědeckých a technických poznatků	Nenalezení zdroje financí Nenalezení dostatečného počtu dobrovolníků Nenalezení partnerských organizací

# Závěr

Cílem této diplomové práce bylo učinit první krok ke stavbě družice typu CubeSat. Tyto družice mají hmotnost jen několik málo kilogramů a nemohou se tak vyrovnat družicím vážícím několik tun. V mnoha ohledech je potřeba sahat ke zjednodušení a kompromisům, avšak i přes tohle všechno se jedná o plnohodnotné družice, které na oběžné dráze zvládnou celou řadu experimentů. V blízké budoucnosti se dokonce plánují mise do vzdálenějšího vesmíru mimo oběžnou dráhu Země.

CubeSaty tak mají před sebou slibnou budoucnost a zapojení se do jejich vývoje je výhodné pro vysoké školy i samotné studenty. V České republice byly již dva pokusy o jejich vývoj na vysoké škole, avšak ani jeden z těchto pokusů nebyl úspěšný. Důvodem byly v obou případech finance. Posláním zamýšleného CubeSatu o rozměrech 10 x 10 x 10 cm a hmotnosti do 1,33 kg by tak mělo být doplnit teoretické vzdělání na ČVUT o možnost praktického zapojení studentů do skutečné kosmické mise.

Do vesmíru bylo do konce roku 2015 vypuštěno již 435 CubeSatů, avšak zhruba jen polovina z nich dokázala alespoň částečně splnit svou naplánovanou misi. Velká část z těch ostatních CubeSatů selhala kvůli tomu, že se nedokázala vyrovnat s kosmickým prostředím, které na každý lidský výtvar ve vesmíru klade extrémní nároky. Primárním cílem zamýšlené kosmické mise by proto měl být technologický experiment samotné platformy. Existují dvě cesty, jak CubeSat postavit, je možné si subsystemy vyvinout, nebo je nakoupit. Vzhledem k cílům tohoto projektu a akademické půdě bude lepší první varianta.

Mezi hlavní subsystemy CubeSatu patří konstrukce, energetický subsystem, orientace a stabilizace, komunikační subsystem, termální subsystem, palubní počítač a pohon. Mezi ty nejdůležitější patří energetický subsystem, komunikační subsystem a palubní počítač a je proto potřeba, aby byly co nejspolehlivější. Toho lze docílit redundancí. Pohon u většiny CubeSatů vůbec není přítomný, avšak vzhledem k tomu, že to je v současné době jedna z bariér pro zapojení CubeSatů do nových typů misí, se nabízí myšlenka na vývoj a otestování některého z konceptů elektrického pohonu. Další možností je výběr jiného užitečného zatížení, nabízí se fluxgate magnetometr či spolupráce s Akademií věd.

Náklady na vývoj, testování a vypuštění byly předběžně stanoveny na 3 000 000 až 5 000 000 CZK v závislosti na volbě jednotlivých subsystemů a oběžné dráhy. A právě finance jsou tou největší překážkou v realizaci. Finance na vývoj se dají získat prostřednictvím některého

z grantových programů, avšak vypuštění je nutné financovat jiným způsobem. To se žádnému českému týmu ještě nepodařilo. V případě, že by byla na ČVUT politická podpora se do tohoto projektu pustit, bylo by nalezení financí tím nejtěžším krokem. Z technologického hlediska je ČVUT dostatečně kvalifikované na to, aby samostatně nebo s nějakou jinou organizací vývoj CubeSatu zvládlo. Má již zkušenosti z jiných kosmických projektů, síť spolupracujících organizací a silné zázemí.

Dalším krokem, který by měl na tuto diplomovou práci navázat, je zahájení diskuze o tom, jestli má ČVUT o vývoj CubeSatů zájem. Bez podpory vedení a širokého zapojení ekonomických, lidských a technických zdrojů totiž hrozí, že by tento projekt skončil stejně jako většina těch ostatních. Tato diplomová práce si nekladla za cíl poskytnout detailní návrh jednotlivých subsystémů. Jejím úkolem bylo zmapovat možnosti a faktory, které vývoj CubeSatů ovlivňují. A to se podařilo.

# Literatura

- [1] J. REJZEK, Český etymologický slovník, Voznice: Leda, 2012.
- [2] L. PEREK, „Čtyři úkoly pro druhou padesátku,“ v *50 let kosmonautiky: výročí startu první umělé družice Země*, Praha, Národní technické muzeum, 2008, p. 192.
- [3] S. S. F. d. Córdoba, „100km Altitude Boundary for Astronautics,“ [Online]. Available: <http://www.fai.org/icare-records/100km-altitude-boundary-for-astronautics>. [Přístup získán 7. 11. 2015].
- [4] J. Levine, „A long-overdue tribute,“ 21 10 2005. [Online]. Available: [http://www.nasa.gov/centers/dryden/news/X-Press/stories/2005/102105\\_Wings.html](http://www.nasa.gov/centers/dryden/news/X-Press/stories/2005/102105_Wings.html). [Přístup získán 7. 11. 2015].
- [5] European Cooperation for Space Standardization, „ECSS-E-ST-10-04C, Space engineering - Space environment,“ [Online].
- [6] W. J. Larson a J. R. Wertz, *Space Mission Analysis and Design*, El Segundo: Microcosm Press, 2005.
- [7] M. M. Finckenor a K. K. de Groh, „A Researcher’s Guide to: Space Environmental Effects,“ 2015. [Online]. Available: [http://www.nasa.gov/sites/default/files/files/NP-2015-03-015-JSC\\_Space\\_Environment-ISS-Mini-Book-2015-508.pdf](http://www.nasa.gov/sites/default/files/files/NP-2015-03-015-JSC_Space_Environment-ISS-Mini-Book-2015-508.pdf). [Přístup získán 16. 5. 2016].
- [8] A. Merstallinger, M. Sales, E. Semerad a B. D. Dunn, „Assessment of Cold Welding between Separable Contact Surfaces due to Impact and Fretting under Vacuum,“ 2009. [Online]. Available: [http://esmat.esa.int/Publications/Published\\_papers/STM-279.pdf](http://esmat.esa.int/Publications/Published_papers/STM-279.pdf). [Přístup získán 7. 5. 2016].
- [9] P. Fortescue, J. Stark a G. Swinerd, *Spacecraft System Engineering*, 3rd Edition, 2003.
- [10] European Cooperation for Space Standardization, „ECSS system - Glossary of terms,“ 2012. [Online]. Available: <http://www.ecss.nl/>. [Přístup získán 16. 3. 2016].
- [11] California Polytechnic State University, „CubeSat Design Specification,“ 06 04 2015. [Online]. Available: [http://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/56e9b62337013b6c063a655a/1458157095454/cds\\_rev13\\_final2.pdf](http://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/56e9b62337013b6c063a655a/1458157095454/cds_rev13_final2.pdf). [Přístup získán 18. 4. 2015].

- [12] NASA, „First CubeSat Built by an Elementary School Deployed into Space,“ 16. 5. 2016. [Online]. Available: <http://www.nasa.gov/feature/first-cubesat-built-by-an-elementary-school-deployed-into-space/>. [Přístup získán 20. 5. 2016].
- [13] PocketQube, „PocketQube,“ [Online]. Available: <http://www.pocketqubeshop.com/>. [Přístup získán 2. 5. 2016].
- [14] M. Swartwout, „CubeSat Database,“ [Online]. Available: <https://sites.google.com/a/slu.edu/swartwout/home/cubesat-database>. [Přístup získán 20. 4. 2016].
- [15] NASA JPL, „Mars Cube One (MarCO),“ [Online]. Available: <http://www.jpl.nasa.gov/cubesat/missions/marco.php>. [Přístup získán 13. 11. 2015].
- [16] ESA, „Cubesat offered deep-space ride on ESA asteroid probe,“ 16 2 2015. [Online]. Available: [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Engineering\\_Technology/CubeSats\\_offered\\_deep-space\\_ride\\_on\\_ESA\\_asteroid\\_probe](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Engineering_Technology/CubeSats_offered_deep-space_ride_on_ESA_asteroid_probe). [Přístup získán 13. 11. 2015].
- [17] V. Kane, „The Potential of CubeSats,“ 24 10 2013. [Online]. Available: <http://www.planetary.org/blogs/guest-blogs/van-kane/20131023-the-potential-of-cubesats.html>. [Přístup získán 14. 11. 2015].
- [18] von Karman Institute for Fluid Dynamics, „QARMAN,“ [Online]. Available: <http://www.qarman.eu/>. [Přístup získán 14. 11. 2015].
- [19] czCube, „Projekt czCube,“ [Online]. Available: <http://www.czcube.org/cs/index.html>. [Přístup získán 28. 10. 2015].
- [20] Fakulta elektrotechnická, Západočeská univerzita v Plzni, „O projektu,“ [Online]. Available: <http://pilsencube.zcu.cz/>. [Přístup získán 28. 10. 2015].
- [21] CzechTechSat, „CzechTechSat,“ [Online]. Available: <http://czechtechsat.cz/>. [Přístup získán 28. 10. 2015].
- [22] J. Laifr, „Wanna fly to Mars? / CzechTechSat,“ 3. 3. 2015. [Online]. Available: <https://www.itu.int/en/ITU-R/space/workshops/2015-prague-small-sat/Presentations/Laifr-CzechTechSat.pdf>. [Přístup získán 19. 3. 2016].
- [23] Česká kosmická kancelář, „Czechspace 10,“ 1. 12. 2014. [Online]. Available: [http://www.czechspace.cz/sites/default/files/czechspace\\_10.pdf](http://www.czechspace.cz/sites/default/files/czechspace_10.pdf). [Přístup získán 2. 11. 2015].

- [24] M. Swartwout, „CubeSats and Mission Success: A Look at the Numbers,“ 20 4 2016. [Online]. Available: [https://a987c27f-a-d7f6459f-s-sites.googlegroups.com/a/slu.edu/swartwout/swartwout\\_cubesat\\_workshop\\_20160420.pdf?attachauth=ANoY7cq2ljAdpF5FYFRjN4StIXM7ACoFrZ4XJbaPm1fWwo5fS\\_Be3vkaKKlpHNfazBnaYYd4VTFczKuJZqV-rSgYNKWSS5NxR4Gth31FZWuhJOK-rg0HTf\\_JS2jwIoeTNYr](https://a987c27f-a-d7f6459f-s-sites.googlegroups.com/a/slu.edu/swartwout/swartwout_cubesat_workshop_20160420.pdf?attachauth=ANoY7cq2ljAdpF5FYFRjN4StIXM7ACoFrZ4XJbaPm1fWwo5fS_Be3vkaKKlpHNfazBnaYYd4VTFczKuJZqV-rSgYNKWSS5NxR4Gth31FZWuhJOK-rg0HTf_JS2jwIoeTNYr). [Přístup získán 17. 5. 2016].
- [25] GomSpace, „GOMX-Platform,“ [Online]. Available: <http://gomspace.com/index.php?p=products-platforms>. [Přístup získán 27. 5. 2016].
- [26] Estonian Space Office, „Programmes and Projects,“ [Online]. Available: <http://www.eas.ee/kosmos/en/international-cooperation/programmes-and-projects>. [Přístup získán 25. 5. 2016].
- [27] skCube, „FINANCOVANIE PROJEKTU PRVEJ SLOVENSKEJ DRUŽICE (SKCUBE): 2011 – 2016,“ [Online]. [Přístup získán 20. 5. 2016].
- [28] Centrálný register zmlúv, „Dodatok č. 1 k Zmluve o poskytnutí dotácie z rozpočtovej rezervy predsedu vlády Slovenskej republiky,“ [Online]. Available: <http://www.crz.gov.sk/index.php?ID=2373448&l=sk>. [Přístup získán 2. 5. 2016].
- [29] Rocket Lab, „WHEN DO YOU WANT TO LAUNCH?,“ [Online]. Available: <http://book.rocketlabusa.com/>. [Přístup získán 2. 5. 2016].
- [30] NanoRacks, „Smallsat Deployment,“ [Online]. Available: <http://nanoracks.com/products/smallsat-deployment/>. [Přístup získán 2. 5. 2016].
- [31] R. Hudec, „Zpráva o kosmických aktivitách ČVUT FEL,“ [Online]. Available: <https://www.fel.cvut.cz/cz/vv/kosmicke-aktivity.html>. [Přístup získán 7. 5. 2016].
- [32] ČSN 31 0001, Letectví a kosmonautika - Terminologie, Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1972.
- [34] M. Kramer, „Astronaut Spies 'Bullet Hole' in Space Station Solar Wing (Photo),“ 2 5 2013. [Online]. Available: <http://www.space.com/20925-space-station-bullet-hole-photo.html>. [Přístup získán 17. 5. 2016].
- [35] J. E. Mazur, „An Overview of the Space Radiation Environment,“ 2003. [Online]. Available: <http://www.aerospace.org/wp-content/uploads/crosslink/CrosslinkV4N2.pdf>. [Přístup získán 7. 2. 2016].
- [36] SkyFox Labs, „SkyFox Labs,“ [Online]. Available: <http://www.skyfoxlabs.com/references>. [Přístup získán 3. 4. 2016].



- [37] J. Kousal a A. Vítek, „Kosmonautika - teorie,“ 2014. [Online]. Available: <http://www.predmet.kosmo.cz/prednasky/ZK-2014-02.pdf>. [Přístup získán 15. 4. 2016].
- [38] Wikipedia, „ESTCube-1,“ [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/ESTCube-1>. [Přístup získán 21. 4. 2016].

# Přílohy

## Rozdělení vypuštěných CubeSatů podle dalších hledisek

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Rozdělení CubeSatů podle úspěšnosti																
Zveřejnění data vypuštění																1
Vypuštění							14		2			3		1	35	54
Umístění na oběžnou dráhu	4	1	1	3		1	1	4		4	4	1	7	16	8	11
Navázání komunikace				1		1		2		2		1	5	9	5	5
Zahájení provozu				1			1			3	2	2	1	47	34	17
Splnění cílů	1			1		1	4	1	6	2	9	5	10	6	35	1
Stav neznámý															1	37
Rozdělení CubeSatů podle jejich účelu																
Komunikační	1						3						3	5	2	7
Snímkovací															84	66
Technologický	1	1	1				2	3	5	5	5	4	11	47	14	42
Vědecký	2			1			5			3	2	6	3	6	7	8
Vojenský											4					
Vzdělávací	1			5		3	10	4	3	3	4	2	6	21	11	3
Rozdělení CubeSatů podle jejich velikosti																
Opal	5	1														
0,5U															2	
1U				5		3	16	6	3	10	5	5	15	40	14	10
1,5U											4	2		10		17
2 U			1				3		1			2	2	3	7	4
3U				1			1	1	4	1	6	3	6	26	93	94
6U															2	1
Rozdělení CubeSatů podle jejich tvůrce																
Civilní	1						1		2	2	1	1	2	16	4	15
Komerční								3					1	9	93	76
Univerzitní	3			6		3	17	4	5	8	7	10	14	33	19	24
Armádní	1	1	1				2		1	1	7	1	6	21	2	11

Tabulka 10: Pohled na vypuštěné CubeSaty z různých hledisek<sup>23</sup>

<sup>23</sup> Zdroj dat [14]